



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO - CTE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Mariana Moreno Rodrigues

**ANÁLISE E SELEÇÃO DE POLÍMEROS PARA SUBSTITUIÇÃO DE SUPORTE E
TAMPA DE AEROGERADORES**

Blumenau

2022

Mariana Moreno Rodrigues

**ANÁLISE E SELEÇÃO DE POLÍMEROS PARA SUBSTITUIÇÃO DE SUPORTE E
TAMPA DE AEROGERADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a
Coordenadoria Especial de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção
do título de graduado em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Johnny De Nardi Martins

Blumenau

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rodrigues, Mariana Moreno

Análise e seleção de polímeros para substituição de
suporte e tampa de aerogeradores / Mariana Moreno
Rodrigues ; orientadora, Johnny De Nardi Martins, 2022.
59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Engenharia de Materiais.
3. Seleção de materiais. 4. Polímeros. 5. Aerogeradores. I.
Martins, Johnny De Nardi . II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III.
Título.

Mariana Moreno Rodrigues

**ANÁLISE E SELEÇÃO DE POLÍMEROS PARA SUBSTITUIÇÃO DE SUPORTE E
TAMPA DE AEROGERADORES**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia de Materiais” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Materiais.

Blumenau, 10 de Março de 2022.

Mariana Moreno Rodrigues

Acadêmica

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Johnny De Nardi Martins

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Ismael Casagrande Bellettini

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Leonardo Ulian Lopes

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Renato e Valéria, e ao meu irmão Alan que tornaram esta realização possível. Como também, dedico aos queridos amigos que tanto amo e fizeram parte dessa jornada tanto de perto como de longe.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Renato e Valéria, e ao meu irmão Alan que sempre foram meu alicerce e tiveram ao meu lado, mesmo com a longa distância, desde o começo, me incentivando em todos os momentos com muito amor, paciência, compreensão e sempre vibrando com as minhas vitórias.

A minha avó Eunice que sempre me incentivou a ir atrás dos meus sonhos e sempre fez com que a distância de casa fosse mais leve com suas longas ligações.

Aos meus amigos feitos em Blumenau que foram minha família durante toda essa trajetória, com quem me diverti, evolui, compartilhei momentos incríveis e de muita dificuldade também. Pessoas que passaram na minha vida e deixaram uma grande marca para a vida toda, e os que permanecem com grandes laços.

Aos meus amigos que morei junto durante minha graduação e que me ensinaram muito sobre a vida e compartilhei os melhores momentos dessa trajetória.

A todos os meus amigos de São Paulo que sempre me fizeram sentir amada e deram todo o apoio nas idas e vindas. Especialmente a Iris Godoi que esteve presente desde o cursinho e com quem pude compartilhar todas minhas vitórias e derrotas na vida universitária e pessoal.

Ao meu orientador Professor Dr. Johnny De Nardi Martins pela paciência, contribuição de conhecimentos técnicos e instruções para realização deste trabalho.

A seção de Desenvolvimento e Qualificação de Fornecedores (DQF) da WEG Equipamentos S.A. pela oportunidade de realizar este estudo que foi de grande relevância para o aperfeiçoamento de meus conhecimentos técnicos.

Ao meu colega de trabalho Thiago Amaral por me auxiliar e instruir na realização deste projeto e pela amizade construída tornando tudo mais leve.

A Universidade Federal de Santa Catarina e todos os professores envolvidos no curso de graduação em Engenharia de Materiais do Campus de Blumenau que compartilharam todos os conhecimentos de engenharia e ciência.

RESUMO

O presente trabalho visa estudar a viabilidade de substituição da matéria-prima de componente metálico presente em aerogeradores por material polimérico. O componente metálico em estudo é um conjunto composto por um suporte e uma tampa localizados no eixo do aerogerador. Este conjunto é utilizado como acesso para manutenção da graxa presente nos rolamentos. A aplicação do componente está submetida à temperatura máxima de 50°C que o aerogerador pode atingir e ao contato com a graxa. A tampa e o suporte atualmente são feitos de aço carbono e são pintados. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade de utilização de um material polimérico que atenda às condições de aplicação do conjunto suporte/tampa. Além disso, outra finalidade da substituição de matéria prima é reduzir o custo do componente e aumentar a lucratividade dos aerogeradores. Os polímeros selecionados para ensaio são o poli(acrilonitrila-cobutadieno-co-estireno) (ABS), Polipropileno (PP) e Poliamida 6.6. Os materiais foram submetidos ao envelhecimento acelerado com e sem graxa para análise comparativa. E então, foram avaliados através de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e ensaios de tração. Por fim, foi possível avaliar e determinar a viabilidade da substituição da matéria prima do componente. E, através das análises concluiu-se que o ABS foi a opção mais indicada visto que este não apresentou alteração em seu comportamento mecânico e estrutural através da comparação de resultados práticos e teóricos, e proporcionaria um *saving* de 94,6% anual à empresa em relação com o gasto do componente metálico atual.

Palavras-chave: Aerogerador. Substituição. ABS. PP. PA6,6. Envelhecimento. *Saving*.

ABSTRACT

The present work aims to study the possibility of replacing the raw material of metallic component present in wind turbines by polymeric material. The metallic component under study is a set composed of a support and a cover located on the shaft of the wind turbine. This set is used as access for maintenance of the grease present in the bearings. The application of the component is subject to the maximum temperature of 50°C that the wind turbine can reach and to contact with the grease. The cover and support are currently made of carbon steel and they are painted. The objective of this work is to analyze the possibility of using a polymeric material that meets the application conditions of the support/cover set. In addition, another purpose of raw material replacement is to reduce component cost and increase the profitability of wind turbines. The polymers selected for testing are poly(acrylonitrile-cobutadiene-co-styrene) (ABS), Polypropylene (PP) and the Polyamide 6.6 (PA6.6). The materials were subjected to accelerated aging with and without grease for comparative analysis. Then, they were evaluated by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and tensile tests. Finally, it was possible to evaluate and determine the possibility of replacing the raw material of the component. And, through the analysis, it was concluded that ABS was the most suitable option since It did not present any change in its mechanical and structural behavior through the comparison of practical and theoretical results, and It would also provide an annual saving of 94.6% to the company compared to the current metal component cost.

Keywords: Wind turbine. Replace. ABS. PP. PA6.6. Aging. Saving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da potência dos aerogeradores ao longo das últimas décadas.....	19
Figura 2 – Representação dos componentes dos aerogeradores WEG.....	20
Figura 3 – Classificação de turbinas eólicas com base na orientação do eixo.	21
Figura 4 – Exemplo de <i>hub</i> ou cubo, utilizado como componente de turbinas eólicas.	22
Figura 5 – Seção transversal típica para pás de aerogeradores.....	23
Figura 6 – Suporte (a) e tampa (b) dos aerogeradores.....	24
Figura 7 – Localização do suporte e da tampa no eixo de aerogeradores.	25
Figura 8 – Estrutura molecular do polipropileno.....	27
Figura 9 – Estrutura química da PA6 (a) e PA66 (b).	29
Figura 10 – Polimerização do poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno) (ABS).	30
Figura 11 – Seleção de materiais no processo de desenvolvimento de produtos.....	33
Figura 12 – Desenho esquemático dos corpos-de-prova poliméricos Tipo IV.	39
Figura 13 – Corpos-de-prova com graxa antes do processo de envelhecimento.....	40
Figura 14 – Fluxograma do procedimento experimental proposto.....	41
Figura 15 – Ensaio de FTIR para as condições AB e GE.....	44
Figura 16 – Tensão <i>versus</i> deformação para a condição AB e GE.	45
Figura 17 – Ensaio de FTIR das amostras AB e GE.	47
Figura 18 - Tensão <i>versus</i> deformação para a condição AB e GE.....	48
Figura 19 – Ensaio de FTIR para as amostras AB e GE.	50
Figura 20 – Tensão <i>versus</i> deformação para a condição AB e GE.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de plásticos nos EUA, em milhões de libras.	26
Tabela 2 – Propriedades do polipropileno isotático.	28
Tabela 3 – Propriedades físicas gerais do Poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno) (ABS)..	31
Tabela 4 – Especificações do polímero ABS Tairilac®.....	36
Tabela 5 – Propriedades do polipropileno PP H 503.....	37
Tabela 6 – Propriedades da poliamida 6,6 101F NC010.....	37
Tabela 7 – Características da graxa Mobil SHC Grease 460 WT.	38
Tabela 8 – Dimensões das amostras para espessura T por mm (in).....	39
Tabela 9 – Nomenclatura das amostras de acordo com as condições a que foram submetidas.	41
Tabela 10 – Propriedades mecânicas para condição AB e GE.....	46
Tabela 11 – Propriedades mecânicas para condição AB e GE.....	49
Tabela 12 - Propriedades mecânicas para condições AB e GE.....	51
Tabela 13 – Comparativo de cotações de polímeros.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de prova
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
PA	Poliamida
PA6	Poliamida 6
PA66	Poliamida 6,6
PDP	Processo de desenvolvimento de produtos
PF	Temperatura de fusão
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
SAN	Estireno-acrilonitrila
Tg	Temperatura de transição vítrea

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	revisão bibliográfica	18
2.1	Aerogeradores: definição e desenvolvimento de dispositivos.....	18
2.2	COMPONENTES DOS AEROGERADORES	20
2.2.1	Rotor	21
2.2.1.1	<i>Hub</i>	22
2.2.1.2	<i>Pás</i>	22
2.2.1.3	<i>Eixo</i>	23
2.2.1.3.1	Suporte e tampa	24
2.3	Polímeros termoplásticos.....	25
2.3.1	Polipropileno	27
2.3.2	Poliamida 6,6.....	28
2.3.3	Poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno) (ABS)	30
2.4	Graxas comerciais.....	31
2.5	Seleção de materiais	32
2.5.1	Interação entre Polímeros e Graxas.....	34
2.6	análise de custo para desenvolvimento de matéria-prima	34
3	materiais e métodos	36
3.1	Materiais	36
3.1.1	Poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno).....	36
3.1.2	Polipropileno	36
3.1.3	Poliamida 6,6.....	37
3.1.4	GRAXA.....	38

3.2	MÉTODOS	38
3.2.1	Preparação das amostras	38
3.2.2	Envelhecimento	41
3.2.3	Caracterização	42
3.2.3.1	<i>Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)</i>	<i>42</i>
3.2.4	Comportamento mecânico	42
3.2.4.1	<i>Ensaio de resistência à tração.....</i>	<i>42</i>
3.2.5	Análise Econômica.....	43
4	resultados e discussões.....	44
4.1	Polímero ABS	44
4.1.1	Caracterização por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier	44
4.1.2	Resistência à tração	45
4.2	Polímero PP	46
4.2.1	Caracterização por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier	46
4.2.2	Resistência à tração	48
4.3	Polímero PA 6,6	49
4.3.1	Caracterização por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier	49
4.3.2	Resistência à tração	50
4.4	análise ECONÔMICA	51
5	CONCLUSÃO.....	53
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, cada vez mais investigações buscam alternativas para o fornecimento de energia em todo mundo, no intuito de estabelecer fontes mais adequadas ao meio ambiente em substituição ao fornecimento convencional. Dados sugerem que cerca de 80% da produção de energia é oriunda de combustíveis fósseis (IEA, 2018). Por outro lado, além dos impactos relatados por conta de emissão de gases e poluentes, outras fontes amplamente empregadas, recebem considerável atenção em virtude de problemas de segurança, como no caso, a energia nuclear. Desta forma, o desenvolvimento de fontes sustentáveis e renováveis, como turbinas eólicas, torna-se opção promissora para atender a demanda de energia mundial, visto que, tem aumentado ano após ano, em torno de 2% (PORTÉ-AGEL et al., 2020).

Aerogeradores são equipamentos responsáveis pela conversão de energia eólica em elétrica, tanto para utilização industrial quanto doméstica. Recentemente, apesar da limitante capacidade de instalação, o fornecimento de energia a partir de tais máquinas tem se destacado, visto o desenvolvimento de novas tecnologias que permitem a produção de turbinas eólicas cada vez maiores (DU et al., 2020).

Diferentes estudos abordam a melhoria em componentes de aerogeradores, considerando alternativas para pás (YANG; HE; ZHANG, 2016), monitoramento de falhas estruturais dos equipamentos (CHOU; CHIU; CHI, 2013), otimização do peso de *hub* (LEE et al., 2019), dentre outros. Tais investigações buscam adequar as peças a partir do aprimoramento da eficiência utilizando novos materiais, como também, solucionar problemas quanto a prevenção de acidentes, ampliar a capacidade de fornecimento de energia, bem como, redução de custos de produção (LIU et al., 2015).

Dentre as componentes de turbinas eólicas, tem-se o suporte e tampa. Localizados no rotor, tais peças permitem a manutenção interna do equipamento. Comumente, são produzidas em material metálico e precisam de melhorias que contribuam com o desenvolvimento dos aerogeradores. A literatura científica pouco explora a inovação para tais dispositivos. Entretanto, como forma de oportunidade de avanços na produção de turbinas eólicas, principalmente, considerando custos, estudos sobre a possibilidade de substituição dos insumos convencionais utilizados na manufatura de tais componentes tornam-se relevantes.

Entende-se que materiais poliméricos dispõem de vasta gama de características e propriedades interessantes, que vem a contribuir no desenvolvimento de produtos para

diferentes funcionabilidades e usabilidades, nas mais diversas áreas. Especificamente, termoplásticos são caracterizados por baixo custo, facilidade de processamento e com baixo ou alto nível de exigência mecânica (dependendo do tipo de polímero), conforme citado por Canevarolo (2010). Sendo assim, inúmeros materiais poliméricos enquadram-se nesta categoria, onde cita-se como exemplo polipropileno (PP), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC), poliamidas (PA), estireno-acrilonitrila (SAN), poliacrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) dentre outros. Cada qual com características próprias adquiridas em virtude do material precursor e das técnicas de processamento.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de material polimérico alternativo como substituinte de metais utilizado para a confecção de suporte e tampa de aerogeradores. Para tanto, o estudo foi fundamentado a partir de técnica de caracterização com três polímeros previamente selecionados, bem como, avaliação do comportamento mecânico destes em contato com graxa lubrificante. A investigação foi realizada afim de viabilizar a modificação e contribuir para a redução de custos, sem comprometer o desempenho dos equipamentos da empresa especializada no setor de energia eólica. É conveniente comentar que o estudo foi realizado durante a disciplina de Estágio III, na companhia WEG.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade de substituição de componente metálico de aerogeradores (suporte e tampa) por material polimérico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a interação dos polímeros com a graxa frente a diferentes condições de temperatura e tempo;
- b) Investigar o comportamento mecânico dos materiais poliméricos em contato com a graxa;
- c) Determinar o material mais adequado com base nas influências das possíveis interações entre polímero e graxa,

- d) Avaliar a viabilidade econômica da substituição do material original por material polimérico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo é dedicado a revisão bibliográfica sobre o tema abordado neste trabalho de conclusão de curso. Primeiramente, serão apresentados conteúdos relacionados aos aerogeradores, como definições e histórico de desenvolvimento de tais dispositivos. A seguir, os componentes principais serão explorados, destacando o suporte e tampa, elementos foco da proposta deste trabalho. Além disso, será apresentados os polímeros termoplásticos (polipropileno, poliamida 6,6 e acrilonitrila-butadieno-estireno), bem como, graxas comerciais, empregadas na constituição dos aerogeradores. Por fim, relata-se sobre seleção de materiais e análise de custo para desenvolvimento de matéria-prima.

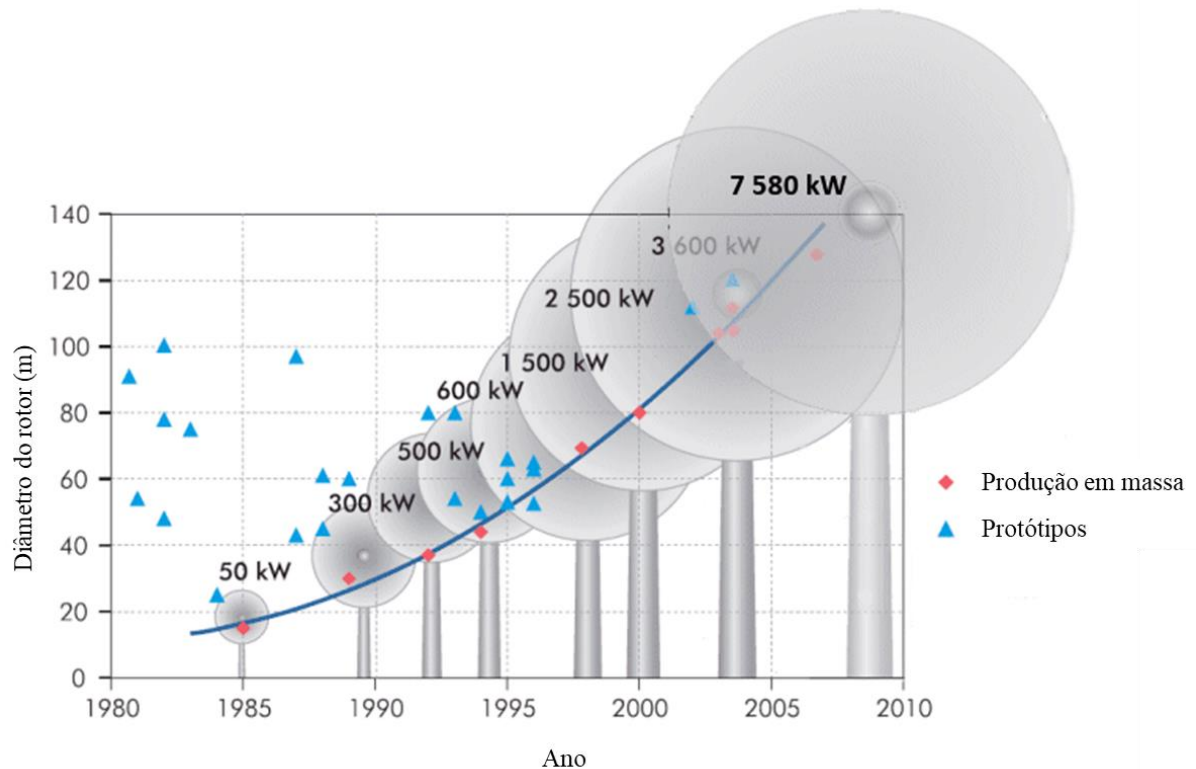
2.1 AEROGERADORES: DEFINIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS

O aerogerador ou também conhecido por turbina eólica, é um dispositivo que através da rotação de suas pás transforma energia cinética oriunda do vento em energia elétrica. Nos anos 1950, o alemão Allgaier construiu os primeiros parques eólicos com o intuito de oferecer energia elétrica para as fazendas afastadas da rede pública de distribuição de energia. Os aerogeradores produzidos e instalados na Alemanha possuíam baixa potência, aproximadamente 6kW, e pequeno porte (PAVINATTO, 2005).

Mesmo com o desenvolvimento de outra alternativa de geração de energia, a utilização de aerogeradores não ganhou força na década seguinte. Isso porque o baixo valor do petróleo tornou a nova tecnologia economicamente descartável. Porém, alguns anos depois, a procura por tecnologias eólicas para obtenção de energia elétrica ganhou força devido ao aparecimento da crise do petróleo (PAVINATTO, 2005).

A necessidade de produzir energia elétrica de forma eficiente, de baixo custo e com maior potência, incentivou países como Dinamarca, Alemanha e EUA a otimizar o conceito inovador do aerogerador com potência de 200kW desenvolvido por Gedser na Dinamarca. Ao longo dos anos, o aumento da potência das turbinas eólicas proporcionou maior abastecimento de energia elétrica nas redes elétricas a partir da energia cinética dos ventos (PAVINATTO, 2005; VITTORINO, 2012). A evolução das turbinas foi ganhando um grande porte acompanhado do aumento da potência e quantidade de máquinas fabricadas, conforme observa-se na Figura 1.

Figura 1 – Evolução da potência dos aerogeradores ao longo das últimas décadas.



Fonte: Adaptado de ChemViews (2012).

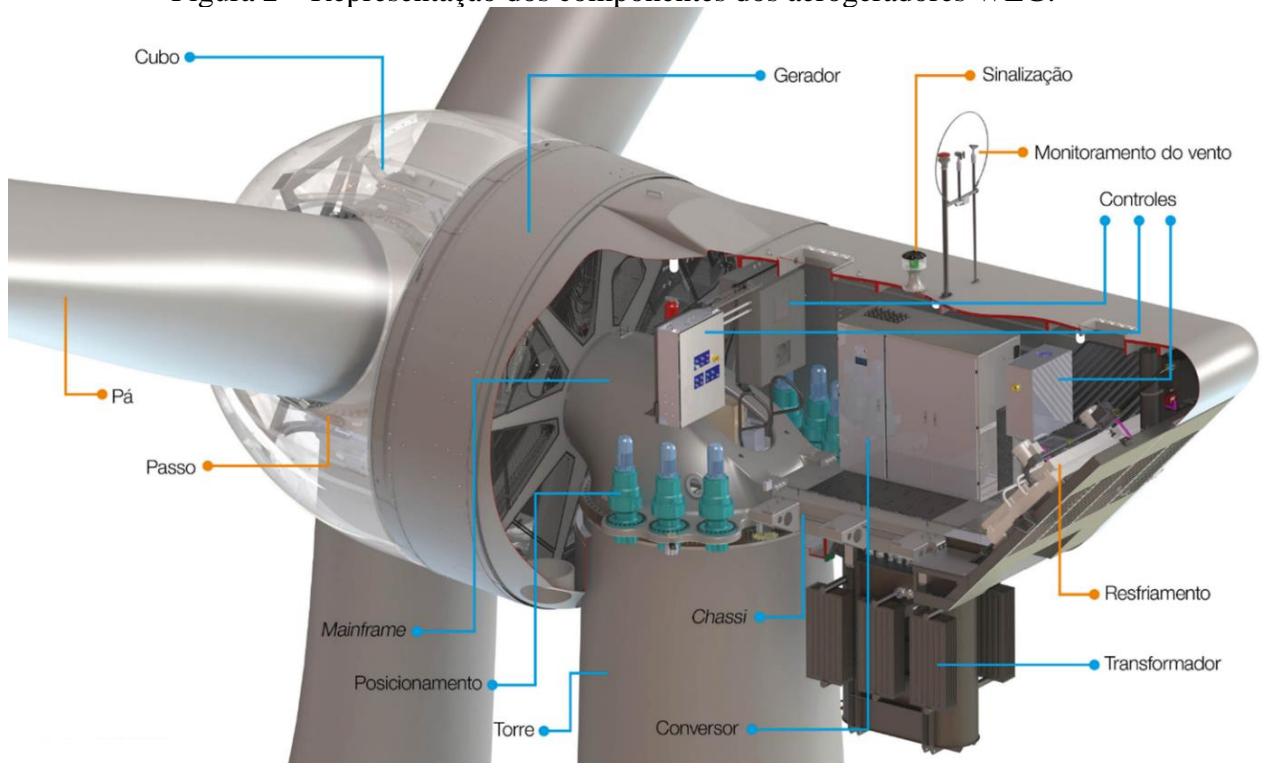
Dentre os dois grupos de aerogeradores existentes no mercado, o aerogerador de eixo horizontal é o mais utilizado até hoje. Os aerogeradores são classificados de acordo com a direção do eixo de rotação dos rotores, tanto na vertical, ou seja, perpendicular à direção do vento, quanto na horizontal, paralelo à direção do vento (VITTORINO, 2012). O eixo na direção vertical proporciona velocidade de rotação constante e a captação de vento através de todas as direções. Entretanto, esta posição do eixo é desfavorecida devido a sua complexidade aerodinâmica, e menor aproveitamento em ventos de altas velocidades. Já o eixo na direção horizontal apresenta maior capacidade de acesso à ventos fortes devido à posição estável das pás (VERDUM, 2013).

Aerogeradores de eixo horizontal ganharam grande reconhecimento ao longo dos anos, e a necessidade para aumentar a geração de energia elétrica através dos ventos fez com que a pesquisa e o desenvolvimento de seus componentes fossem aprimorados, aumentando seu desempenho (ENEVOLDSEN; XYDIS, 2019).

2.2 COMPONENTES DOS AEROGERADORES

Conforme previamente citado, os rotores de eixo horizontal são equipamentos dados pela rotação do eixo paralela à direção dos ventos, portanto, colateral à superfície terrestre (VITTORINO, 2012). Para que seu funcionamento seja efetivo, os aerogeradores são constituídos por componentes importantes, como o rotor, propriamente dito, pás, passo, *chassi*, conversor, sinalizadores de vento, transformador, gerador, dentre outros, cada qual com funcionalidades específicas, conforme observa-se na Figura 2.

Figura 2 – Representação dos componentes dos aerogeradores WEG.



Fonte: Adaptado de WEG (2021).

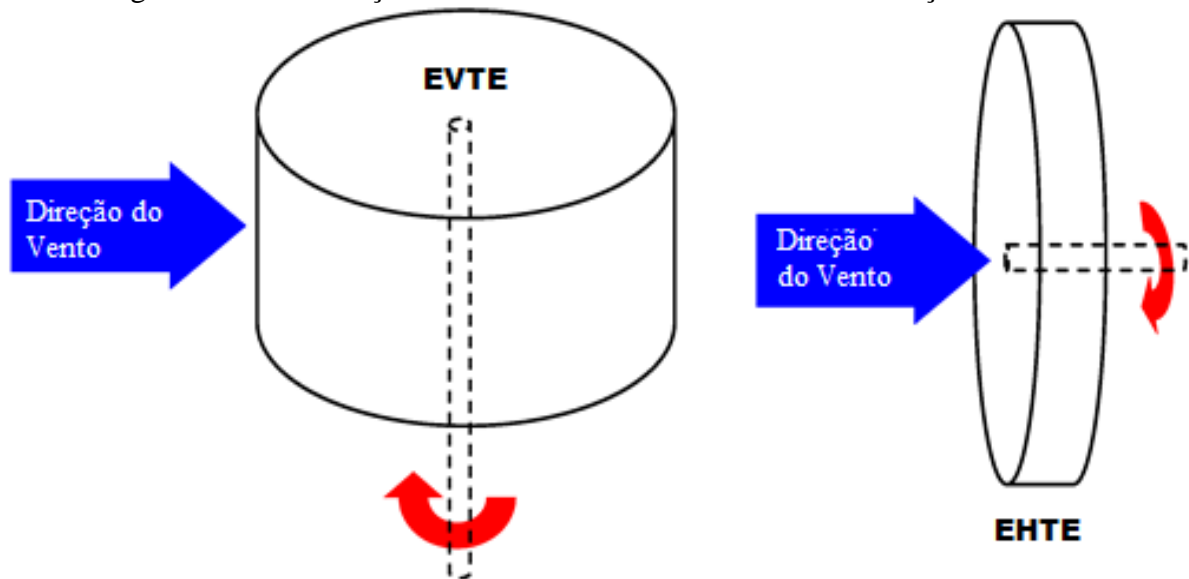
Basicamente, entre os principais componentes, Vittorino (2012) explica que o rotor é composto por pás e eixo. No qual, o vento transpassa as pás, que são responsáveis pela transformação da energia cinética do vento em energia cinética de rotação do eixo. O mesmo autor continua citando que por sua vez, o eixo é conectado a um multiplicador de velocidades, também conhecido como caixa de engrenagens, ou ainda, *gearbox*, responsável pela transmissão de energia mecânica entre o eixo e gerador. Entretanto, conforme a Figura 2, alguns equipamentos não são constituídos por tal dispositivo e assim, o transporte de energia é dado diretamente entre eixo e gerador. Além disso, turbinas com design sem a caixa de engrenagens

permitem a redução de componentes mecânicos, simplificando a produção e manutenção das mesmas (WAGNER, 2018). Por último, tem-se o gerador incumbido da transformação de energia mecânica em elétrica (PICOLO; BUHLER; RAMPINELLI, 2014).

2.2.1 Rotor

Como previamente citado, os rotores são classificados entre eixo vertical (EVTE) e horizontal (EHTE), conforme orientação e rotação do mesmo (Figura 3). Os verticais têm como principal característica a possibilidade de geração de energia a partir de regime de vento reduzida, o que possibilita menor velocidade de arranque, bem como, maior eficiência na produção de energia em todas as direções. Sendo assim, são componentes de turbinas eólicas muito indicados para ambientes urbanos (KUMAR; RAEEHEMIFAR; FUNG; 2018).

Figura 3 – Classificação de turbinas eólicas com base na orientação do eixo.



Fonte: Adaptado de Schubel e Crossley (2012).

Por outro lado, aerogeradores com estrutura do rotor de eixo horizontal, apesar do maior custo de produção e manutenção, são mais eficientes em áreas não urbanas e muito empregados na geração de energia elétrica. Entretanto, a literatura relata alguns problemas no avanço de tecnologias que impulsionem o desenvolvimento de aerogeradores horizontais, principalmente, quando considerados custos (AHMED; CAMERON; 2014). Há certa resistência aos dispositivos, visto a baixa produção de energia quando comparados a

combustíveis fósseis. Isto se deve ao fato que para tornarem-se mais eficientes, as turbinas precisam alcançar ventos em níveis mais altos, porém, encontram barreiras que limitam e dificultam tais possibilidades. A exemplo disso, a dimensão e a logística (rodovias, ferrovias, guindastes, dentre outros) necessária para transporte de peças, fatores que precisam ser superados para que a construção de torres maiores possa ser realizada (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008).

2.2.1.1 Hub

O *hub* ou também conhecido, cubo é o componente responsável pela conexão entre as pás e o eixo do rotor, possibilitando a transferências de forças, principalmente, em turbinas as quais possuem mecanismo de controle do ângulo de inclinação das pás, controle de passo (FADIGAS, 2011; PARIS, 2020). A partir da Figura 4 é possível visualizar o *hub* de turbinas eólicas horizontais.

Figura 4 – Exemplo de *hub* ou cubo, utilizado como componente de turbinas eólicas.



Fonte: (SECCO et al., 2015).

2.2.1.2 Pás

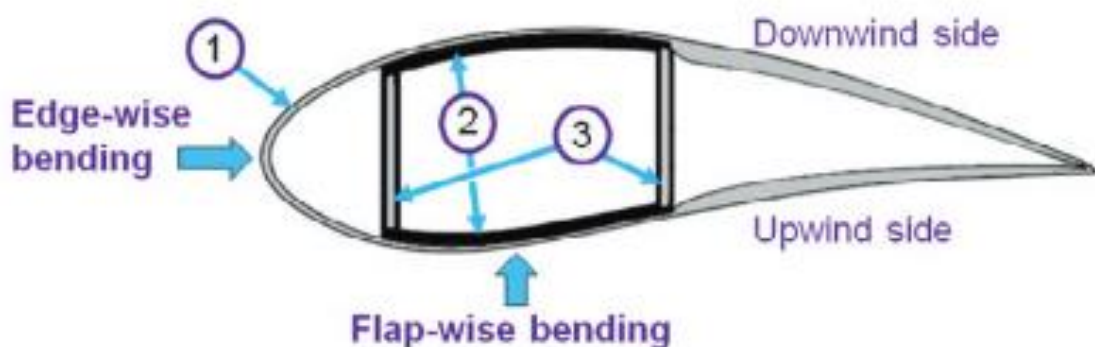
As pás são componentes importantes na constituição dos aerogeradores. Basicamente, cumprem função similar as asas de um avião, onde o perfil aerodinâmico permite a geração de forças de sustentação e arrasto, proporcionado por conta de sua própria geometria (CORREIA, 2019). Os critérios de escolha sobre a forma e quantidade de pás na constituição do equipamento

abrangem diversos fatores como o local de instalação, peso, custos de fabricação, condições ambientais, velocidade, eficiência requerida e até mesmo, padrões estéticos (SCHUBEL; CROSSLEY, 2012).

Comumente, turbinas eólicas modernas são produzidas com três pás, dominando o mercado de aerogeradores por conta do seu elevado desempenho na captação de vento e assim, geração de energia. Entretanto, outros projetos podem ser adotados, sendo constituídos por uma ou duas, dependendo das necessidades requeridas para o equipamento (PESTANA, 2016). A estrutura das pás é dada através da longarina formada por um laminado espesso, contendo fibras unidirecionais para a transferência de cargas de flexão na aba. Além disso, o revestimento das pás é manufaturado, convencionalmente, com fibras de vidro dupla frontura ou triaxial, e núcleo de balsa ou espuma, dependendo do nível de resistência à flambagem requerido (VEERS et al., 2003).

O desenvolvimento de pás dependerá da aerodinâmica e critérios de rigidez (COX; ECHTERMAYER, 2012). A Figura 5 demonstra exemplo esquemático da seção transversal e os três membros principais das pás (1, casco do aerofólio; 2, longarina; 3, almas de cisalhamento) empregadas na construção de aerogeradores.

Figura 5 – Seção transversal típica para pás de aerogeradores.



Fonte: Adaptado de Cox e Echtermeyer (2012).

2.2.1.3 Eixo

A principal função do eixo é transmitir a rotação do rotor, decorrente do impulsionamento dado pelo vento ao ser captado nas pás. Por sua vez, faz a transferência por

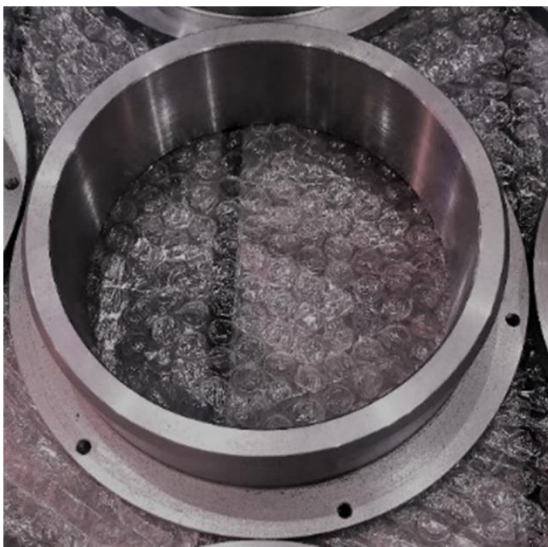
meio de mancais de rolamento e por meio de um acoplamento, é conectado a um gerador elétrico (RIGOLIN, 2021).

2.2.1.3.1 Suporte e tampa

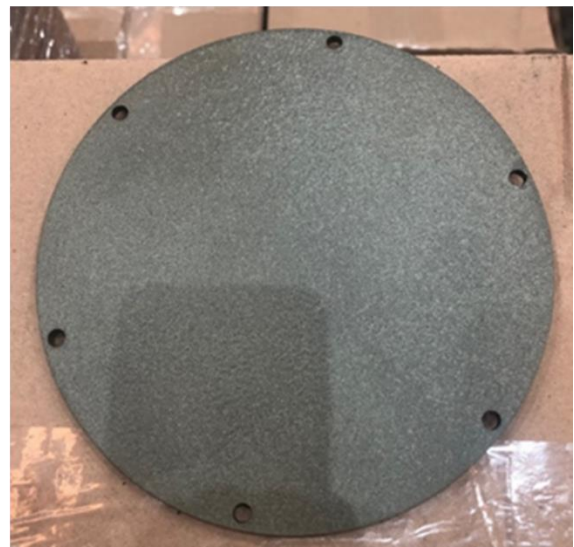
Os suportes e as tampas localizados no rotor têm como única função permitir acesso aos rolamentos para manutenção da graxa lubrificante de tempos em tempos. Atualmente, esses componentes são fabricados em aço carbono e posteriormente são pintados, além disso, estes não sofrem nenhum esforço mecânico. Sua aplicação exige que o suporte e a tampa sejam resistentes à temperaturas próximas à 50°C, e que seja resistente ao contato com a graxa, sem que haja a degradação no material. Para melhor entendimento, a partir da Figura 6 (a) e (b), observa-se o suporte e tampa empregados como componentes do aerogerador, respectivamente.

Figura 6 – Suporte (a) e tampa (b) dos aerogeradores.

(a) Suporte



(b) Tampa



Fonte: A autora (2022).

Na Figura 7 abaixo é possível observar o local onde é fixado do suporte e tampa no eixo do aerogerador. A partir da imagem é possível ter uma noção do dimensional do suporte e da tampa que em relação ao eixo é muito menor.

Figura 7 – Localização do suporte e da tampa no eixo de aerogeradores.



Fonte: A autora (2022).

2.3 POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

A definição de polímeros é oriunda da própria palavra grega *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição), conforme citado por Canevarolo (2010). Desta forma, o mesmo autor continua citando que o material é uma macromolécula composta por dezenas de milhares de unidades repetitivas, conectadas por ligações covalentes. Polímeros são muito importantes devido a vasta gama de materiais precursores, bem como, versatilidade de aplicações, sobretudo, em virtude de suas propriedades físicas e químicas atrativas. A exemplo disso, as possibilidades permitem que alguns desses materiais possam ser mais fortes que o próprio aço, como também, resistentes a processos de degradação e ferrugem. Tais características são resultantes do comprimento e forma da molécula (CANEVAROLO, 2010; CARRAHER JR., 2017). A Tabela 1 apresenta a produção de plásticos nos EUA em milhões de libras.

Tabela 1 – Produção de plásticos nos EUA, em milhões de libras.

Termofixos	
Epóxis	500
Ureias, melaminas e fenólicos; diversos	14500
Total	15000
Termoplásticos	
Polietileno	
Baixa densidade	7000
Alta densidade	17900
Baixa densidade linear	13900
Polipropileno	16400
Poliestireno	
Poliestireno	4500
Acrilonitrila-butadieno-estireno e acrilonitrila-estireno	2600
Poliamida, nylon	1200
Policloreto de vinila e copolímeros	15400
Outros termoplásticos	15400
Total de termoplásticos	93000
Total	108000

Fonte: Adaptado de American Chemistry Council (2013).

É conveniente comentar a respeito do processamento de polímeros termoplásticos, onde o material precursor é convertido em produto com forma e propriedades pré-estabelecidas. Normalmente, o insumo é fornecido em *pellets*, com ou sem aditivos. Durante processo de aquecimento, ao atingir nível acima da temperatura de transição vítrea (T_g), o material amolece e flui como líquido viscoso, sendo posteriormente, moldado e resfriado para fixação da micro e macroestrutura (CARRAHER JR., 2017).

Para a proposta de trabalho em questão, três polímeros termoplásticos foram investigados para a substituição e desenvolvimento de material/fornecedor de componentes dos aerogeradores, no caso, a tampa e suporte localizados no rotor. Polipropileno (PP), poliamida 6,6 (PA66) e poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno) (ABS), foram as opções estudadas e experimentadas. Portanto, a seguir serão explorados conteúdos referentes a esses insumos.

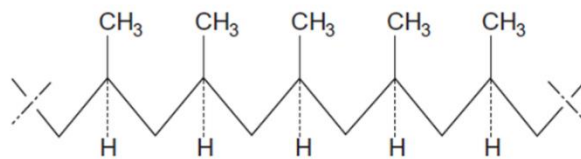
2.3.1 Polipropileno

O polipropileno é caracterizado por macromoléculas saturadas de hidrocarbonetos alifáticos. Deste modo, o polipropileno é formado por cadeia longa composta por pelo menos, 85% em massa de eteno, propeno ou outras unidades de olefinas, como no caso, processado através da preparação catalítica de propileno (MATHER, 2009).

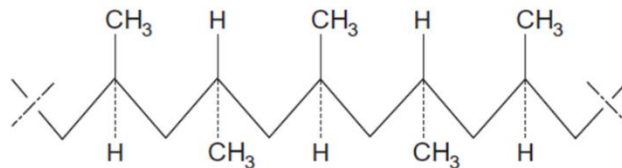
Descoberto em 1954, o polipropileno é muito aplicado devido sua baixa densidade em comparação com outros polímeros *commodities*. O polímero é um subproduto obtido a partir da indústria petroquímica, sendo derivado do monômero de propileno e assim, manufaturado por meio da reação de polimerização de adição (WANG, 2020). A partir da Figura 8 é possível observar a estrutura molecular do polipropileno isotático e suas duas outras estereo configurações, sindiotático e atático, no qual, diferem de acordo com a posição do grupo metil (CRANGLE, 2009).

Figura 8 – Estrutura molecular do polipropileno.

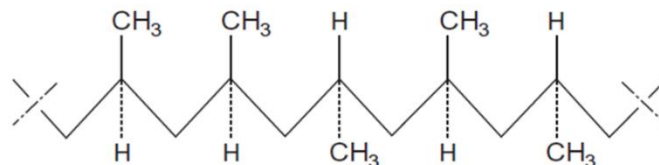
(a) Estrutura isotática – grupos metil ocorrem do mesmo lado.



(b) Estrutura sindiotática – grupos metil ocorrem alternadamente.



(c) Estrutura atática – grupos metil ocorrem de forma irregular.



Fonte: Adaptado de Crangle (2009).

Dentre suas propriedades destaca-se a elevada resistência frente a altas temperaturas e, portanto, muito empregado para a composição de produtos que demandam tal performance (MADDAH, 2016). Como também, o polímero tem características de material semi-rígido,

translúcido e boa resistência à fadiga. Além disso, é atribuído ao polipropileno alta temperatura de transição vítrea, elevada resistência à flexão, baixa absorção de água, boa resistência elétrica, leveza, boa estabilidade dimensional, alta resistência ao impacto e baixa ou nenhuma toxicidade (SHUBHRA et al., 2011; MADDAH, 2016). A Tabela 2 mostra algumas propriedades do polipropileno isotático.

Tabela 2 – Propriedades do polipropileno isotático.

Propriedade	
Densidade	0,91 – 0,94 (g.cm ⁻³)
Resistência à tração	22 – 35 (MPa)
Absorção de água	0.01 (%)
Alongamento	3 – 700 (%)
Temperatura de transição vítrea (Tg)	140 – 150 (°C)
Temperatura de fusão (PF)	160 – 166 (°C)
Expansão térmica	5,8 – 10 (10 ⁻⁵ in/in.°C)
Volume específico	30.4 – 30.8 (cm ³ .lb ⁻¹)

Fonte: Adaptado de Maddah (2016).

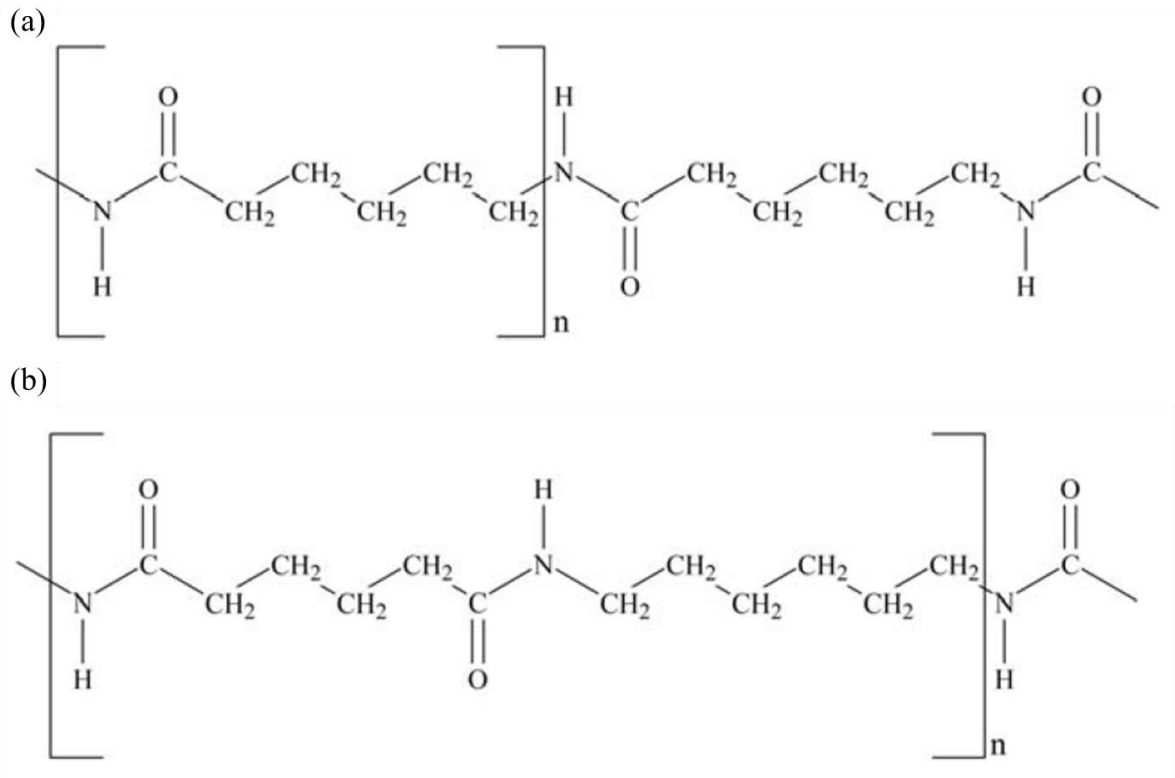
2.3.2 Poliamida 6,6

Dentre os primeiros polímeros manufaturados, encontram-se as poliamidas, também conhecidas no mercado como *nylon* (CANEVAROLO JR., 2010). Muito utilizadas na indústria têxtil, as poliamidas são também matéria-prima para outros setores, como por exemplo, automobilístico no reforço de pneus. As poliamidas são materiais, basicamente, constituídos por unidades repetitivas conectadas por ligações de amida (-NH-CO-). Podem ser sintetizadas por meio de reações de polimerização por condensação ou por abertura de anel, sendo estes, processos para a obtenção de poliamidas alifáticas. Por outro lado, as poliamidas aromáticas têm processamento mais difícil, devido a menor reatividade do material precursor, como no caso, reações utilizando diácidos e diaminas (VASANTHAN, 2009).

Diversas são as possibilidades para a produção de diferentes tipos de poliamidas. Entretanto, ressalta-se sobre as distinções acerca das poliamidas alifáticas, as quais, são categorizadas com base no comprimento da diamina e monômero diácido. Sendo assim, são designados como PA-x ou PA-xy, onde x e y representam o número de átomos de carbono entre átomos de nitrogênio. A exemplo disso, destaca-se a poliamida 6 (PA6) que é sintetizada por

polimerização de abertura de anel da caprolactama, e a poliamida 6,6 (PA66), produzida por reações entre hexametilenodiamina e ácido adípico. Ambas as poliamidas dominam a produção mundial desses polímeros, no qual, juntas correspondem a 90% do total dos diferentes tipos de poliamidas manufaturadas anualmente (MCKEEN, 2019; VANSATHAN, 2009). A estrutura química das duas poliamidas citadas pode ser visualizada na Figura 9.

Figura 9 – Estrutura química da PA6 (a) e PA66 (b).



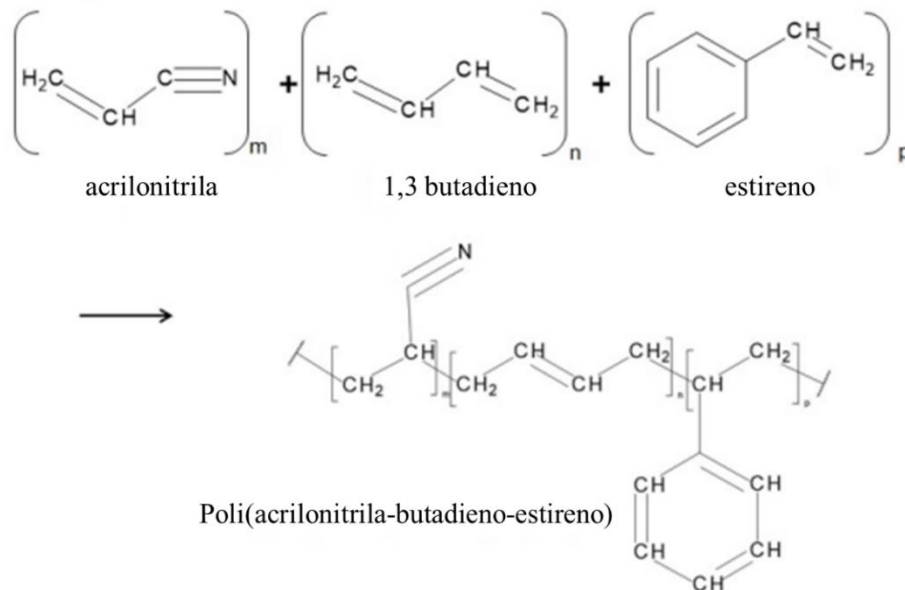
Fonte: (MCKEEN, 2019).

Especificamente tratando sobre a PA66, relata-se características como densidade de $1,14 \text{ g.cm}^{-3}$, temperatura de transição vítrea entre $40 - 55 \text{ }^\circ\text{C}$ conforme nível de umidade do material, bem como, ponto de fusão entre $250 - 265 \text{ }^\circ\text{C}$. Além disso, cita-se como propriedades interessantes a excelente resistência à tração (80 MPa), boa recuperação elástica, excelente resistência à abrasão e a maioria das substâncias químicas (DEOPURA; PADAKI, 2015). Convencionalmente, as aplicações de PA66 englobam produtos como escovas de dentes, almofadas de desgaste, rodas, luvas, cordas de instrumentos musicais, implantes médicos, conectores elétricos, linhas de pesca e engrenagens (POUZADA, 2021).

2.3.3 Poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno) (ABS)

Introduzido na década de 1950, o poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno) (ABS) surgiu como alternativa com propriedades mecânicas promissoras em substituição aos copolímeros de acrilonitrila-estireno (SAN). O termo ABS, normalmente, era designado para descrever a blenda de copolímeros contendo acrilonitrila, butadieno e estireno, como o próprio nome sugere (PETERSON, 2019). Entretanto, hoje em dia a nomenclatura é dada para o sistema de SAN e partículas de polibutadieno (borracha), levemente reticuladas e enxertadas com SAN para aprimorar a dispersão do mesmo (PETERSON, 2019). Neste sentido, o ABS é um termoplástico de engenharia, obtido a partir da polimerização de estireno e acrilonitrila na presença de polibutadieno, conforme mostrado na Figura 10 (MANISH; DHARMENDRA; AKASH, 2018).

Figura 10 – Polimerização do poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno) (ABS).



Fonte: Adaptado de INRS® (2021).

O copolímero ABS é caracterizado por alta tenacidade, boa rigidez, boa estabilidade térmica e resistência a intemperes. Além disso, conta com fácil capacidade de processamento, baixo custo de produção e excelente estabilidade sob cargas. Entretanto, deve se ter em mente que quando exposto à altas temperaturas é um material muito inflamável (SHEN et al., 2016; MILIONIS et al., 2015). A partir da Tabela 3 é possível observar propriedades gerais do ABS.

Tabela 3 – Propriedades físicas gerais do Poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno) (ABS).

Propriedades	
Densidade	1,04 (g.cm ⁻³)
Dureza Rockwell	R-110
Resistência à tração	44 (MPa)
Tensão de escoamento	68,9 (MPa)
Resistência ao impacto Izod	2,8
Temperatura de amolecimento Vicat	100 (°C)

Fonte: OLIVEIRA et al. (2016).

2.4 GRAXAS COMERCIAIS

As graxas lubrificantes são definidas como “*o produto da dispersão de um agente espessante em um lubrificante líquido (óleo base), com uma consistência entre sólida e semifluida, podendo ou não conter ingredientes destinados a conferir-lhe propriedades específicas*”, conforme citado pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM) D128-98 (2019). Desta forma, as principais funções de graxas lubrificantes são o controle do atrito entre os componentes, a redução do desgaste, transmissão de forças, controle de temperatura, amortecimento de choques, dentre outros (LACERDA; SILVA, 2012).

Entende-se que as graxas são materiais cruciais para o bom desempenho de equipamentos, as quais essas são aplicadas. Visto que, falhas ou deficiências na utilização de tal produto podem gerar problemas nas máquinas. Como por exemplo, superaquecimento devido ao atrito de componentes, aumento no nível de desgaste de peças, má transmissão de forças, aumento de corrosão frente ao contato com agentes químicos, como também, problemas na absorção de impactos (CAVALCANTI; MORA; SERRA, 2007; LACERDA; SILVA, 2012).

O desempenho das graxas é influenciado pela própria composição do fluido, no caso, considera-se que 80-95% do lubrificante é composto por óleo base (mineral, sintético ou vegetal) e 5-20% de agente espessante (ANTUNES, 2013). Cada constituinte determina as características da graxa, como por exemplo, o óleo irá conferir a lubrificação e por sua vez, o espessante ditará as propriedades físicas, como o suporte a altas temperaturas, umidade e

resistência a substâncias químicas e contaminantes (ANTUNES, 2013). Além disso, as propriedades podem ser modificadas a partir da inserção de aditivos na estrutura base do material (GOW, 2009).

É conveniente comentar que há distinção entre lubrificantes líquidos e graxas, onde o primeiro é constituído por óleo base (ésteres de ácidos dibásicos, ésteres de silicatos, silicões, poliolefinas, poliglicóis, dentre outros) e aditivos solúveis. Por outro lado, as graxas contam com espessantes (ácidos graxos metálicos, derivados de gorduras animais e óleos vegetais). Por sinal, as graxas são as únicas com aditivos insolúveis. O produto é comparado a uma esponja embebida em líquido lubrificante (GOW, 2009). Por conseguinte, o material não é caracterizado como solução química e sim, uma matriz tridimensional de fibras de sabão (espessante) dispersas em líquido lubrificante, portanto, um sistema de duas fases (DONAHUE, 2006). Sendo assim, tendo o seu comportamento descrito com um sólido plástico viscoelástico (GOW, 2009).

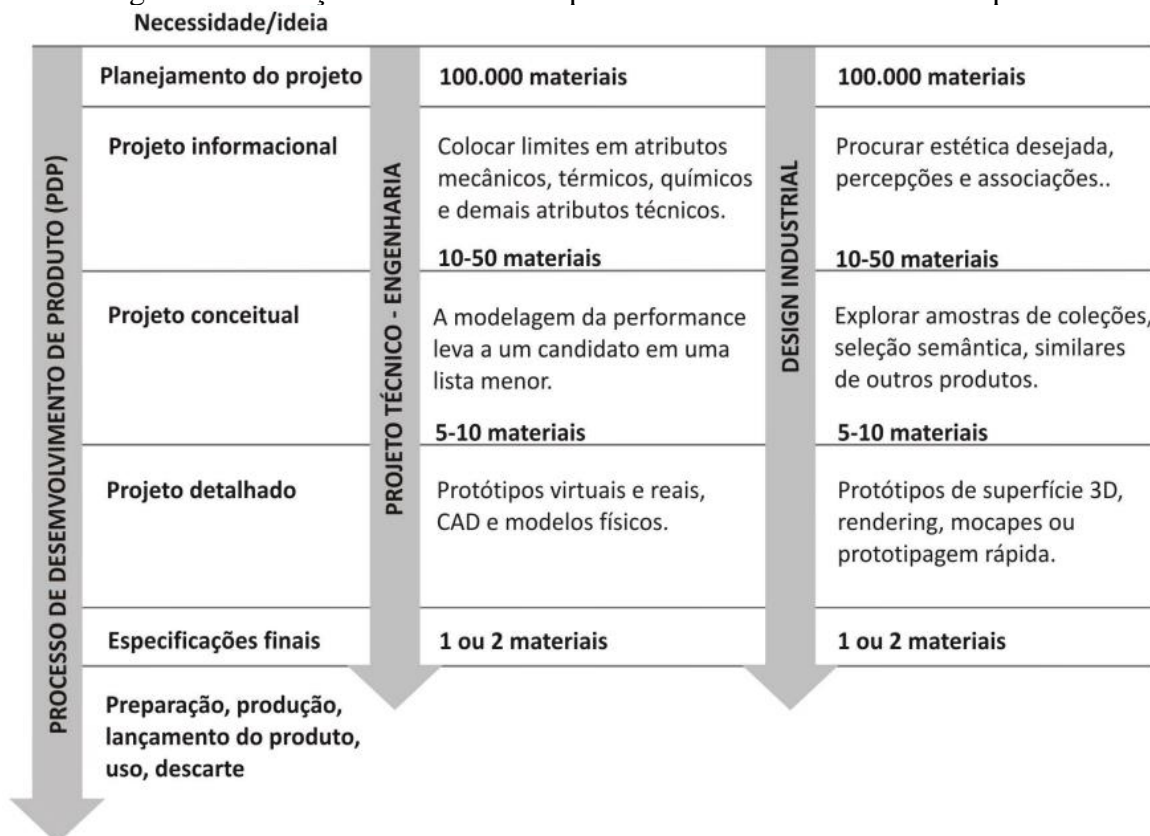
2.5 SELEÇÃO DE MATERIAIS

O processo de desenvolvimento de produtos (PDP) é dado pela interrelação de várias etapas, que devem conversar entre si para que o material final tenha as características de funcionalidade e usabilidade necessárias. Para tanto, desde a segunda metade do século XX, investigações sobre tais relações, como a estrutura e as propriedades dos materiais, além de como os processos de manufatura modificam os fatores anteriores, tem ganhado destaque como foco de estudos (SANTANA, 2007). Desta forma, estrutura, processamento e propriedades, estão interligados em uma tríade, avaliada para a seleção e aplicação de inúmeros tipos de materiais (BRECHET; EMBURY, 2013).

Deve se ter em mente que a estrutura do material diz respeito ao arranjo de átomos de uma mesma espécie ou a combinação destes, com outras espécies por meio de ligações químicas e interações eletromagnéticas. Sendo assim, compreendendo a formação de retículos cristalinos ou amorfos, dentre outros. A partir da estrutura, tem-se a derivação das propriedades que definirá as especificações de qualidade do material (SANTANA, 2007). Como por exemplo, as características físicas, mecânicas, térmicas, elétricas, óticas ou magnéticas do material de estudo. Por fim, tem-se o processamento, o qual é definido como o conjunto de técnicas que proporcionam a consolidação da forma do produto final (SANTANA, 2007). Neste sentido, a relação entre tais fatores influencia as aplicações possíveis para o material desenvolvido.

Durante a execução das etapas de PDP, a seleção de materiais está intrinsicamente ligada a todo o processo de concepção do produto. A Figura 11 demonstra as principais etapas do PDP e a correspondência com a seleção de materiais, conforme apresentado por Calegari e Oliveira (2014). Os mesmos autores citam que os materiais possuem perfil objetivo e subjetivo. No qual, o primeiro relaciona-se a informações numéricas de características tangíveis (força, módulos, dureza, ductibilidade, densidade, custo, dentre outros). Por outro lado, o segundo perfil é definido por atributos e emoções que não podem ser quantificadas (estética, prática, simbólicos, etc.), ou seja, intangíveis (CALEGARI; OLIVEIRA, 2014; ASHBY; JOHNSON, 2010; DIAS, 2009).

Figura 11 – Seleção de materiais no processo de desenvolvimento de produtos.



Fonte: Calegari e Oliveira (2014).

Neste sentido, a seleção de materiais é fator importante em todo o delinear de um projeto, sendo sempre avaliado, a fim de atender as características necessárias para a aplicação de determinado insumo, bem como, as influências no produto final. Desta forma, principalmente tratando-se de componente de aerogeradores, especificamente, suporte e tampa,

os atributos tangíveis são cruciais para a substituição destes e assim, assegurar elevada performance do equipamento.

2.5.1 Interação entre Polímeros e Graxas

A avaliação e seleção de materiais que venham a ser alternativas para manufatura de componentes, deve ser realizada cuidadosamente. Isto se deve ao fato que na proposta deste trabalho, a substituição é baseada na utilização de polímeros como alternativa para manufatura de peças metálicas, no caso, suporte e tampa feitos de aço carbono. Desta forma, para a análise da viabilidade de troca dos materiais, um dos principais fatores considerados é a interação entre os materiais propostos (RATÃO, 2013).

Especificamente, sobre o suporte e tampa, a graxa está diretamente em contato com os componentes e, portanto, espera-se que a mesma não influencie no material substituto, como também, o contrário. Para tanto, a afinidade química (polaridade, eletronegatividade, função orgânica, dentre outros) é fator primordial para o desempenho e a possibilidade de substituição do material convencional utilizado. Ainda mais, considerando que as graxas lubrificantes podem sofrer modificações reológicas quando em contato com polímeros (MARTIN-AFONSO et al., 2009). Desta forma, alterando as propriedades de ambos os materiais.

A compatibilidade entre polímeros e graxas é investigado na literatura científica, no intuito de identificar possíveis mudanças nas características de ambos. Portanto, estudos buscam resposta a partir da avaliação experimental em certas condições de temperatura, comportamento mecânico e umidade (ROBERT et al., 2010). Sendo assim, visando investigar possíveis mudanças que possam vir a ocorrer.

2.6 ANÁLISE DE CUSTO PARA DESENVOLVIMENTO DE MATÉRIA-PRIMA

Para o desenvolvimento de produtos em uma companhia, um dos principais aspectos considerados são os custos de matéria-prima e manufatura dos componentes. Comumente, a matéria-prima é avaliada com base na especificação, no intuito de analisar o desempenho, bem como, os possíveis fornecedores que possam atender a demanda do insumo pretendido. Sendo assim, tratando-se do suporte e tampa de aerogeradores, componentes que não desempenham funções tão específicas, o estudo sobre a viabilidade da substituição de matéria-prima é realizado a partir do levantamento de possíveis materiais alternativos, que principalmente, não

influenciem no desempenho do equipamento num todo, como também, não tenha interação direta com a graxa.

Neste sentido, a análise de custo é feita a partir dos resultados obtidos em ensaios experimentais preliminares, seguido da busca por fornecedores. Principalmente, aqueles que oferecem melhor custo-benefício, entre desempenho do material e redução de preço para manufatura dos componentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos utilizados para realização do procedimento experimental. A partir da técnica de envelhecimento, amostras de polímero e graxa, foram caracterizadas por análise de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), como também, avaliação do comportamento mecânico por meio de ensaio de resistência à tração. Por fim, buscou-se fornecedor de material polimérico com melhor performance no procedimento anterior, a fim de relacionar os resultados obtidos ao custo de manufatura de suportes e tampas.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Poli(acrilonitrilacobutadieno-co-estireno)

Para a realização do procedimento experimental, foram utilizados três polímeros diferentes para analisar a substituição da matéria prima do componente em análise. O primeiro polímero utilizado foi o ABS Tairilac[®] da empresa Formosa Chemicals & Fibre Corporation. Este *grade* apresenta elevada rigidez e resistência ao impacto podendo ser processado por injeção ou extrusão. Na Tabela 4 estão apresentadas as principais propriedades do ABS Tairilac[®].

Tabela 4 – Especificações do polímero ABS Tairilac[®].

Propriedades	
Resistência à tração	38 (MPa)
Resistência ao impacto Izod	30 (kg.cm/cm)
Resistência à flexão	66 (MPa)
Dureza Rockwell	R-102 (Escala-R)
Temperatura de amolecimento Vicat	99 (°C)
Temperatura de deflexão térmica	94 (°C)

Fonte: Adaptado datasheet ABS Tairilac[®] (2021).

3.1.2 Polipropileno

O segundo polímero utilizado foi o Polipropileno H503 da empresa Braskem[®]. Este apresenta boa relação entre rigidez e resistência ao impacto e é composto por aditivos para uso

geral. A principal característica em seu processamento é sua estabilidade de fusão, podendo ser realizado por extrusão em geral, injeção e produção de filmes biorientados. A Tabela 5 apresenta as principais propriedades do PP H503.

Tabela 5 – Propriedades do polipropileno PP H 503.

Propriedades	
Densidade	0,905 (g.cm ⁻³)
Módulo de flexão secante a 1%	1400 (MPa)
Resistência à tração no escoamento	35 (MPa)
Alongamento no escoamento	11(%)
Resistência ao impacto Izod (23 °C)	40 (°C)
Temperatura de deflexão térmica (1,820 MPa)	55 (°C)
Temperatura de amolecimento Vicat	155 (°C)

Fonte: Adaptado de datasheet PP Braskem[®] (2021).

3.1.3 Poliamida 6,6

Por fim, o terceiro polímero utilizado foi a Poliamida 6,6 Zytel[®] 101F NC010 do fabricante DuPont. O material é conhecido por apresentar alta resistência mecânica, e excelente equilíbrio de rigidez e tenacidade. Uma grande vantagem do processamento desse *grade* é a velocidade de seu ciclo, o que proporciona alta produtividade. Na Tabela 6 abaixo estão as principais propriedades da PA 6.6 Zytel[®] 101F NC010.

Tabela 6 – Propriedades da poliamida 6,6 101F NC010.

Propriedades	
Módulo elástico (1 mm.min ⁻¹)	3100 (MPa)
Resistência à tração no escoamento (23 °C)	82 (MPa)
Alongamento no escoamento	4,5 (%)
Resistência ao impacto Charpy (23 °C)	6 (kJ.m ⁻²)
Temperatura de deflexão térmica (1,820 MPa)	70 (°C)
Temperatura de fusão	262 (°C)

Fonte: Adaptado de datasheet PA 6,6 Zytel[®] (2021).

3.1.4 GRAXA

A graxa comercial utilizada nas análises foi a Mobil SHC Grease 460 WT, um lubrificante utilizado para aplicações como turbinas eólicas em temperaturas acentuadas. A formulação da Mobil SHC Grease 460 WT é uma combinação de um fluido de base sintética e de um espessante de complexo de lítio de características consideráveis. O complexo de lítio proporciona excelente estabilidade estrutural e as combinações de aditivos especiais presente em sua fórmula contribuem para suas principais propriedades, como resistência ao desgaste e corrosão em altas e baixas temperaturas.

Esta graxa foi desenvolvida para lubrificar os rolamentos de turbinas eólicas já com a estratégia de atender o uso prolongado em altas temperaturas. Suas principais características estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características da graxa Mobil SHC Grease 460 WT.

Propriedades

Cor	Vermelho
Viscosidade (40 °C)	460 (cSt)
Ponto de gota (ASTM D2265)	255 (°C)
Penetração trabalhada (25 °C)	305 (mm)
Prevenção de corrosão (ASTM D1743)	Aprovado
Lavagem por água (ASTM D1264, perda)	10 (% p/v)

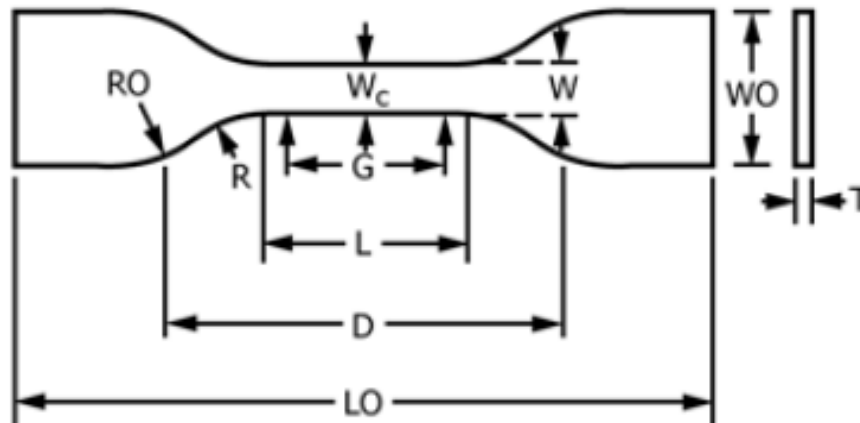
Fonte: Adaptado de datasheet Mobil® (2021).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas com o intuito de realizar análises comparativas entre os polímeros a fim de selecionar o mais adequado para substituição, e observar as possíveis interações da graxa utilizada nos rolamentos do aerogerador com os polímeros em questão. Os corpos-de-prova (Figura 12) foram fabricados pelo processo de injeção pela empresa “A”, com dimensões conforme norma ASTM D638-14 (2017). Deste modo, todos os corpos-de-prova seguiram as especificações relacionadas ao Tipo IV, apresentados na Tabela 8.

Figura 12 – Desenho esquemático dos corpos-de-prova poliméricos Tipo IV.



Fonte: Adaptado de ASTM D638-14 (2017).

Tabela 8 – Dimensões das amostras para espessura T por mm (in).

Dimensões	4 (0,16) ou menor
	Tipo IV
W – Largura da seção estreita	6 (0,25)
L – Comprimento da seção estreita	33 (1,30)
WO – Largura total	19 (0,75)
LO – Comprimento total	115 (4,5)
G – Comprimento padrão	25 (1,00)
D – Distância entre as garras	65 (2,5)
R – Raio do filete	14 (0,56)
RO – Raio externo	25 (1,00)

Fonte: Adaptado de ASTM D638-14 (2017).

Os corpos-de-prova foram divididos em 3 grupos onde cada grupo é um tipo de polímero e estes foram denominados como G1, G2 e G3. Os grupos foram divididos em: Grupo 1: ABS; Grupo 2: PP; Grupo 3: PA 6,6. Para cada grupo citado foram utilizados 10 corpos-de-prova, e a partir disso, foram divididos em diferentes condições. Para que fosse possível observar a influência da graxa nos polímeros, cada grupo foi separado em 2 principais subgrupos: corpos de prova brancos, ou seja, sem graxa, e corpos de prova com graxa. Neste último, os CP foram pincelados com a graxa Mobil SHC Grease 460 WT como pode ser observado na Figura 13.

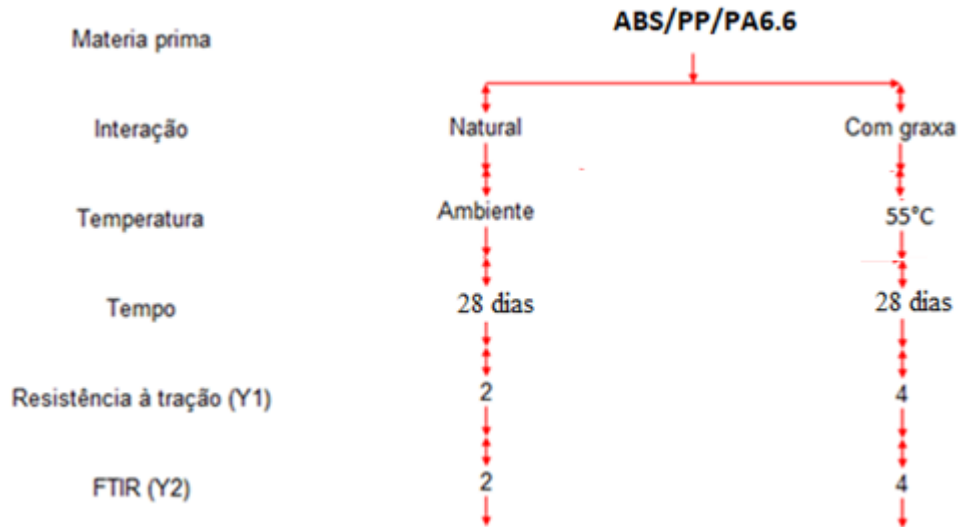
Figura 13 – Corpos-de-prova com graxa antes do processo de envelhecimento.



Fonte: A autora (2022).

No subgrupo das amostras brancas, os CP foram mantidos em temperatura ambiente por 28 dias. No subgrupo das amostras com graxa, os CP foram deixados na estufa à 55°C por 28 dias para fins comparativos. A divisão dos corpos de prova pode ser observada na árvore esquemática da Figura 14 e a nomenclatura dada as amostras estão apresentadas na Tabela 9.

Figura 14 – Fluxograma do procedimento experimental proposto.



Fonte: A autora (2022).

Tabela 9 – Nomenclatura das amostras de acordo com as condições a que foram submetidas.

Amostra	Condição
AB	Natural/branca à temperatura ambiente
GE	Com graxa envelhecida em estufa por 28 dias

Fonte: A autora (2022).

3.2.2 Envelhecimento

Optou-se pela investigação de possíveis interações entre a graxa e os polímeros através da submissão das amostras a uma condição de envelhecimento. Algumas amostras foram mantidas em temperatura ambiente por 28 dias conforme descrito anteriormente. Com o intuito de simular o envelhecimento dos polímeros, utilizou-se a metodologia de envelhecimento acelerado mantendo algumas amostras em estufa 28 dias a 55°C e protegidos de luz. O tempo de permanência das amostras na estufa de 28 dias é comumente utilizado na empresa para análises de envelhecimento de polímeros, visto que, é um período suficiente para simulações e obtenção de resultados, portanto, optou-se por seguir este parâmetro. Após os 28 dias, os CP das condições brancos e envelhecidos foram ensaiados para análise comparativa das propriedades.

3.2.3 Caracterização

3.2.3.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Todas as amostras em estudo foram caracterizadas visando a análise comparativa através da observação das estruturas moleculares dos polímeros. A metodologia adotada para a caracterização dos polímeros foi a Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) na faixa de comprimento de onda de 4000 a 650 cm^{-1} , com 4 escaneamentos, no espectrômetro do modelo PerkinElmer Frontier. As amostras foram limpadadas com uma solução de álcool etílico 99% e para realização do ensaio foram posicionadas no equipamento sobre o cristal detector e pressionadas pelo dispositivo fixador até seu correto posicionamento, e então utilizou-se o software para obtenção dos dados.

3.2.4 Comportamento mecânico

3.2.4.1 Ensaio de resistência à tração

Os ensaios de resistência à tração foram realizados na máquina da marca INSTRON, modelo Emic DL3000 do laboratório de pesquisa e desenvolvimento da empresa WEG S.A. A finalidade deste ensaio foi analisar o comportamento mecânico das amostras para análise comparativa. O mesmo foi realizado em duas etapas, a primeira parte dos ensaios foram realizados nos CP submetidos a temperatura ambiente com e sem graxa por 28 dias e a segunda parte foi realizada nos CP restantes, aqueles que sofreram envelhecimento por 28 dias em estufa com e sem graxa.

Foram realizados ensaios de tração com 5 corpos de prova para cada condição e utilizou-se a melhor curva de cada caso para meios comparativos. Para cada grupo de polímero foi utilizada uma velocidade, conforme pré-definido: Grupo 1 (ABS), 5 mm/min; Grupo 2 (PP), 50 mm/min; Grupo 3 (PA6,6) 5 mm/min. Foram utilizadas velocidades diferentes de ensaio devido aos diferentes comportamentos dos polímeros, como no caso do PP, optou-se por um ensaio mais acelerado por ser um polímero mais dúctil que leva mais tempo na deformação elástica até o momento da ruptura. Além disso, o cálculo para determinação da resistência à tração foi obtido a partir da Equação 1.

$$\sigma = F/A \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

σ = Tensão (MPa);

F = Força máxima (N);

A = Área da seção transversal do corpo-de-prova (mm²).

3.2.5 Análise Econômica

O objetivo principal da substituição do componente em estudo, o suporte e a tampa, é a redução de custo desses componentes, e conseqüentemente, proporcionando a redução do custo total do aerogerador. Para analisar qual dos polímeros seria mais indicado para a substituição, foi realizada a cotação dos 3 polímeros com o fornecedor A. A partir da proposta do fornecedor, utilizou-se uma tabela comparativa para avaliação. Foi realizado o cálculo para verificar o futuro *saving* anual que este estudo traria.

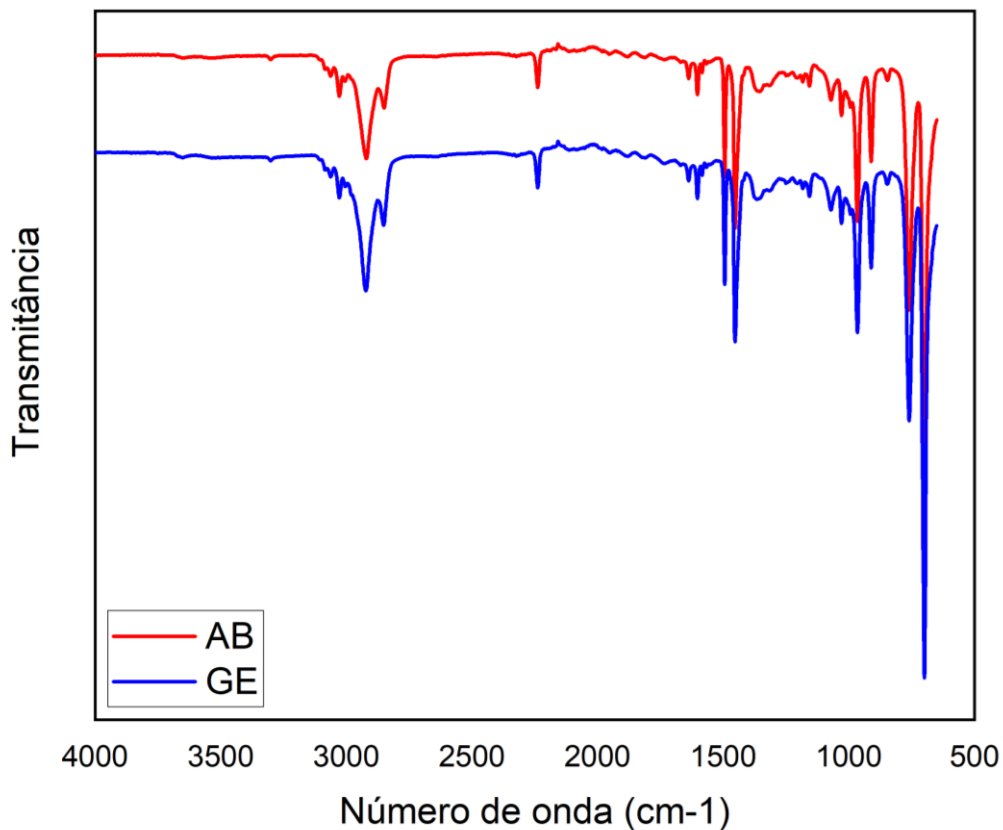
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 POLÍMERO ABS

4.1.1 Caracterização por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

As caracterizações por FTIR são realizadas com o intuito de avaliar a estrutura dos polímeros a partir da identificação de grupos funcionais e dos perfis de curva. Os dados referentes às bandas de absorção pelo método FTIR realizados nas amostras AB e GE, são observados na Figura 15. Ao analisar as bandas de ambas amostras se observaram ligações Carbono-Hidrogênio (C-H e H-C-H) na região entre 3027 a 2849 cm^{-1} na condição natural (AB) e na região entre 3027 a 2851 cm^{-1} na condição envelhecida com graxa (GE). Outra banda característica do ABS é em 2238 cm^{-1} observado nas duas condições, sendo este oriundo de ligação C-N ($\text{C}\equiv\text{N}$) do grupo nitrila. Entre as bandas de 1494 e 699 cm^{-1} também podem ser observados estiramentos de C-C e C-H em ambas amostras (CHARLES; RAMKUMAAR, 2009).

Figura 15 – Ensaio de FTIR para as condições AB e GE.



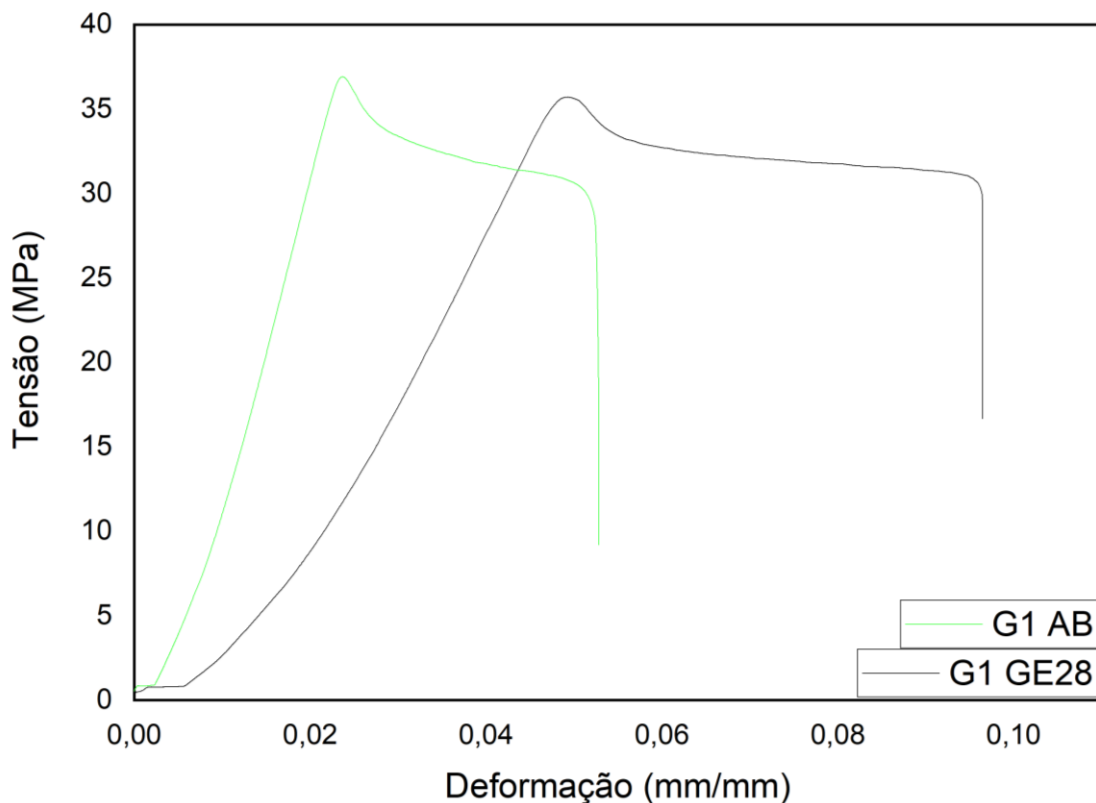
Fonte: A autora (2022).

As bandas tiveram valores muito aproximados ou iguais, o que nos leva a entender que a graxa não interagiu com o ABS após o envelhecimento. Os números de ondas referentes aos grupos funcionais presentes no polímero em estudo e o aspecto das curvas das duas amostras não apresentaram diferenças. Este fenômeno pode ter ocorrido visto que a graxa em estudo apresenta uma estrutura de hidrocarbonetos e um metal alcalino, no caso o lítio. Ou seja, como o ABS é resistente à metais alcalinos e a presença da acrilonitrila proporciona resistência à hidrocarbonetos, não houve interação.

4.1.2 Resistência à tração

A fim de avaliar possíveis interações entre a graxa e o polímero ABS realizou-se também ensaio de resistência à tração nas amostras AB e GE. A Figura 16 apresenta o comportamento da tensão em função da deformação de cada amostra.

Figura 16 – Tensão *versus* deformação para a condição AB e GE.



Fonte: A autora (2022).

De acordo com os resultados, as amostras da condição AB apresentaram uma média de tensão de escoamento de $36 \pm 0,4$ MPa e as amostras da condição GE apresentaram uma

média de $35 \pm 0,2$ MPa. Os valores da tensão máxima no escoamento das duas condições são próximos e quando atingem aproximadamente 35 MPa, inicia-se a deformação plástica. O valor do módulo de elasticidade para a amostra AB foi de 1018 ± 12 MPa e para a amostra GE foi de 1012 ± 4 MPa, os valores foram próximos, o que indica que não houve alteração na rigidez do material, e para ambas as condições o comportamento de resistência à tração foram semelhantes. Contudo, observou-se que não houve influência da graxa sobre o ABS, visto que as amostras apresentaram comportamento mecânico similar. O que poderia ser esperado é que a presença da graxa durante o envelhecimento proporcionaria degradação do material, caso sua composição de hidrocarbonetos reagisse com o ABS, resultando em um módulo elástico menor, ou seja, seria necessária uma energia menor para causar deformações nos ângulos e nas ligações dos átomos, visto que a rigidez do material teria sido reduzida. Os dados obtidos no ensaio podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades mecânicas para condição AB e GE.

Condição	σ (MPa)	ϵ (mm)	E (MPa)
AB	$36 \pm 0,4$	$0,12 \pm 0,03$	1018 ± 12
GE	$35 \pm 0,2$	$0,15 \pm 0,05$	1012 ± 4

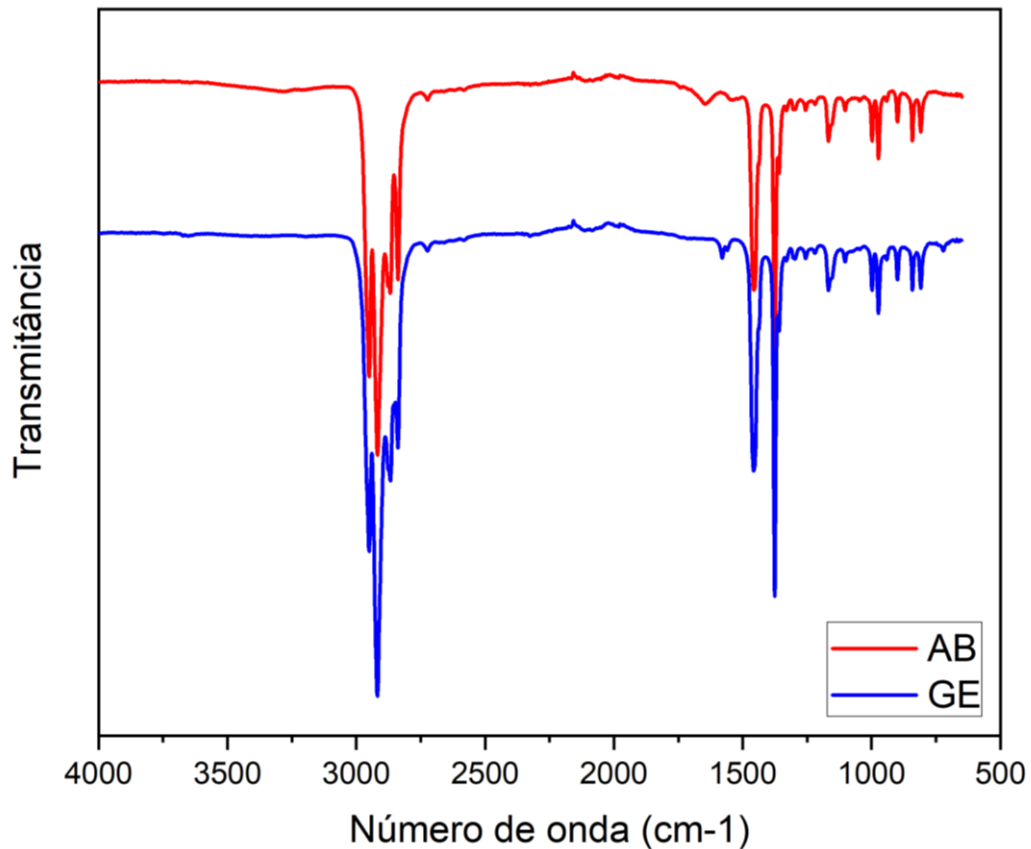
Fonte: A autora (2022).

4.2 POLÍMERO PP

4.2.1 Caracterização por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

Para os ensaios de FTIR do PP foram utilizadas 2 amostras, o polímero natural branco em temperatura ambiente AB e o polímero envelhecido com graxa GE como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Ensaio de FTIR das amostras AB e GE.



Fonte: A autora (2022).

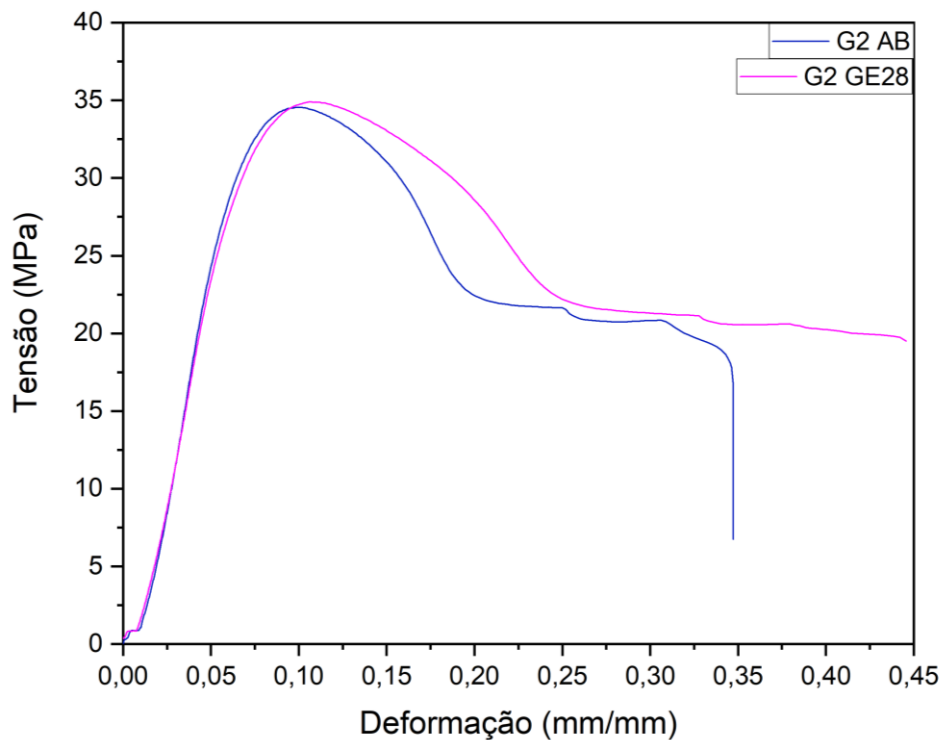
Ao analisar as bandas de ambas as amostras se observaram ligações características de Carbono-Hidrogênio (CH) nas bandas 1167 e 841 cm^{-1} . Os comprimentos de onda 1167 e 841 cm^{-1} observados novamente em ambas as amostras, representam ligações do grupo CH_2 . Há a presença das ligações CH_3 através das bandas 2950, 2917, 1456 e 1376 cm^{-1} encontrados na amostra AB. Bandas com comprimentos de onda aproximados ao da amostra AB foram encontrados na amostra GE, como por exemplo, as bandas 2918, 1457 e 1367 cm^{-1} , também característicos de estiramentos CH_3 (ANDREASSEN, 1999).

Considerando a possível interação do polímero com a graxa, não foram observadas alterações no aspecto das curvas e dos comprimentos de onda característicos do PP após as amostras serem submetidas ao envelhecimento com graxa. Para este polímero em questão, poderia esperar-se que houvesse interação devido a possível afinidade das composições do PP e da graxa, ambos compostos por hidrocarbonetos.

4.2.2 Resistência à tração

Da mesma forma que foi realizado para o ABS, o objetivo desta análise também foi a avaliação de possíveis interações entre a graxa e o polímero PP. A Figura 18 apresenta o comportamento da tensão em função da deformação para as amostras AB e GE.

Figura 18 - Tensão *versus* deformação para a condição AB e GE.



Fonte: A autora (2022).

Os dados obtidos indicam que para a tensão máxima no escoamento, a condição AB apresentou uma média de $34 \pm 0,3$ MPa e a condição GE apresentou uma média de $34 \pm 0,1$ MPa. Os valores da tensão máxima no escoamento foram praticamente os mesmos para ambos os casos, indicando que estes entraram no regime plástico a partir de aproximadamente 34 MPa de tensão e seus comportamentos na região elástica são similares. O valor do módulo de elasticidade para a condição AB foi de 576 ± 30 MPa e para a condição GE foi de 534 ± 23 Mpa. Os valores obtidos foram próximos, porém neste último caso, o valor menor pode indicar uma diminuição na rigidez do material, o que torna o material mais flexível. Este fenômeno pode ter ocorrido devido a graxa ser composta por hidrocarbonetos que se identificam com o PP e possivelmente pode ter ocorrido uma baixa migração da graxa para dentro do PP.

Possivelmente, o resultado desse fenômeno pode ter sido um efeito de plastificação tornando o material mais flexível. Os dados obtidos no ensaio podem ser observados na Tabela

11. Portanto, observou-se interação da graxa sobre o PP, já que a rigidez do polímero diminuiu, levando a uma perda na resistência mecânica.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas para condição AB e GE.

Condição	σ (MPa)	ϵ (mm)	E (MPa)
AB	$34 \pm 0,3$	$1,25 \pm 0,28$	576 ± 30
GE	$34 \pm 0,1$	$0,46 \pm 0,18$	534 ± 23

Fonte: A autora (2022).

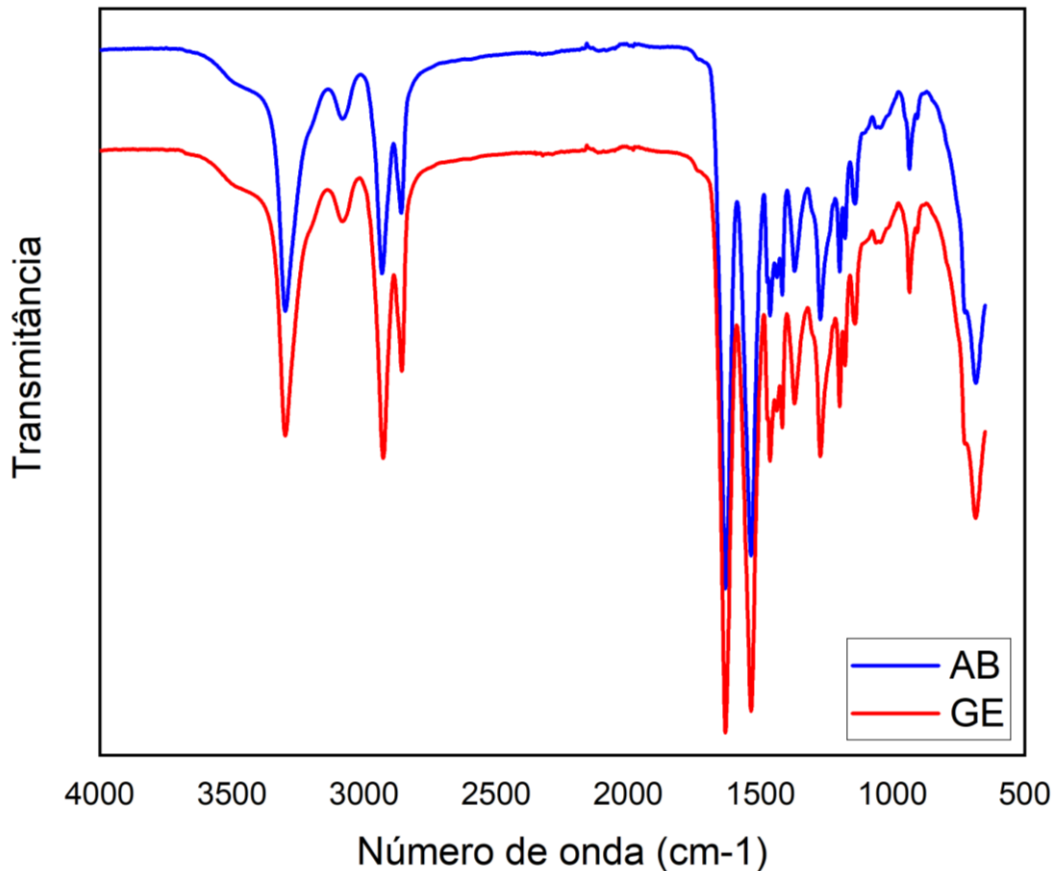
4.3 POLÍMERO PA 6,6

4.3.1 Caracterização por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

Os resultados obtidos nos ensaios de FTIR realizados nas amostras AB e GE, podem ser observados na Figura 19. Foram identificadas ligações nitrogênio-hidrogênio (N-H) no comprimento de onda 3299 cm^{-1} para a amostra branca e 3297 cm^{-1} para a envelhecida, e presença do grupo amida no comprimento 1632 e 1535 cm^{-1} nas duas amostras. Outras bandas observadas nas curvas se referem a estiramentos de C-C e C-H como os comprimentos de onda 3081 , 2925 , 2855 , 935 e 684 cm^{-1} .

Novamente, considerando a possível interação do polímero com a graxa, assim como, para o ABS e PP, não foram observadas alterações no aspecto das curvas e dos comprimentos de onda característicos do PA 6,6 após as amostras serem submetidas ao envelhecimento com graxa. Notou-se que os hidrocarbonetos presentes na graxa não interagiram com a PA6,6.

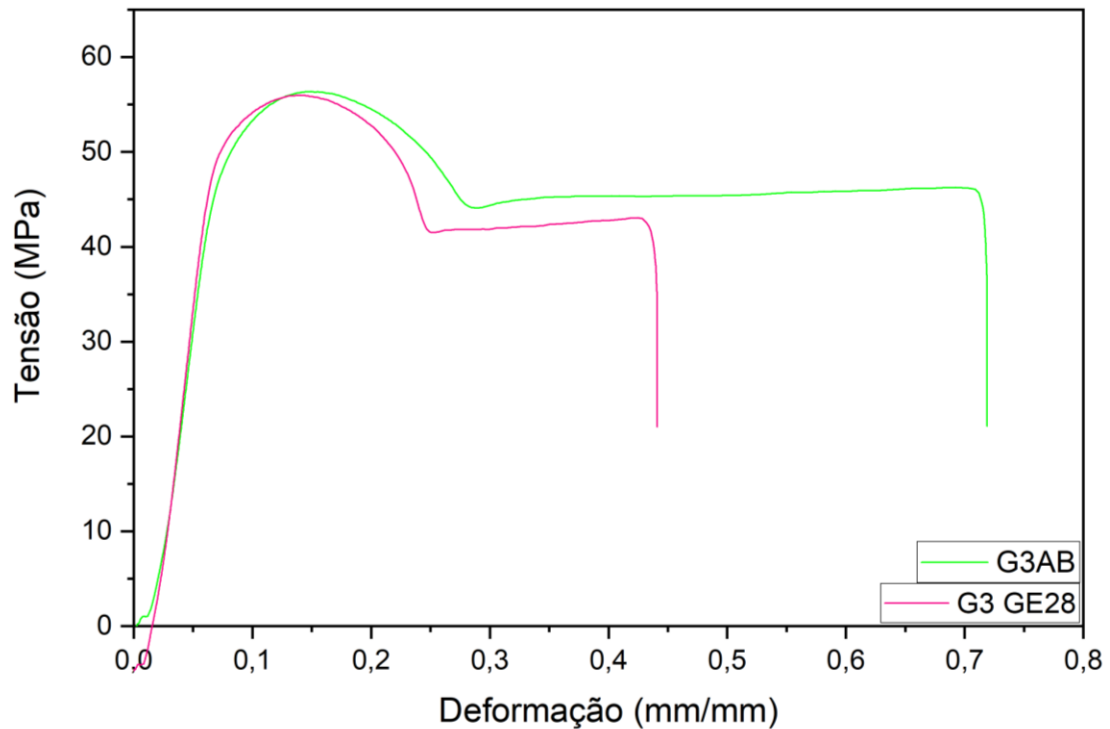
Figura 19 – Ensaio de FTIR para as amostras AB e GE.



Fonte: A autora (2022).

4.3.2 Resistência à tração

A Figura 20 apresenta o comportamento da tensão em função da deformação para as amostras AB e GE. Os resultados obtidos indicam um aumento da tensão no escoamento, sendo uma média de $56 \pm 0,6$ MPa para a primeira condição, e um valor médio de $60 \pm 0,6$ MPa para a segunda condição. O que indica que após o envelhecimento com presença de graxa, o material se tornou mais rígido, portanto, o material necessita de maior força para deformar quando comparado à condição AB, em que o material não teve contato com graxa e esteve em temperatura ambiente por todo tempo. Outro ponto a ser observado é a deformação, em que na amostra AB foi observado um valor médio de $0,64 \pm 0,1$ mm e na amostra GE foi observado um valor médio de $0,39 \pm 0,1$ mm. Essa diminuição no valor da deformação, pode indicar algum efeito de degradação térmica ou efeito de umidade na estufa. Os dados obtidos podem ser observados na Tabela 12.

Figura 20 – Tensão *versus* deformação para a condição AB e GE.

Fonte: A autora (2022).

Desta forma, observou-se influência da graxa sobre a PA 6.6, visto que os valores de resistência mecânica se alteraram quando comparados. O polímero envelhecido com graxa se apresentou mais rígido e com possíveis efeitos de degradação térmica.

Tabela 12 - Propriedades mecânicas para condições AB e GE.

Condição	σ (MPa)	ϵ (mm)	E (MPa)
AB	$56 \pm 0,6$	$0,64 \pm 0,1$	1006 ± 18
GE	$60 \pm 0,6$	$0,39 \pm 0,1$	1094 ± 18

Fonte: A autora (2022).

4.4 ANÁLISE ECONÔMICA

A fim de realizar a seleção do polímero mais indicado para a substituição na aplicação, elaborou-se uma tabela para comparar o custo dos materiais em estudo. Realizaram-se cotações com um fornecedor para obter o preço por peça de cada polímero, o comparativo está apresentado por porcentagem em relação ao preço por peça do fornecedor atual como mostra a Tabela 13.

Ao comparar os valores, o PP foi o que apresentou a maior redução de custo em relação ao material utilizado atualmente, o aço carbono pintado. O principal objetivo dessa proposta é encontrar o polímero que proporcione a maior redução de custo, porém neste caso, o PP apresentou pequenas alterações em suas propriedades quando submetido ao envelhecimento com graxa. Visto que a aplicação pode atingir uma temperatura de até 50°C e existe um contato do material com a graxa, os materiais em análise devem obrigatoriamente atender a estas condições, e como o PP apresentou pequenas alterações em seu comportamento mecânico, mesmo que baixos, descarta-se a utilização do mesmo para a aplicação.

Tabela 13 – Comparativo de cotações de polímeros.

SUPORTE TAMPA AGW						
Descrição	UN	Consumo anual	Fornecedor	Fornecedor	Fornecedor	Fornecedor
			atual	A ABS injetado	A PP	A PA 6,6
			Preço líquido			
Suporte e tampa	UN	720	100%	4,30%	2,60%	7,20%
Tampa	UN	720	100%	14%	7,10%	26%
		Total anual	100%	5,40%	3,34%	9,57%
		Economia		94,60%	96,60%	90,40%

Fonte: A autora (2021).

5 CONCLUSÃO

A competitividade do mercado nos dias de hoje exige a busca constante por inovações tecnológicas e melhorias contínuas. Alternativas que proporcionem melhor desempenho na produtividade e menor custo são essenciais para a competitividade da indústria. A engenharia de materiais, pesquisa e desenvolvimento científico são responsáveis pelo avanço dessas tecnologias. Uma das metodologias mais utilizadas para aprimorar um produto é a utilização de componentes alternativos. No presente trabalho foram analisados três materiais poliméricos diferentes como alternativa para substituição de metais utilizados para a confecção de suporte e tampa de aerogeradores.

Visto que a aplicação pode atingir uma temperatura de até 50 °C e existe um contato do material com a graxa, os materiais em análise devem obrigatoriamente atender a estas condições, e como o PP apresentou pequenas alterações em seu comportamento mecânico, mesmo que baixos, descarta-se a utilização do mesmo para a aplicação.

Comparando o ABS e a PA6.6, observou-se influência da graxa sobre a PA 6.6, visto que os valores de resistência mecânica se alteraram quando comparados. O polímero envelhecido com graxa se apresentou mais rígido e com possíveis efeitos de degradação térmica.

Já o ABS atendeu a temperatura de operação do aerogerador, não apresentou alteração significativa em seu comportamento mecânico e estrutural quando submetido ao envelhecimento com graxa.

Levando em consideração todos os aspectos analisados e comparando o custo dos polímeros candidatos finais, a opção mais indicada para a substituição é o ABS que proporcionaria uma economia de 94,6% anual à empresa em relação gasto atual.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para validar os estudos em questão na prática é sugerido a fabricação do protótipo em ABS considerando o dimensional e a metodologia do processamento. Após a validação do dimensional, o protótipo deverá ser montado e fixado no eixo com a cola adequada da aplicação, e então, deverá ser analisado se o material resiste ao torque exercido ao parafusar.

REFERÊNCIAS

- ASTM. **ASTM D128-98: Standard Test Methods for Analysis of Lubricating Grease**, 2019.
- AHMED, N. A.; CAMERON, M. The challenges and possible solutions of horizontal axis wind turbines as a clean energy solution for the future. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 439–460, out. 2014.
- ANDREASSEN, E. Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene. In: *Polypropylene: An A-Z Reference* [s.l.: s.n.]. p. 320–328.
- ANTUNES, S. A. **Desenvolvimento de graxas lubrificantes a partir de óleos provenientes do farelo de arroz (*Oryza sativa* L.)**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- BRECHET, Y.; EMBURY, J. D. Architected materials: Expanding materials space. **Scripta Materialia**, v. 68, n. 1, p. 1–3, jan. 2013.
- CHARLES, J.; RAMKUMAAR, G. R.; FTIR and thermal studies on polyethylene terephthalate and acrylonitrile butadiene styrene. **Asian Journal of Chemistry**, v. 21, n. 6, p. 4389-4398, 2009.
- CALEGARI, E. P.; OLIVEIRIA, B. F. Aspectos que influenciam a seleção de materiais no processo de design. **Arcos Design**, v. 8, n. 1, p. 1–19, 2014.
- CARRAHER JR., C. E. **Introduction to Polymer Chemistry**. [s.l.] CRC Press, 2017.
- PICOLO, A. P.; RÜHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 01–13, dez. 2014.
- CAVALCANTI, E. J. C.; MORA, N. D.; SERRA, T. Z. **Estudo do desempenho do óleo lubrificante em pontos diferentes da turbina**. 2007.
- CHEMVIEWWS. How Wind Turbines Work. **ChemViews**, 2012.
- CHOU, J.-S. et al. Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads. **Engineering Failure Analysis**, v. 27, p. 99–118, jan. 2013.
- COOK, J. G. POLYOLEFIN FIBRES. In: **Handbook of Textile Fibres**. [s.l.] Elsevier, 2001. p. 536–609.
- CORREIA, V. H. L. **Análise aerodinâmica da turbina eólica NTK 500/41 via CFD**. [s.l.] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, 2019.
- COX, K.; ECHTERMEYER, A. Structural Design and Analysis of a 10MW Wind Turbine Blade. **Energy Procedia**, v. 24, p. 194–201, 2012.
- CRANGLE, A. Types of polyolefin fibres. In: **Polyolefin Fibres**. [s.l.] Elsevier, 2009. p. 3–34.

- DEOPURA, B. L.; PADAKI, N. V. Synthetic Textile Fibres. In: **Textiles and Fashion**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 97–114.
- DONAHUE, C. J. Lubricating Grease: A Chemical Primer. **Journal of Chemical Education**, v. 83, n. 6, p. 862, 1 jun. 2006.
- DU, Y. et al. Damage detection techniques for wind turbine blades: A review. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 141, p. 106445, jul. 2020.
- ENERGY, U. S. D. OF. **20% wind energy by 2030**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41869.pdf>>.
- ENEVOLDSEN, P.; XYDIS, G. Examining the trends of 35 years growth of key wind turbine components. **Energy for Sustainable Development**, v. 50, p. 18–26, jun. 2019.
- FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Eólica**. 2. ed. Barueri: Manole, 2011. RIGOLIN, G. F. **Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal**. [s.l.] UNICESUMAR, 2021.
- GOW, G. Lubricating grease. In: **Chemistry and Technology of Lubricants**. Boston, MA: Springer US, 1992. p. 255–268.
- HART, K. R.; WETZEL, E. D. Fracture behavior of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS) materials. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 177, p. 1–13, maio 2017.
- IEA. **Global energy and CO2 status report 2017**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf>>.
- IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing. **Anais...IEEE**, out. 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7363084/>>.
- INRS. **Poly(acrylonitrile/butadiène/styrène) ABS**. Disponível em: <https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques/polymere.html?refINRS=PLASTIQUES_polymere_4>. Acesso em: 6 fev. 2022.
- KUMAR, R.; RAAHEMIFAR, K.; FUNG, A. S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 281–291, jun. 2018.
- KUMAR, R.; RAAHEMIFAR, K.; FUNG, A. S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 281–291, jun. 2018.
- LACERDA, G. R.; SILVA, V. A. D. **Monitoramento de graxas lubrificantes em condições críticas de temperatura: IX COEN - Congresso de Engenharias da UFSJ**. [s.l.: s.n.].
- LEE et al. Determining the Optimized Hub Height of Wind Turbine Using the Wind Resource Map of South Korea. **Energies**, v. 12, n. 15, p. 2949, 31 jul. 2019.

- LIU, W. Y. et al. The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 466–472, abr. 2015.
- MADDAH, H. A. Polypropylene as a promising plastic: a review. **American Journal of Polymer Science**, v. 6, n. 11, p. 1–11, 2016.
- MANISH et al. A Review on testing methods of recycled Acrylonitrile Butadiene-Styrene. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 14, p. 28296–28304, 2018.
- MARTÍN-ALFONSO, J. E. et al. Influence of soap/polymer concentration ratio on the rheological properties of lithium lubricating greases modified with virgin LDPE. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 15, n. 5, p. 687–693, set. 2009.
- MATHER, R. R. The structure of polyolefin fibres. In: **Handbook of Textile Fibre Structure**. [s.l.] Elsevier, 2009. p. 276–304.
- MCKEEN, L. W. Polyamides (Nylons). In: **The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 185–222.
- MILIONIS, A. et al. Analysis of wear abrasion resistance of superhydrophobic acrylonitrile butadiene styrene rubber (ABS) nanocomposites. **Chemical Engineering Journal**, v. 281, p. 730–738, dez. 2015.
- MOORE, J. . Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) - a review. **Composites**, v. 4, n. 3, p. 118–130, maio 1973.
- OLIVERA, S. et al. Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. **Journal of Materials Science**, v. 51, n. 8, p. 3657–3674, 4 abr. 2016.
- PARIS, F. A. **Análise em CFD do escoamento de ar sobre as pás de uma turbina eólica de eixo horizontal**. [s.l.] Universidade Federal da Fronteira Sul, 2020.
- PAVIANATTO, E. F. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- PESTANA, D. A. C. **Sistemas estruturais para torres eólicas**. [s.l.] Universidade da Madeira, 2016.
- PETERSON, A. M. Review of acrylonitrile butadiene styrene in fused filament fabrication: A plastics engineering-focused perspective. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 363–371, maio 2019.
- PORTÉ-AGEL, F.; BASTANKHAH, M.; SHAMSODDIN, S. Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 174, n. 1, p. 1–59, 20 jan. 2020.
- POUZADA, A. S. Selection of thermoplastics. In: **Design and Manufacturing of Plastics Products**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 87–140.

RATÃO, N. T. **Graxa de poliuréia - estudo da compatibilidade da poliuréia, polialfaolefina e politetrafluoretileno irradiado para melhoria da lubricidade e estabilidade.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2013.

ROBERT, J. P. . et al. How to Evaluate the Compatibility of Thermoplastic Materials with Lubricants. **Journal of Materials and Manufacturing**, v. 3, p. 523–530, 2010.

SCHUBEL, P. J.; CROSSLEY, R. J. Wind Turbine Blade Design. **Energies**, v. 5, n. 9, p. 3425–3449, 6 set. 2012.

SECCO, E. L. et al. **A Neural Network Clamping Force Model for Bolt Tightening of Wind Turbine Hubs.** 2015.

SHEN, M. et al. Fretting wear behavior of acrylonitrile–butadiene rubber (NBR) for mechanical seal applications. **Tribology International**, v. 93, p. 419–428, jan. 2016.

HUYSMAN, S. et al. The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 101, p. 53–60, ago. 2015.

SHUBHRA, Q. T.; ALAM, A.; QUAIYYUM, M. Mechanical properties of polypropylene composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 26, n. 3, p. 362–391, 12 abr. 2013.

STETCO, A. et al. Machine learning methods for wind turbine condition monitoring: A review. **Renewable Energy**, v. 133, p. 620–635, abr. 2019.

VASANTHAN, N. Polyamide fiber formation: structure, properties and characterization. In: **Handbook of Textile Fibre Structure.** [s.l.] Elsevier, 2009. p. 232–256.

VEERS, P. S. et al. Trends in the Design, Manufacture and Evaluation of Wind Turbine Blades. **Wind Energy**, v. 6, n. 3, p. 245–259, jul. 2003.

VERDUM, V. **Projeto de aerogerador com segurança inerente para aplicação urbana.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

VITTORINO, C. R. S. **Modelagem dinâmica de caixa multiplicadora de velocidades de aerogeradores.** [s.l.] Universidade de Brasília, 2012.

WAGNER, H.-J. Introduction to wind energy systems. **EPJ Web of Conferences**, v. 189, p. 00005, 2 out. 2018.

WANG, W. Introductory Chapter: Polypropylene - Synthesis and Functionalization. In: **Polypropylene - Polymerization and Characterization of Mechanical and Thermal Properties.** [s.l.] IntechOpen, 2020.

YANG, R.; HE, Y.; ZHANG, H. Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1225–1250, jul. 2016.

ROBERT, J. P.; NEUMANN, P.; OLSA, J.; BARTOLOME, J.; “How to Evaluate the Compatibility of Thermoplastic Materials with Lubricants.” **SAE International Journal of Materials and Manufacturing** 3, no. 1 (2010): 523–30.