

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
COORDENADORIA ESPECIAL DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Cláudio Luís Moretto Júnior

**Caracterização e comparação de propriedades entre compósitos de Polipropileno e
Poliamida 6 contendo fibra de vidro utilizadas em coroas de bicicletas infantis**

Blumenau

2022

Cláudio Luís Moretto Júnior

Caraterização e comparação de propriedades entre compósitos de Polipropileno e Poliamida 6 contendo fibra de vidro utilizadas em coroas de bicicletas infantis

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Coordenadoria Especial de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro 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.

Moretto Junior, Claudio Luis

Caraterização e comparação de propriedades entre compósitos de Polipropileno e Poliamida 6 contendo fibra de vidro utilizadas em coroas de bicicletas infantis. / Claudio Luis Moretto Junior ; orientador, Johnny de Nardi Martins , 2022.

65 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. Polipropileno. 3. Poliamida 6. 4. Fibra de Vidro Curta. 5. Compósitos. I. , Johnny de Nardi Martins. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

Cláudio Luís Moretto Júnior

Caraterização e comparação de propriedades entre compósitos de Polipropileno e Poliamida 6 contendo fibra de vidro utilizadas em coroas de bicicletas infantis

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 – Campus Blumenau.

Blumenau, 30 de novembro de 2022.

Cláudio Luís Moretto Júnior
Acadêmico

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Johnny De Nardi Martins
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. (a) Dr. (a) Claudia Merlini
Avaliador (a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Márcio Roberto da Rocha
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos amigos feitos durante a graduação e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer muito a minha família, meus pais e principalmente minha esposa Sandra, meus filhos Mateus e Maria Luísa pelo amor e por compartilharmos os sonhos. Eles sempre acreditaram em mim e no meu potencial. Sem as renúncias deles está graduação jamais seria possível.

Agradecimento muito especial a todos os amigos que fiz durante a jornada. Foram todos muito importantes em maior ou menor grau, dando conselhos e apoio emocional. Acredito que as amizades feitas são tão importantes quanto os conhecimentos recebidos, mas, os conhecimentos se renovam, as amizades permanecem.

Quero agradecer a Professora Dra. Claudia Merlini, que acreditou no meu potencial e me permitiu trabalhar na coordenação de estágios do curso. Também quero agradecer muito a Professora Dra. Lara Fernandes dos Santos Lavelli, que no momento em que mais precisava estendeu a mão e teve empatia com uma pessoa em dificuldades. Além destes, agradecer ao esforço e ajuda do meu orientador Professor Dr. Johnny De Nardi Martins

Também agradecer ao técnico de laboratório Daniel Fonseca da Cunha pelo auxílio na realização dos ensaios.

Gostaria também de registrar o apoio recebido Núcleo de Assistência Estudantil do campus de Blumenau, que sempre estiverem dispostos a auxiliar nos problemas.

Um agradecimento muitíssimo que especial a Nathor Indústria e Comércio de Bicycletas. A empresa abriu suas portas para mim como estagiário e depois acreditou que eu poderia auxiliar a empresa a alcançar seus objetivos com minha efetivação.

“Depois de nós haverá antes.”

Till Lindemann

RESUMO

As bicicletas têm evoluído desde o século XIX por diversos motivos e necessidades. Vários componentes de uma bicicleta que podem ser construídos com uso de materiais compósitos como selim, manoplas, pneu, guidão, garfo dianteiro, quadro e a coroa. As coroas são parte fundamental do conjunto do movimento central, que é responsável por transformar o movimento do ciclista em movimento do veículo. Este componente é de extrema importância no funcionamento da bicicleta. Falhas ocorridas neste componente podem levar a impossibilidade de uso do equipamento ou, em casos excepcionais, acidentes com perdas materiais ou da saúde do usuário. Na industrialmente da manufatura há a necessidade de se manter a competitividade, reduzindo custos e aumentando a rentabilidade. Para tanto são utilizados processos mais eficientes ou a substituição de materiais sem perda de propriedades mecânicas ou desempenho. Em materiais compósitos as propriedades são alteradas pela incorporação de uma fase dispersa ou reforço. A incorporação da fase dispersa se traduz em uma vantagem para os compósitos de matriz polimérica, uma vez que o tempo e o custo para desenvolvimento de um novo polímero são muito maiores. Uma das classes mais importantes de reforço são os materiais fibrosos. As fibras podem ter diversas características que definem a forma como vai influenciar a matriz. Entre essas características há o comprimento, forma, orientação, composição, arranjo umas entre as outras, concentração e distribuição. A fibra de vidro é o material fibroso mais comum e o que vem sendo utilizado há mais tempo. Entre os diversos compósitos de matriz polimérica destaca-se o Polipropileno reforçado com Fibra (PP FV) de Vidro e a Poliamida 6 reforçada com Fibra de Vidro (PA FV). Estes materiais são utilizados em diversas aplicações de alto desempenho técnico, principalmente no setor automotivo. O PP FV em comparação com a PA FV tem menor custo, com boa resistência à tração e ao impacto sendo um ótimo candidato a substituir o PA FV. Este trabalho de conclusão de curso visa avaliar e verificar a possibilidade da substituição do polipropileno com 30% em massa de fibras de vidro curta como substituto para a poliamida 6 com 30% em massa de fibras de vidro curta. Atualmente a PA 6 com fibra de vidro é utilizada para produção de coroa em bicicletas infantis. Para alcance dos objetivos foi realizada extensa pesquisa bibliográfica, buscando sustentação teórica para substituição. Após esta etapa foram realizados ensaios de resistência à tração e dureza para caracterizar e comparar as propriedades mecânicas dos dois tipos de compósitos. Apresentamos os resultados obtidos, comparando as propriedades de tração (módulo e resistência à tração) e dureza dos dois materiais. Foi apresentada uma simulação indicando o uso do ponto de vista econômico, mostrando que a viabilidade econômica da troca tem potencial de economia na faixa de 35%. A produção dos corpos de prova por moldagem por compressão não se mostrou eficiente e os resultados dos ensaios não foram conclusivos. A pesquisa bibliográfica revelou diversos casos onde a substituição foi indicada. A pesquisa bibliográfica também apresentou diversos benefícios secundários na substituição de um material pelo outro. Mais avaliações podem ser realizadas, principalmente em situação de serviço para avaliar a substituição.

Palavras-chave: Compósitos. Polipropileno. Poliamida. Fibra de Vidro.

ABSTRACT

Bicycles have evolved since the 19th century for a variety of reasons and needs. Several components of a bicycle that can be built using composite materials such as saddle, grips, tire, handlebars, front fork, frame and crown. The crowns are a fundamental part of the central movement assembly, which is responsible for transforming the cyclist's movement into vehicle movement. This component is extremely important in the functioning of the bicycle. Failures that occur in this component can lead to the impossibility of using the equipment or, in exceptional cases, accidents with material or health loss to the user. In the manufacturing industry there is a need to remain competitive, reducing costs and increasing profitability. For that, more efficient processes are used or the substitution of materials without loss of mechanical properties or performance. In composite materials the properties are changed by the incorporation of a dispersed phase or reinforcement. The incorporation of the dispersed phase translates into an advantage for polymeric matrix composites, since the time and cost to develop a new polymer are much higher. One of the most important classes of reinforcement is fibrous materials. Fibers can have several characteristics that define how they will influence the matrix. Among these characteristics are length, shape, orientation, composition, arrangement among others, concentration and distribution. Fiberglass is the most common fibrous material and the one that has been used for the longest time. Among the various composites with a polymer matrix, glass fiber reinforced polypropylene (PP FV) and glass fiber reinforced polyamide 6 (PA FV) stand out. These materials are used in several applications of high technical performance, mainly in the automotive sector. PP FV compared to PA FV has lower cost, with good tensile and impact strength being a great candidate to replace PA FV. This course completion work aims to evaluate and verify the possibility of replacing polypropylene with 30% by mass of short glass fibers as a substitute for polyamide 6 with 30% by mass of short glass fibers. Currently, PA 6 with fiberglass is used for crown production on children's bicycles. To achieve the objectives, extensive bibliographical research was carried out, seeking theoretical support for replacement. After this step, tensile strength and hardness tests were carried out to characterize and compare the mechanical properties of the two types of composites. We present the results obtained, comparing the tensile properties (modulus and tensile strength) and hardness of the two materials. A simulation was presented indicating the use of the economic point of view, showing that the economic viability of the exchange has potential savings in the range of 35%. The production of specimens by compression molding was not efficient and the results of the tests were not conclusive. The bibliographic research revealed several cases where replacement was indicated. The literature search also showed several secondary benefits in substituting one material for another. More evaluations can be carried out, mainly in a service situation to evaluate the replacement.

Keywords: Composites. Polypropylene. Polyamide. Fiberglass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática esferulito, cristalito e arranjo de cadeias.....	20
Figura 2 - Classificação dos polímeros quanto a estrutura química.....	21
Figura 3 – Reticulação com peróxidos	22
Figura 4 - Comportamento tensão-deformação para polímeros. Curva A – Polímeros Frágeis. Curva B – Plásticos. Curva C – Elásticos.....	23
Figura 5 – Representação esquemática da estrutura da poliamida 6.	24
Figura 6 - Representação esquemática da caprolactama e do náilon 6	26
Figura 7 - Representação esquemática comparando polietileno e polipropileno	28
Figura 8 - Representação esquemática monômetro de propileno e do polipropileno	28
Figura 9 - Representação esquemática dos estereoisômeros do PP.	28
Figura 10 - Classificação dos compósitos quanto ao tipo de reforço.	34
Figura 11 - Principais fatores que afetam a resistência mecânica dos compósitos de termoplástico com fibras de vidro curtas.....	37
Figura 12 - Classificação e propriedades físicas de várias fibras de vidro.....	38
Figura 13 - Microtomografia de raios-X da PA 6.6 reforçada com 30% de fibras de vidro. ...	44
Figura 14 - Representação da coroa no contexto da bicicleta	48
Figura 15 - Coroa.....	48
Figura 16 - Prensa hidráulica com aquecimento	51
Figura 17 - Molde.....	51
Figura 18 - Prensa hidráulica utilizada para resfriamento dos corpos de prova.....	52
Figura 19 - Corpos de prova PP obtidos.....	52
Figura 20 - Corpos de prova não utilizados.....	55
Figura 21 - Tensão-deformação do PP 30% FV.....	56
Figura 22 - Tensão-deformação da PA 30% FV	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das poliamidas	24
Tabela 2 - Temperatura de transição vítrea de algumas poliamidas.....	25
Tabela 3 - Valores de propriedades da PA 6.	27
Tabela 4 - Valores de propriedades do PP.....	30
Tabela 5 - Propriedades gerais das resinas puras	31
Tabela 6 - Propriedades de fibras e materiais convencionais.....	35
Tabela 7 - Propriedades mecânicas da fibra de vidro.....	38
Tabela 8 - Dureza <i>Shore D</i> - PP FV.	53
Tabela 9 - Dureza <i>Shore D</i> - PA FV.....	53
Tabela 10 - Amostras de PP FV, módulo, alongamento na ruptura e resistência à tração na ruptura.....	56
Tabela 11 - Amostras de PA FV, módulo, alongamento na ruptura e resistência à tração na ruptura.....	57
Tabela 12 - Tabela propriedades materiais estudados	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

atm	Atmosfera
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Escala Célsius
EPDM	Borracha Etileno Propileno Dieno
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
g/m ²	Gramas por metro quadrado
GPa	Giga Pascal
Hz	Hertz
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
J/m	Joule por metro
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
LDPE	<i>Low-Density Polyethylene</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mm/min	Milímetros por minuto
MPa	Mega Pascal
N ₂	Nitrogênio Gasoso
NH ₃	Amônia
NR	Borracha Natural
PA	Poliamida
pcr	Partes por cem de borracha
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PEUAPM	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
PEUBD	Polietileno de Ultra Baixa Densidade
PP	Polipropileno
psi	Libra-força por polegada quadrada
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
SBR	Borracha Butadieno Estireno
SEM	Microscópio Eletrônico de Varredura

T _c	Temperatura de Cristalização
T _m	Temperatura de Fusão Cristalina
T _g	Temperatura de Transição vítrea
TGA	Termogravimetria
VA	Acetato de Vinila
μ	Mícron

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	POLÍMEROS.....	19
2.1.1	Poliamida	24
2.1.2	Polipropileno	27
2.1.3	Comparação entre PP e PA 6	30
2.2	MATERIAIS COMPÓSITOS	31
2.2.1	Compósitos reforçados por fibras	34
2.2.2	Fibra de vidro.....	37
2.2.3	Interface, interfase e adesão e mecanismo de reforço.	40
2.2.4	Fabricação de compósitos de matriz polimérica – Moldagem por injeção	41
2.3	SUBSTITUIÇÃO PA 6 FIBRA VIDRO POR PP FIBRA VIDRO	44
2.4	COROA	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	MATERIAIS	49
3.1.1	Coroa.....	49
3.1.2	PP com carga Fibra de vidro	49
3.1.3	PA6 com carga Fibra de vidro.....	49
3.2	METODOLOGIA.....	50
3.2.1	Confecção dos corpos de prova	50
3.2.2	Ensaio de tração	52
3.2.3	Ensaio de dureza	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53

4.1	ENSAIO DE DUREZA	53
4.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	53
4.3	VIABILIDADE ECONÔMICA	58
5	CONCLUSÕES.....	60
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
7	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana é um dos temas de grande importância para a sociedade. As grandes cidades sofrem com a pressão de grandes populações que necessitam se locomover para realizar as tarefas do cotidiano. O transporte de massas como trens de superfície, metro e ônibus resolvem parcialmente este problema. Entretanto estes trazem inconvenientes como grande tempo dispendido para as viagens, superlotação, necessidade de se deslocar até os pontos de acesso do serviço, entre outros. Neste sentido também há uma busca por soluções individuais, que permitam maior flexibilidade de horários, evitar grandes concentrações de pessoas e redução de custos. As preocupações ambientais também devem estar presentes nas discussões sobre a mobilidade, uma vez que transporte de massa ou transportes automotores individuais geram gases que contribuem para as mudanças climáticas que enfrentamos neste século. Neste sentido as bicicletas surgem como uma excelente alternativa, juntando mobilidade com preservação ambiental. As bicicletas têm a capacidade de contribuir no auxílio da resolução de várias questões da mobilidade urbana, com baixo impacto ambiental, baixo custo e podendo contribuir com um modo de vida mais saudável (LOPEZ, 2018; OTA, 2004).

Em outro ponto, a indústria também busca alternativas para se manter competitiva. Uma das principais ferramentas que pode utilizar é fazer uso de processos industriais mais eficientes. Com relação a produtos industriais ligados a mobilidade pessoal, como as bicicletas, o principal foco está na redução da massa final dos produtos. Em veículos automotores a redução de peso leva a redução do consumo de combustíveis. Para as bicicletas a redução de peso leva a produtos que exigem menor esforço do utilizador, permitindo uma maior mobilidade e independência (LOPEZ, 2018; OTA, 2004).

Inicialmente as indústrias optaram pela substituição de partes produzidas a partir de metais por polímeros de engenharia, para evitar a perda de propriedades mecânicas. Concomitantemente, há a busca por maior eficiência na redução de custos sem prejuízo ao desempenho dos produtos. Com o passar do tempo, estudo e investimento em pesquisa e desenvolvimento passaram a utilizar outras famílias de materiais. Polímeros com propriedades mecânicas inferiores, são usados nestas aplicações, principalmente pela introdução dos materiais compósitos. Uma alternativa para a substituição de materiais poliméricos ou metálicos é o uso de compósitos de matriz polimérica. Nos materiais compósitos as propriedades são alteradas pela incorporação de uma fase dispersa ou carga. A incorporação da fase dispersa se traduz em uma vantagem para os compósitos de matriz polimérica, uma vez que o tempo e o custo para desenvolvimento de um novo polímero são muito maiores (LOPEZ, 2018; OTA, 2004).

Em relação a compósitos de matriz polimérica uma das classes mais importantes são os reforçados por fibras. As características das fibras afetam diretamente o material. Entre essas características há o comprimento, forma, orientação, composição, arranjo, concentração e distribuição. As propriedades dos compósitos também são profundamente influenciadas pelo modo como seus componentes interagem uns com os outros. É comum o uso de agente de acoplamento para melhora das propriedades mecânicas (LOPEZ, 2018).

Existe várias fibras utilizadas em compósitos de matriz polimérica, como a aramida e a fibra de vidro. A fibra de vidro é o material fibroso mais comum sendo utilizado há mais tempo. Entre os diversos compósitos de matriz polimérica destaca-se o polipropileno reforçado com fibra de vidro e a poliamida reforçada com fibra de vidro. Estes materiais são utilizados em diversas aplicações de alto desempenho técnico, principalmente no setor automotivo. O polipropileno com fibra de vidro em comparação com a poliamida com fibra de vidro tem menor custo, com boa resistência à tração e ao impacto sendo um ótimo candidato a substituí-la (LOPEZ, 2018; OTA, 2004).

As bicicletas fazem uso generalizado de compósitos, vários componentes podem ser construídos pelo seu uso como o selim, manoplas, pneu, guidão, garfo dianteiro, quadro, catraca e a coroa. A coroa é uma roda dentada conectada ao pedivela responsável por transmitir a energia física do ciclista, através da corrente, para movimentar a bicicleta. É uma peça com elevada responsabilidade é de extrema importância no funcionamento da bicicleta. Falhas ocorridas neste componente podem levar a impossibilidade de uso do equipamento ou, em casos excepcionais, acidentes com perdas materiais ou da saúde do usuário.

Este trabalho de conclusão de curso visa avaliar e verificar a eficácia do polipropileno com fibra de vidro curta como substituto da poliamida 6 com fibra de vidro curta para produção de coroas em bicicletas infantis. Por fim busca-se comprovar que a substituição é viável, tanto do ponto de vista técnico, como do ponto de vista econômico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar e verificar a eficácia do polipropileno com fibra de vidro curta como substituto da poliamida 6 com fibra de vidro curta para produção de coroas em bicicletas infantis.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios de tração e ensaio de dureza para caracterização de propriedades mecânicas (módulo, resistência à tração e dureza) dos dois materiais.
- Verificar a correlação entre os valores encontrados das propriedades entre os dois tipos de compósitos e os valores encontrados na literatura.
- Descrever estudos onde a substituição se mostrou viável.
- Verificar se há viabilidade econômica na substituição do PA6 pelo PP através da comparação dos custos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 POLÍMEROS

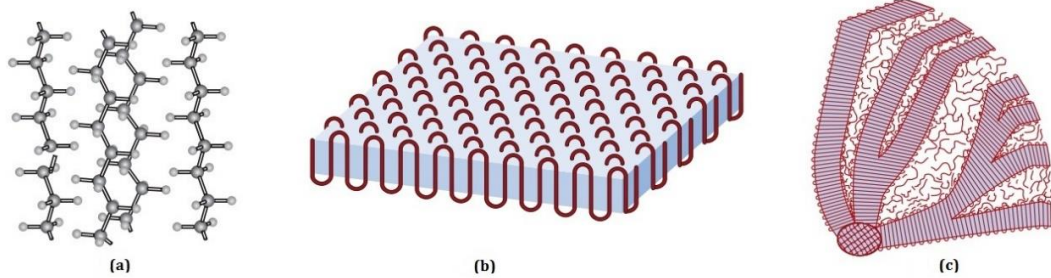
O termo polímero tem origem no grego, sendo o termo “poli” relacionado a muitos e o termo “mero” relacionado com unidade de repetição. Assim, de modo geral, polímeros são macromoléculas compostas por milhares de unidades de repetição. Os polímeros são produzidos a partir dos monômeros, uma molécula com uma única unidade de repetição. (CANEVAROLO JR., 2006).

As reações químicas necessárias para que essas ligações ocorram são denominadas como polimerização. Os monômeros podem estar ligados em si as centenas, milhares, dezenas de milhares ou mais para formação dos polímeros. Para os materiais poliméricos as massas molares estão na ordem de centenas de milhares ou milhões (ODIAN, 2004).

A estrutura dos polímeros no estado sólido dependem de como as macromoléculas estão distribuídas espacialmente (empacotamento). Quando o empacotamento é desordenado apresenta a fase amorfa, quando é ordenado apresenta a fase cristalina, ambas ocorrendo de modo tridimensional. Por apresentarem uma alta massa molar, somente uma parte destas macromoléculas adota estrutura ordenada. Os polímeros com estruturas muito irregulares ou atáticos são na maiorias das vezes amorfos (CANEVAROLO JUNIOR, 2006).

Polímeros que são cristalizáveis quando resfriados a partir do estado fundido, apresentam núcleos individuais, que se desenvolvem radialmente, formando os esferulitos. Estes possuem diversos tamanhos e graus de perfeição, tendo a mesma importância que os grãos de materiais policristalinos. A morfologia dos esferulitos interfere diretamente nas propriedades do material. Os esferulitos são agregados cristalinos de aparência fibrosa contendo cadeias dobradas no seu interior, chamadas de lamelas. Os cristalitos, conhecidos como lamelas, tem tamanho nanométrico e crescem a partir de um centro ou núcleo. A região amorfa do polímero separa as lamelas cristalinas de cadeias dobradas. Algumas moléculas de ligação conectam lamelas adjacentes passando através da região amorfa. A Figura 1 apresenta a representação esquemática de um polímero e suas estruturas (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

Figura 1 - Representação esquemática esferulito, cristalito e arranjo de cadeias



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016). (a) Arranjo das cadeias moleculares para uma região cristalina do polietileno. (b) cristalito com cadeias poliméricas dobradas. (c) Esferulito encontrada em alguns polímeros semicristalinos (esquemático).

Os polímeros podem apresentar temperaturas de transição que são muito importantes. A temperatura de transição vítrea (T_g) é um valor médio de uma faixa de temperaturas que, durante o aquecimento, permite que as cadeias poliméricas da fase amorfa ganhem mobilidade, permitindo a mudança de conformação. Em temperaturas abaixo da T_g o polímero não possui energia interna suficiente que permita o deslocamento das cadeias por mudanças conformacionais. Na T_g o polímero está no estado vítreo, caracterizado por seu duro, rígido e quebradiço como vidro, de onde vem o “g”, do inglês “*glass*”. A T_g é uma transição termodinâmica de segunda ordem afetando algumas propriedades como módulo de elasticidade, coeficiente de expansão, índice de refração, calor específicas, etc (CANEVAROLO JUNIOR, 2006).

A temperatura de fusão cristalina (T_m) é o valor médio de uma faixa de temperaturas que, durante o aquecimento, há o desaparecimento das regiões cristalinas, com a fusão dos cristalitos (“*melt*”, de onde vem o “m”). Nesta configuração a energia do sistema alcança o nível de para que as forças intermoleculares secundárias sejam vencidas, desfazendo as estruturas regulares de empacotamento, mudando do estado borrachoso para um estado viscoso ou fundido. A T_m só ocorre na fase cristalina, desta forma, somente se aplicando a polímeros semicristalinos. É uma transição termodinâmica de primeira ordem afetando propriedades como volume específico, entalpia, etc.

A temperatura de cristalização (T_c) é uma temperatura em que um grande número de cadeias poliméricas se organiza de forma espacialmente regular. Ocorre durante o resfriamento de um polímero semicristalino que está acima da T_m . A T_c permite a formação de estruturas cristalinas (os cristalitos ou lamelas).

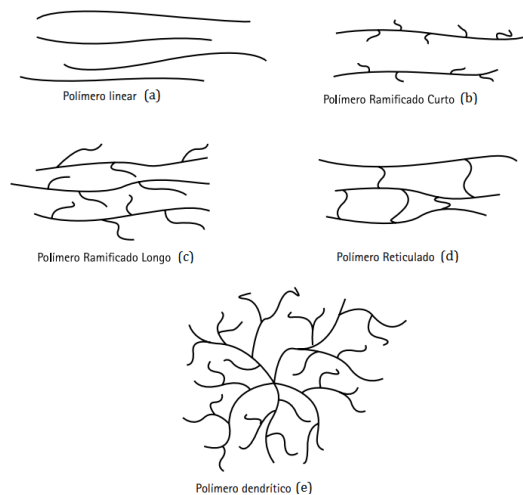
Esta ordenação espacial permite a formação de uma estrutura cristalina (cristalito ou lamela) naquele ponto. Cadeias em outros pontos também estarão aptas para se ordenarem

formando novos cristais. Isto se reflete em toda a massa polimérica produzindo-se a cristalização da massa fundida.

O comportamento mecânico de um termoplástico resulta de processos físicos de reorganização estrutural de suas macromoléculas. Os principais mecanismos pelo qual isto ocorre são a deformação da fase amorfa, a deformação das lamelas cristalinas e dos esferulitos. Para termoplásticos cristalinos submetidos a baixas tensões ocorre uma orientação das cadeias amorfas, que se alinham de acordo com a direção do carregamento. Quando a tensão aumenta, as lamelas cristalinas também se alinham com a direção do carregamento, em seguida, ocorre a separação das lamelas em estruturas lamelasres individuais ou microfibrilas. Finalmente há um alongamento e reorganização das microfibrilas. Na escala dos esferulitos pode ocorrer uma deformação homogênea quando há deformação reversível do esferulito da forma esférica para elipsoide. Outro mecanismo que pode ocorrer simultaneamente, ou não, no esferulito é a deformação não homogênea onde a zona perpendicular a direção da tensão é esticada de modo irreversível (LOPEZ, 2018).

Uma classificação comum para os polímeros é quanto a sua estrutura molecular, podendo ser lineares, Figura 2 (a) ou ramificados. Existem polímeros com ramificações curtas, Figura 2 (b) e longas, Figura 2 (c), inclusive podendo gerar estruturas dendríticas, Figura 2 (e) na qual existem ramificações projetando-se de outras ramificações. As ramificações têm grande efeito em muitas propriedades do polímero, principalmente na redução da cristalinidade, pois não permitem a compactação em estruturas cristalinas como acontece nos polímeros lineares. Polímeros ramificados são compostos por extensões laterais compostas por unidades monoméricas completas, não são incluídas nesta definição grupos laterais pertencentes a estrutura do monômero. Quando as macromoléculas estão ligadas entre si, em pontos diferentes de suas extremidades, são chamados de reticulados, Figura 2 (d). (ODIAN, 2004).

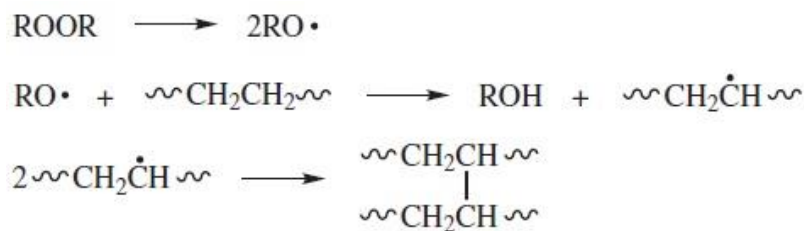
Figura 2 - Classificação dos polímeros quanto a estrutura química



Fonte: Adaptado de Ribeiro, Ferreira e Oliveira (2012).

A reticulação é essencial para que os elastômeros tenham sua propriedade de recuperação rápida e completa das deformações. A reticulação ou vulcanização pode ser alcançada usando enxofre, peróxidos, outros reagentes ou radiação ionizante. As reticulações formadas por meio de peróxidos são mais estáveis termicamente do que aquelas formadas por vulcanização de enxofre. A reticulação de peróxido é usada principalmente para os polímeros que não podem ser facilmente reticulados por enxofre, como polietileno, poliolefinas e polissiloxanos. A reticulação do polietileno aumenta suas propriedades de resistência e estende o limite superior de temperatura em que este material pode ser usado (ODIAN, 2004). A Figura 3 apresenta esquema de reticulação com peróxidos.

Figura 3 – Reticulação com peróxidos



Fonte: Adaptado de Odian (2004). A reticulação de peróxido envolve a formação de radicais de polímero via abstração de hidrogênio pelos radicais peróxi formados a partir da decomposição térmica do peróxido. A reticulação ocorre por acoplamento dos radicais de polímero.

Polímeros lineares e ramificados são materiais termoplásticos. Os termoplásticos são polímeros que podem amolecer e fluir quando da aplicação de calor e pressão. Após a remoção do calor e da pressão a massa polimérica solidifica em uma forma definida (molde). Se o processo for repetido, o polímero volta a amolecer e fluir, pois suas cadeias (macromoléculas)

possuem liberdade para se mover. Este tipo de polímero passa por uma transformação reversível.

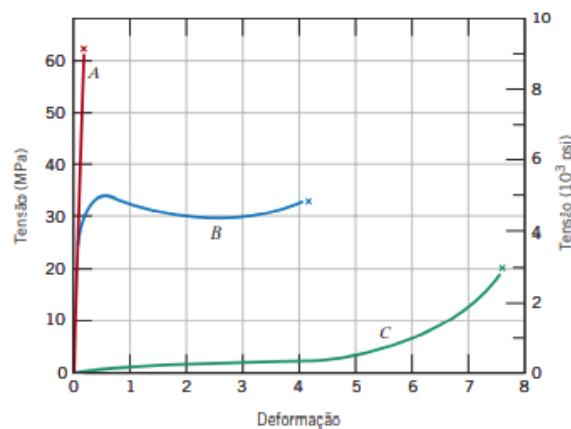
Os termorrígidos são polímeros que em seu aquecimento amolecem e fluem, adquirindo a forma do molde, mas, passam por uma reação de cura (reticulação), formando ligações cruzadas entre as macromoléculas enquanto se solidificam. A cura é o tempo necessário para mudança das propriedades físicas de uma resina termorrígida devido a reações químicas, de um catalisador, calor ou agente de cura. Subseqüentes aumentos de temperatura não levam a mobilidade das cadeias, pois são infusíveis e insolúvel pela presença das reticulações. Alguns tipos de polímeros podem apresentar comportamento elástico, na qual, em temperatura ambiente podem se deformar pela aplicação de tensão, retornando rapidamente ao estado original quando da remoção da tensão. Normalmente são termorrígidos com cadeias flexíveis amarradas umas as outras com baixa densidade de reticulações. Este polímeros são chamados de elastômeros (CANEVAROLO JR., 2006).

Os materiais poliméricos geralmente apresentam três tipos típicos de comportamento de tensão-deformação. Essas variações são apresentadas na

Figura 4. A curva A apresenta comportamento frágil, fraturando quando se deforma elasticamente. A curva B apresenta uma deformação elástica, seguida por um escoamento e uma região de deformação plástica. A curva C é totalmente elástica, comportamento esperado dos elastômeros (CALLISTER JUNIOR, 2016).

Figura 4 - Comportamento tensão-deformação para polímeros.

Curva A – Polímeros Frágeis. Curva B – Plásticos. Curva C – Elásticos.

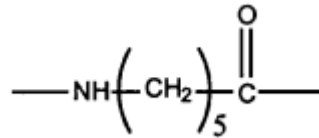


Fonte: Callister Júnior (2016).

2.1.1 Poliamida

As poliamidas (PAPAPA) são polímeros semicristalinos que se caracterizam por suas ótimas propriedades mecânicas, resistência ao tempo, baixo coeficiente de atrito, alta temperatura de fusão, boa resistência ao impacto e alta resistência à fadiga, e ótima resistência a alguns solventes orgânicos (Tabela 1). Sua molécula é caracterizada pela presença da ligação amida na cadeia principal e é apresentada na Figura 5. Foi um dos primeiros polímeros desenvolvidos e sua primeira síntese foi realizada por Wallace Carothers nos laboratórios da Dupont. Representou um avanço da tecnologia de polímeros pois foi projetado para ter propriedades específicas. (MASTRO, 2016; WIEBECK; HARADA, 2005).

Figura 5 – Representação esquemática da estrutura da poliamida 6.



Fonte: Baker, Mead (2002).

Tabela 1 - Propriedades das poliamidas

PROPRIEDADES	PA 6	PA 11	PA 12	PA 6.6	PA 6.10	PA 6.12
Temperatura de fusão (°C)	215	185	177	252	215	210
Densidade (g/cm ³)	1,14	1,04	1,02	1,15	1,08	1,07
Resistência à tração (MPa)	83	55	52	83	62	59
Módulo de flexão (MPa)	2758	1241	1172	2826	2413	1999
Absorção água (%) 24 horas imersão	1,7	0,3	0,25	1,5	0,5	0,4

Fonte: Wiebeck, Harada (2005).

Alguns tipos de poliamidas também são identificados pelo seu nome comercial náilon (do original em inglês *nylon*). Existem muitos tipos diferentes de PA, dependendo dos monômeros iniciais utilizados na polimerização. Seu tipo é determinado pela quantidade de átomos de carbono entre as ligações amida. A quantidade de carbonos também é responsável por suas propriedades. Quando se é utilizado apenas um monômetro para síntese da PA este é identificado apenas com um número, exemplo PA 6. Quando dois monômeros são utilizados para síntese o PA é identificado com 2 números, exemplo PA 6/6 (BAKER; MEAD, 2002).

Os grupos amida (R-CONH-R') são polares que tem efeito muito significativo sobre as propriedades da PA. Os grupos amida na PA interagem entre si pelo mecanismo de ligação de hidrogênio com aumento da atração intermolecular. As excelentes propriedades mecânicas do PA são resultado desta polaridade que confere melhor capacidade de ligação intermolecular, enquanto, as sequencias alifáticas flexíveis de carbono na cadeia principal conferem baixas temperaturas de fusão e uma baixa viscosidade, facilitando o processamento. A estrutura da PA também proporciona com que sejam muito resistentes acima da sua temperatura de transição vítrea (T_g) (BAKER; MEAD, 2002).

A PA não apresenta muita interação com solvente apolares, em contraponto, são afetados por solventes polares, principalmente a água. Sempre que for aplicado deve ser levado em consideração a presença de umidade. A umidade pode causar variação dimensional e redução das propriedades mecânicas, com efeitos mais pronunciados em altas temperaturas. Como efeito direto dessa condição o material sempre deve ser seco antes do seu processamento. São razoavelmente bons isolantes, em condição de baixa umidade. Na medida que a umidade e temperatura sobem esta propriedade é comprometida (BAKER; MEAD, 2002).

As poliamidas são geralmente polímeros flexíveis (Tabela 2), resistentes, fortes e com baixo coeficiente de atrito. A resistência e a rigidez são proporcionais a quantidade de átomos de carbono entre as ligações amida. Com a redução da quantidade de átomos de carbono a aumento da resistência e rigidez, enquanto diminui com sua redução. Isto ocorre pois com menor número de carbonos há uma maior densidade de amidas por unidade de comprimento ao longo da cadeia principal do polímero. A quantidade de carbono também modifica a suscetibilidade a umidade, neste caso, a redução do número de carbonos intensifica a absorção de umidade. Assim, o PA 6 terá uma maior absorção de umidade que o PA 12 (BAKER; MEAD, 2002; MASTRO, 2016).

Tabela 2 - Temperatura de transição vítrea de algumas poliamidas

Tipo de Poliamida	Temperatura de transição vítrea (T_g)
PA 6	40
PA 6.6	52
PA6.10	40
PA 11	43
PA 12	42

Fonte: Richardson (2009).

O fato de a PA ser bastante polar leva a um maior empacotamento das cadeias e a alta cristalinidade. O grau de cristalinidade afeta as propriedades da PA com a velocidade de

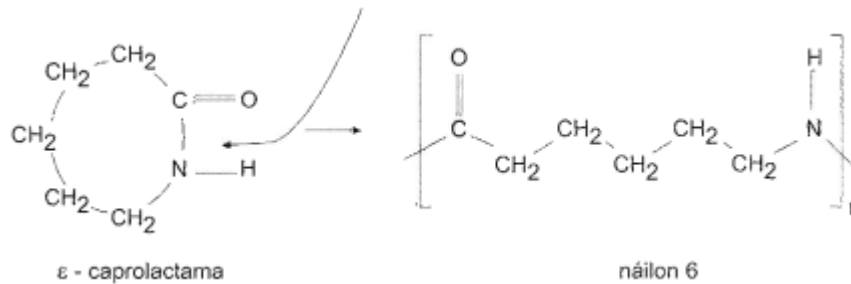
resfriamento durante o processamento determinando a cristalinidade. Resfriamento mais rápido levará a graus mais baixo de cristalinidade (em torno de 10%) enquanto resfriamentos mais lentos elevam a cristalinidade (entre 50% e 60%). Desta mesma forma, a taxa de resfriamento também determina o tamanho dos cristalinos, com cristais maiores em materiais resfriados mais rapidamente. Na moldagem por injeção a superfície das peças é resfriada rapidamente, criando uma variação do tamanho dos cristais entre a superfície e o interior. Esta característica do processo cria materiais com maior resistência a tração e dureza, mas com menor alongamento e resistência ao impacto. A cristalinidade também afeta a absorção de umidade, sendo que baixa cristalinidade torna o material mais propenso a sua absorção (BAKER; MEAD, 2002; MASTRO, 2016).

As poliamidas podem ser processadas por várias técnicas incluindo extrusão, moldagem por injeção, moldagem por sopro, rotomoldagem, entre outros. O alto ponto de fusão da PA e a baixa viscosidade neste ponto auxiliam no processamento por moldagem por injeção, mas dificultam a extrusão e a moldagem por sopro. No processamento por injeção foram desenvolvidos bicos especiais para evitar que o polímero escorra devido à baixa viscosidade. Apresentam alta contração no molde fruto da sua cristalinidade. A absorção de água deve ser observada quando a peças com baixas tolerâncias dimensionais. A água atua como plastificante, reduzindo tensões da moldagem, causando alterações dimensionais (BAKER; MEAD, 2002).

As poliamidas estão disponíveis comercialmente em uma ampla gama de tipos, incluindo poliamida 6, 11, 12, 6.6, 6.12 entre outros. Os mais amplamente utilizados são o 6/6 e o 6. A PA 6 geralmente tem desempenho inferior ao PA 6.6, mas seu custo reduzido o torna atraente em muitas aplicações. Variações com melhoria na resistência ao impacto, resistência ao desgaste e outras propriedades também são facilmente encontradas. Um uso muito popular é do náilon 6 e 6/6 como fibras na produção de vestuário. Aplicações de engenharia também representam importante uso deste polímero (BAKER; MEAD, 2002; MASTRO, 2016).

A PA 6 é produzida a partir do monômero caprolactama, com ponto de fusão em torno de 255° C, molécula mostrada na Figura 6. Sua principal aplicação é em cintas estabilizadoras de pneus. Outros tipos de PA são utilizados em filmes para embalagens, produtos automotivos, engrenagens e caixas embreagem, também podendo ser utilizados como cerdas de escovas e linhas de pesca, etc. (BAKER; MEAD, 2002)

Figura 6 - Representação esquemática da caprolactama e do náilon 6



Fonte: Canevarollo Junior (2006).

A PA possui uma ampla gama de aditivos. Pode ser aditivada com fibras de vidro ou fibras de carbono com a principal função de aumentar a resistência mecânica e a rigidez. Também pode ser utilizada cargas minerais. Outros aditivos estabilizantes podem ser utilizados para aumentar a resistência ao calor, hidrólise ou a luz. Quando a PA é aplicada em rolamentos, podem ser utilizadas classes de autolubrificantes como grafite. A resistência ao impacto pode ser melhorada pela incorporação de elastômeros. Agentes anti-estáticos são utilizados para reduzir o acúmulo de carga elétrica estática em carpetes e outras aplicações (BAKER; MEAD, 2002).

Na sequência apresentamos a Tabela 3 com os valores de algumas propriedades da PA.

Tabela 3 - Valores de propriedades da PA 6.

Propriedade	Unidade	Valor
Temperatura deflexão térmica	°C @ 1.82 MPa	65
Resistência à tração	MPa	81,4
Módulo de Young	GPa	2,76
Resistencia ao impacto	J/m	59
Densidade	g/cm ³	1,13
Constante dielétrica	@ 60 Hz	3,8

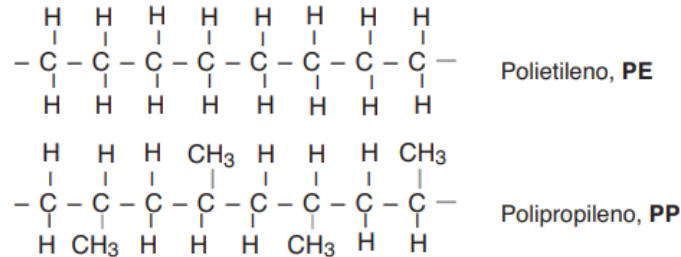
Fonte: Baker e Mead (2002).

2.1.2 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um dos polímeros mais versáteis disponíveis comercialmente. É muito semelhante ou polietileno (PE) em sua estrutura química, com exceção da existência de um grupo metil, onde no PE existe um hidrogênio, como apresentado na

Figura 7. A presença do grupo lateral metil gera um impedimento pelo efeito estérico que confere ao polímero maior resistência ao calor, tenacidade, maior rigidez, resistência a abrasão e maior custo em comparação com o PE. (BAKER; MEAD, 2002; MASTRO, 2016).

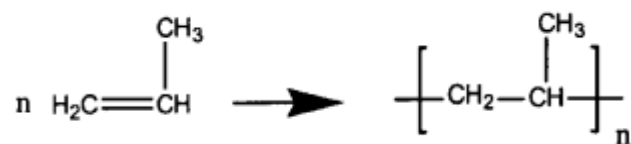
Figura 7 - Representação esquemática comparando polietileno e polipropileno



Fonte: Ashby, Shercliff e Cebon (2012).

O monômero propileno é um derivado do petróleo sintetizado pela polimerização de etileno. Seu uso comercial somente foi possível após a introdução na década de 60 dos catalizadores Ziegler-Natta. Esta descoberta foi laureada com o Prêmio Nobel de química de 1963 para os pesquisadores Karl Ziegler e Giulio Natta. Esse tipo de catalizador permitiu controlar a estereoseletividade permitindo que o material se cristalizasse em um material com maior rigidez. Com a evolução tecnologia foram desenvolvidos outros tipos de catalizadores, como os metallocênicos permitindo que sejam atingidas altas massas molares. Na Figura 8 apresentamos a estrutura esquemática do etileno e do PP (BAKER; MEAD, 2002; NOBELPRIZE.ORG, 2022).

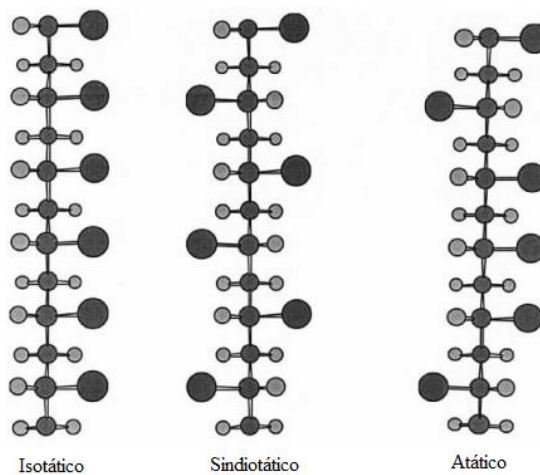
Figura 8 - Representação esquemática monômetro de propileno e do polipropileno



Fonte: Baker, Mead (2002).

Como já citado anteriormente, os catalizadores são capazes de controlar a microestrutura para produzir polímeros estereoespecíficos. As microestruturas que podem ser obtidas para o PP são apresentadas na Figura 9. As estruturas isotáticas e sindiotáticas são capazes de cristalizar devido à sua estrutura altamente regular. A forma atática é amorfa (BAKER; MEAD, 2002).

Figura 9 - Representação esquemática dos estereoisômeros do PP.



Fonte: adaptado de Baker e Mead (2022).

Cada um dos estereoisômeros do PP tem variação no seu comportamento mecânico. O PP isotático e sindiotático são cristalinos, e, são mais rígidos devido a esta capacidade de empacotamento em uma matriz cristalina regular. O PP sindiotático apresenta uma T_m menor que o PP isotático. O PP isotático é a forma comercial mais utilizada com ponto de fusão em 165°C . Quanto mais isotático maior a cristalinidade, maior o módulo, ponto de amolecimento e dureza. O PP atático tem baixa cristalinidade, entre 5% e 10%, isto acontece devido a impossibilidade das macromoléculas se organizarem, dificultando a cristalização. Desta forma é um material mais utilizado em aplicações como vedação, laminação de papel e adesivos (BAKER; MEAD, 2002).

O PP é utilizado em aplicações como engrenagens e componentes deslizantes de baixo custo. Tem ótima tenacidade em altos pesos moleculares com a aplicação em componentes com dobradiça viva. O PP é um material leve, com densidade de $0,905\text{ g/cm}^3$. Como é apolar tem baixa absorção de água, com boa resistência química, mas pode ser afetado por solventes clorados, gasolina e xileno, sendo utilizado em aplicações como recipientes para alimentos laváveis na máquina de lavar louça, brinquedos e móveis de baixo custo. É um bom isolante com um valor baixo para a constante dielétrica, sendo utilizado em caixas para baterias. Pode suportar aplicações que requerem esterilização a vapor ou em água fervente. Não é indicado para uso em baixas temperaturas por se tornar quebradiço, por ter sua T_g (-25°C). O aumento do peso molecular leva a uma elevação da viscosidade do fundido e da resistência ao impacto atrelado a uma redução da dureza e do ponto de amolecimento. Isto geralmente é explicado pela diminuição da capacidade de cristalização em altos pesos moleculares para o PP (BAKER; MEAD, 2002; GREENE, 2021; MASTRO, 2016).

Para aplicações onde é necessária maior rigidez pode ser utilizada aditivação com fibra de vidro curta como carga de reforço. O uso de agentes de acoplamento melhora as propriedades

do PP com fibra de vidro. Também podem ser utilizadas outras cargas como carbonato de cálcio e talco para se obter uma melhor rigidez. Outros aditivos utilizados incluem pigmentos, antioxidantes, agentes nucleantes, etc. Em aplicações que exigem resistência a UV é utilizado o negro de fumo. Em filmes são utilizados aditivos antibloqueio e deslizamento. Para embalagens são utilizados agente anti-estáticos. Elastômeros são adicionados para melhorar a resistência ao impacto (BAKER; MEAD, 2002).

Em resumo, as razões para a enorme utilização do PP são sua temperatura de fusão entre 160° e 170° C em comparação com outros polímeros *commodities*, alta resistência química, baixa densidade, resultando em um ótimo balanço entre as suas propriedades químicas e propriedades físicas. É de fácil processamento, apresenta baixo custo e boa resistência térmica. Este material possui ótima rigidez específica em comparação com outras poliolefinas por sua elevada relação entre resistência por densidade de PP. Sua versatilidade também está associada a possibilidade de utilização de cargas, reforços ou outros polímeros em altos teores em volume. São um dos mais importantes insumos para a indústria de plásticos (MORAES, 2020).

Algumas propriedades do PP são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de propriedades do PP.

Propriedade	Unidade	Valor
Temperatura deflexão térmica	°C @ 1.82 MPa	102
Resistência à tração	MPa	35,8
Módulo de Young	GPa	1,6
Resistencia ao impacto	J/m	43
Densidade	g/cm ³	0,90
Constante dielétrica	@ 60 Hz	2,2

Fonte: Baker e Mead (2002).

2.1.3 Comparação entre PP e PA 6

Na comparação direta entre do PP com PA 6 temos que o custo de aquisição é menor, por consequência um menor custo para para produção de artefatos. O PP apresenta tempos de processamento menores, menor densidade, boas propriedades mecânicas e químicas, não é higroscópico e tem boa disponibilidade no mercado. A Tabela 5 apresenta as principais propriedades para as resinas puras (MORAES, 2020).

Tabela 5 - Propriedades gerais das resinas puras

Material	Densidade específica	Resistência à tração (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de flexão (GPa)	Resistência ao Impacto Izod (J/m)
PP	0,89	34,50	34,50	1,38	53,4 - 1068
PA6	1,12	81,40	108,25	2,69	32,00

Fonte: Adaptado de Moraes (2020).

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

O termo compósito tem o sentido de identificar um material que é constituído por duas ou mais partes/fases distintas. Essa classificação é muito ampla e inclui diversos materiais que não são chamados de compósitos. Os materiais compósitos são reconhecidos apenas quando os constituintes ou fases têm propriedades físicas significativamente diferentes e as propriedades da compósito são visivelmente diferentes das propriedades de seus constituintes. Desta forma, certos compósitos são classificados baseados em mudanças significativas nas propriedades como resultado da combinação de seus constituintes. Isto se torna mais evidentes quando há a presença de fases em forma de placas ou fibras. Outras situações que identificam um material como compósito são quando o volume é maior que 10% e quando a propriedade de uma fase é muito maior (acima de 5 vezes) a da outra fase. Dada a ampla variedade de compósitos possíveis podem ser adotadas diferentes definições para atender a determinadas especificações. Neste trabalho adotaremos que materiais compósitos são materiais constituídos por dois ou mais constituintes químicos distintos, possuindo uma interface distinta que os separa. Esta definição abrange os materiais compósitos reforçados por fibra que serão utilizados neste trabalho (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

Os compósitos são constituídos por uma fase descontínua em uma fase contínua. A fase descontínua, na maioria dos casos, é mais resistente e rígida que a fase contínua sendo chamada de reforço. A fase contínua é chamada de matriz. As propriedades dos compósitos são fortemente influenciadas pelas propriedades dos materiais constituintes, pela sua distribuição e pela interação entre eles. As propriedades dos compósitos podem resultar da soma das propriedades das frações de volume de seus constituintes, ou, pode haver uma interação sinérgica entre as fases produzindo propriedades onde não é possível a contabilização por uma simples somatória. Desta forma na descrição de um compósito é muito importante que sejam especificadas, além das propriedades de seus constituintes, a geometria do reforço. A geometria

do reforço pode ser descrita pela forma, tamanho e distribuição. No entanto, sistemas que contenham geometrias idênticas podem diferir muito entre si no que tange a concentração, distribuição de concentração e orientação. Portanto, todos esses fatores podem ser importantes na determinação das propriedades dos compósitos (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

O **formato** das partículas dispersas, da fase descontínua, pode ser aproximado de esferas ou cilindros. Materiais naturais como mica e argilas ou materiais sintéticos como flocos de vidro podem ser melhor descritos por prismas ou plaquetas de seção transversal retangular. O tamanho e distribuição controlam a textura do material. Junto com a fração em volume determinam a área interfacial que é muito importante na determinação de extensão da interação entre o reforço e a matriz (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

A **concentração** é de modo geral, medida pelo volume ou fração de peso. A contribuição de um único constituinte para as propriedades do compósito é determinada por este parâmetro. Normalmente é tratada como o parâmetro mais importante na influência das propriedades do compósito. É uma variável de fabricação que pode ser muito facilmente controlada e usada como forma de alterar as propriedades do compósito (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

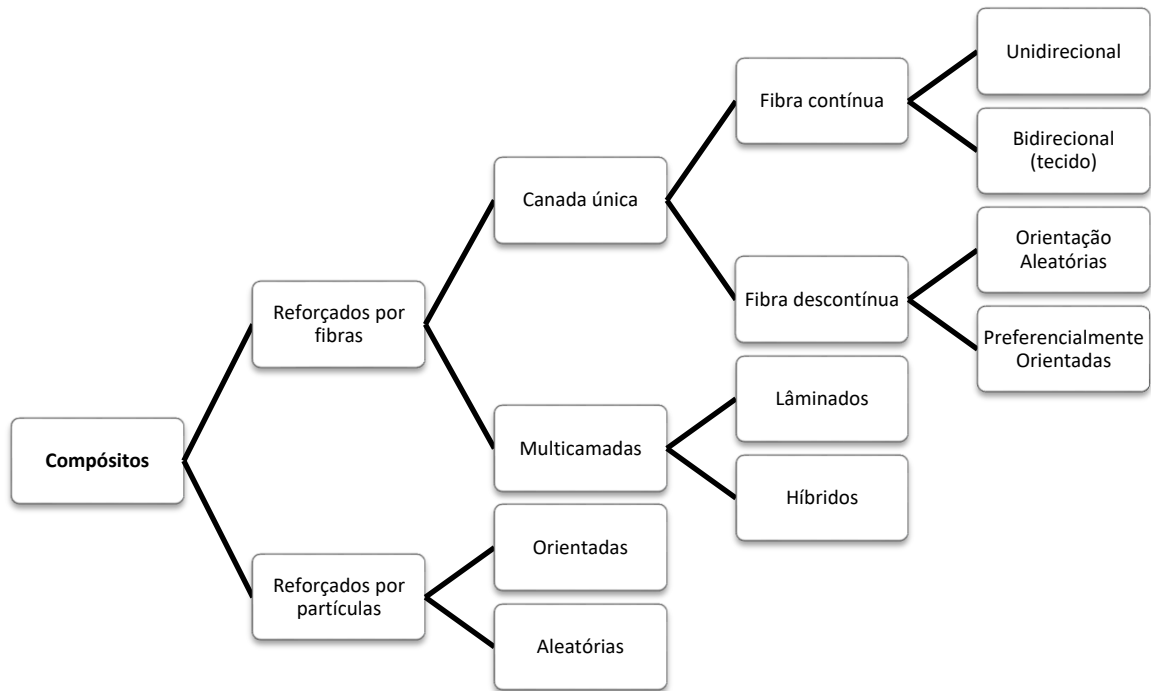
A **distribuição de concentração** é uma medida de homogeneidade ou uniformidade do sistema. A homogeneidade é uma característica importante que mostra as diferenças nas propriedades em diferentes pontos do compósito em relação as suas propriedades médias. A falta de homogeneidade deve ser evitada visto que leva a redução das propriedades, criando pontos fracos onde as falhas podem se iniciar (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

A **orientação** da fase dispersa afeta a isotropia do compósito. Quando a fase dispersa possui partículas com formato e dimensões semelhantes equiaxialmente, o compósito tem características de um material isotrópico onde as propriedades independem da direção. Quando as partículas não apresentam dimensões semelhantes, há tendência do compósito se comportar como em um material isotrópico, com as partículas orientadas aleatoriamente, como nos compósitos de fibras curtas orientadas aleatoriamente. Para outros casos o processo de fabricação pode levar a uma orientação preferencial do reforço, promovendo características anisotrópicas. Para compósitos reforçados com fibras contínuas a anisotropia pode ser almejada. Este fato pode ser descrito como uma vantagem pois permite projetar e fabricar compósitos com anisotropia controlada (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

A **distribuição** das partículas da fase dispersa é a relação espacial entre elas mesmas. Podem ser distribuídas de forma uniforme com espaçamentos regulares evitando seu contato. Também podem haver casos onde seja criada dispersão no formato de uma rede, onde as partículas estão conectadas formando um caminho contínuo (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

Os materiais compósitos são desenvolvidos principalmente para melhorar as propriedades mecânicas, como resistência, rigidez, tenacidade e desempenho em altas temperaturas. Considerando os mecanismos de reforço em comum foi proposto por Agarwal et al. (2015) a classificação apresentada na Figura 10, lembrando que o mecanismo de reforço é dependente da geometria da fase dispersa. O que difere uma partícula é sua natureza não fibrosa, podendo ser esférica, cúbica, tetragonal, em forma de placas ou outros formatos regulares ou não, mas aproximadamente equiaxial. Uma fibra tem a característica de ter o seu comprimento muito maior que as dimensões da sua seção transversal. Compósitos reforçados por partículas também são chamados de compósitos particulados assim como os compósitos reforçados por fibras podem ser identificados como compósitos fibrosos.

Figura 10 - Classificação dos compósitos quanto ao tipo de reforço.



Fonte: Adaptado de Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2015).

2.2.1 Compósitos reforçados por fibras

A maioria das medidas de resistência dos materiais são muito menores que os valores de suas resistências teóricas. Isto é atribuído a presença de imperfeições ou falhas que são inerentes aos materiais convencionais. As falhas na forma de trincas perpendiculares a direção de aplicação da carga é prejudicial à resistência. Assim, quando comparamos materiais convencionais com as fibras sintéticas apresentam resistências muito maiores ao longo de seu comprimento, pois grandes falhas ao longo de sua seção transversal são minimizadas pela sua pequena dimensão. Para os materiais poliméricos a estrutura molecular regular (cristalinidade) é responsável pelo alta resistência e rigidez. As propriedades de alguns tipos comuns de fibras, bem como de alguns materiais convencionais, estão na Tabela 6, mostrando a importância das fibras para a obtenção altas resistências. Para o caso das fibras de vidro a alta resistência é atribuída a uma superfície livre de defeitos, enquanto para o grafite e aramida atingem melhores resultados devido a orientação atômica e molecular. A fibra mais importante é a fibra de vidro tipo E por seu baixo custo. Entretanto outras fibras como boro, grafite e fibras de aramida são excepcionais pelos altos valores de rigidez. Destes, as fibras de grafite oferecem a maior variedade devido à capacidade de controlar sua estrutura (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

Tabela 6 - Propriedades de fibras e materiais convencionais.

Material	Módulo (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Densidade (g/cm ³)
Fibras			
Fibra vidro (Tipo D)	72,4	3,5	2,54
Fibra vidro (Tipo S)	85,5	4,6	2,48
Grafite (alto módulo)	390,0	2,1	1,90
Grafite (alta resistência à tração)	240,0	2,5	1,90
Boro	385,0	2,8	2,63
Sílica	72,4	5,8	2,19
Tungstênio	414,0	4,2	19,30
Kevlar 49 (aramida)	130,0	2,8	1,50
Materiais convencionais			
Aço	210,0	0,34-2,1	7,8
Ligas alumínio	70,0	0,14-0,62	2,7
Vidro	70,0	0,7-2,1	2,5

Fonte: Agarwal et al. (2015).

Com já citado as fibras apresentam reduzida seção transversal, e, por este fato, não são utilizadas diretamente em aplicações de engenharia. Para tanto são dispersas na fase matriz para formar os compósitos. A matriz tem a função de unir as fibras, transferir as cargas para as fibras, protegê-las do ambiente e de danos provocados pelo manuseio. Os compósitos fibrosos tornaram-se a mais importante classe de materiais compósitos porque são capazes de atingir altas resistências (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

Compósitos reforçados por fibras podem ser classificados como compósitos de camada única ou multicamadas baseadas no estudo das propriedades teóricas e experimentais. Na camada única podem ser feitas várias camadas tendo a mesma orientação e propriedades, de modo que todo o laminado é um compósito de camada única. Compósitos moldados com fibras descontínuas podem não apresentar a orientação planar uniforme ao longo da espessura, mas não há camadas distintas e eles podem ser classificados como camada única. Compósitos de não tecidos com orientação aleatória constante em cada camada podem ser considerados de camada única, embora possam ser encontradas camadas ricas em resina por avaliação por microscopia. Um grande percentual dos compósitos utilizados em aplicações estruturais são multicamadas são compósitos reforçados por fibras. Em um compósito de camada única a sua orientação varia de acordo com o projeto. Cada camada do compósito é geralmente muito fina,

normalmente com uma espessura de 0,1 mm e, portanto, não pode ser usada diretamente. Várias camadas idênticas ou diferentes formam um compósito multicamadas utilizável em aplicações de engenharia. Quando os materiais utilizados nas camadas são os mesmos temos um laminado. Laminados híbridos são compósitos multicamadas feitas de diferentes materiais (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

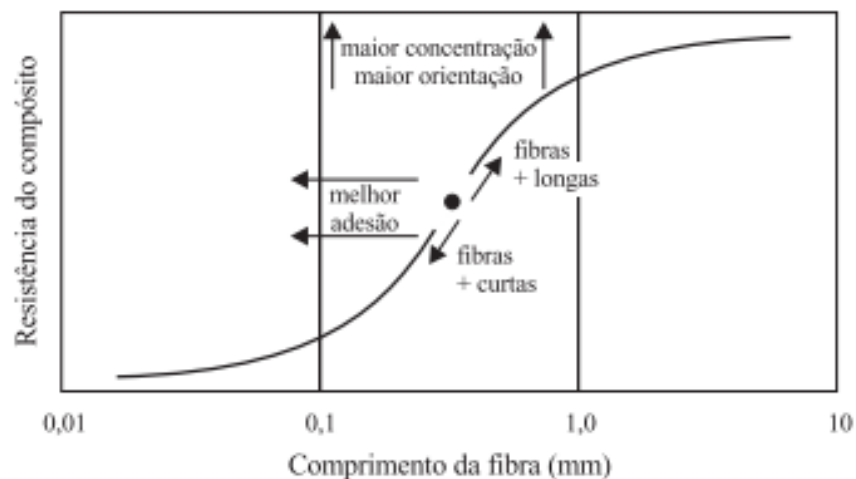
As fibras de reforço em um compósito de camada única podem ser curtas ou longas comparando com suas dimensões totais. Compósitos com fibras longas são chamados de compósitos reforçados com fibras contínuas, e aqueles com fibras curtas, compósitos reforçados com fibras descontínuas. Complementarmente os compósitos de fibras descontínuas podem ser considerados aqueles em que o comprimento da fibra afeta as propriedades do compósito. Em compósitos reforçados com fibras contínuas assume-se que a carga é aplicada diretamente as fibras. Outra suposição válida quanto a fibras de alto módulo é que são utilizadas em grandes concentrações, desta forma a matriz não é um componente de suporte as cargas, mas principalmente de união e proteção das fibras. Os modais de falha desses compósitos também irão ser controlado pelas fibras (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

Nos compósitos de fibras curtas ou descontínuas a orientação não é facilmente controlada. Para muitos casos entende-se que a orientação é aleatória, exceto no caso da moldagem por injeção, onde pode ocorrer uma orientação preferencial na direção do fluxo. Pode ocorrer de diferentes áreas do compósito apresentarem diferentes orientações. Fibras curtas podem ser pulverizadas simultaneamente com a resina no molde. Outro modo de produção de compósito de fibras curtas é a formação de pré-formas ou mantas levemente ligadas que são impregnadas com resina. Para todos estes casos as fibras ficam orientadas paralelamente a superfície do molde e aleatoriamente em outros planos. As propriedades dos compósitos reforçados por fibras curtas podem ser isotrópicas. As fibras curtas também podem ser misturadas com as resinas para formar compósitos. Essas fibras tendem a se orientar paralelamente à direção do fluxo do material durante a operação de moldagem por compressão ou injeção e, assim, obter uma orientação preferencial. Compósitos fabricados dessa maneira não são isotrópicos. Suas propriedades dependem, entre outras coisas, do grau de orientação preferencial obtido durante o processo de fabricação (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

Os parâmetros mais importantes que influenciam o grau de reforço em termoplásticos com fibras curtas são apresentados na Figura 11. A resistência mecânica do compósito está relacionada com o comprimento da fibra, orientação, concentração e adesão interfacial. A resistência mecânica de um compósito se desloca ao longo da curva com formato em “S”, sendo

maior ou menor de acordo com o comprimento da fibra. Um aumento na concentração desloca a curva verticalmente para cima. Um aumento no grau de orientação das fibras leva a um aumento da resistência mecânica, assim como a diminuição leva a uma redução dessa propriedade (LOPES; SOUSA, 1999).

Figura 11 - Principais fatores que afetam a resistência mecânica dos compósitos de termoplástico com fibras de vidro curtas



Fonte: Lopes e Sousa (1999).

2.2.2 Fibra de vidro

Há diversos grupos de vidros utilizados para fabricação de fibras de vidro como o vidro de oxinitrito, de fosfato e o de sílica. A classificação principal das fibras de vidro e as propriedades físicas são mostradas na Figura 12. As propriedades físicas e mecânicas das fibras de vidro são mostradas na Tabela 6. De forma geral são utilizadas como reforço para termoplásticos por seu baixo custo, comparado com a fibras de aramida ou a fibra de carbono. A fibra do tipo S (S-glass - *strength*) ou tipo R na Europa, é baseada no sistema $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$, esta fibra tem uma alta resistência em relação a fibras do tipo E. As fibras do tipo S também possuem boas propriedades a altas temperaturas. Outras fibras têm sido desenvolvidas como as do tipo C ou C-glass (*chemical glass*), e do tipo AR (*alkali resistance glass* - resistência alcalina) (OTA, 2004).

O vidro mais utilizado para uso em compósitos é o vidro de sílica (tipo E) que tem como composição 55% de SiO_2 (sílica), 16% de CaO (óxido de cálcio), 15% de Al_2O_3 (alumina), 10% de B_2O_3 (óxido de boro) e 4% de MgO (óxido de magnésio). O uso tem como

efeito melhora em propriedades como resistência ao impacto e rigidez. Outros motivos para sua utilização como carga de reforço está a facilidade de ser estirado em fibras de alta resistência a partir do estado fundido. É um material com grande disponibilidade e viabilidade econômica, pois tem uma ampla variedade de formas de fabricação na forma de compósitos de matriz termoplástica. Apresenta-se na forma de fibra relativa resistência, e, quando incorporado a matriz polimérica, leva a compósitos com resistência específica muito alta. Tem grande inércia química em associação com diferentes polímeros com grande aplicabilidade em ambientes corrosivos (CALLISTER JUNIOR, 2016; OTA, 2004).

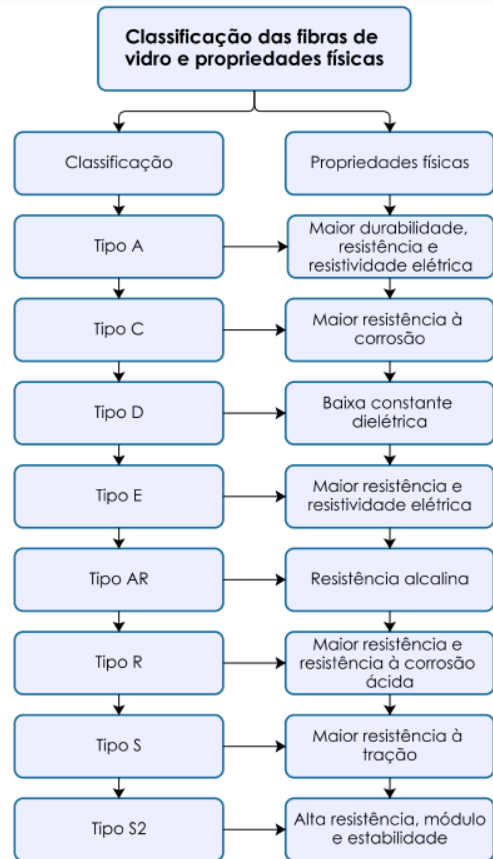
Tabela 7 - Propriedades mecânicas da fibra de vidro.

Tipo fibra de vidro	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (GPa)	Módulo (GPa)	Alongamento (%)
Tipo E	2,58	3,445	72,3	4,8
Tipo C	2,52	3,310	68,9	4,8
Tipo S ₂	2,46	4,890	86,9	5,7
Tipo A	2,44	3,310	68,9	4,8
Tipo D	2,11-2,14	2,415	51,7	4,6
Tipo R	2,54	4,135	85,5	4,8

Fonte: Adaptado de Sathishkumar, Satheeshkumar e Naveen (2014).

O vidro é um ótimo agente de reforço pois tem uma alta resistência a tração e alto módulo. Na forma de fibras tem estabilidade dimensional e não sofrem fluência, conferindo ao compósito estas características. É relativamente inerte quimicamente, com as fibras sendo imunes a ataques biológicos, com boa resistência a solventes e outros produtos químicos. Não são inflamáveis e tem boas propriedades elétricas (OTA, 2004).

Figura 12 - Classificação e propriedades físicas de várias fibras de vidro.



Fonte: Adaptado de Sathishkumar, Satheeshkumar e Naveen (2014).

As fibras, normalmente, têm diâmetros entre 3 μm e 20 μm e sua superfície não é livre de falhas. Durante o processamento por moldagem por injeção as fibras se tornam mais curtas principalmente onde grande tensão é aplicada, como no caso da moldagem por injeção. As propriedades superficiais das fibras de vidro são extremamente importantes. A presença de defeitos superficiais tem capacidade de afetar as propriedades de tração. Estes defeitos são introduzidos pelo atrito ou abrasão com outro material mais duro. Durante a fabricação da fibra de vidro se houver exposição a atmosfera uma camada superficial enfraquecida é formada, interferindo na ligação com uma fase matriz. Durante a fabricação das fibras há revestimento como uma camada de uma substância protetora, protegendo contra danos ou interações não desejáveis com o ambiente. Esta camada é removida durante a fabricação do compósito, no seu lugar é aplicado um agente de acoplamento ou acabamento, que permite uma ligação química entre a fibra e a matriz (CALLISTER JUNIOR, 2016; OTA, 2004).

Para que a fibra tenha o melhor efeito e o nível de tensão máximo seja alcançado, seu comprimento deve ser maior ou igual a um valor crítico. Este valor é conhecido como comprimento crítico. Este comprimento depende da resistência da fibra, do seu diâmetro e da resistência interfacial. Dependendo da relação entre o comprimento crítico e o comprimento

médio da fibra, diferentes mecanismos de falha podem acontecer. Em situações onde comprimento médio for menor que o comprimento crítico a tensão nunca atinge um valor suficiente para quebrar as fibras e mecanismos como arrancamento da fibra irão ocorrer. Caso comprimento médio e o comprimento crítico forem iguais, um pico de tensão pode levar a fratura no centro fibra. Caso valor do comprimento médio for maior que o comprimento crítico, picos de tensão são aplicados no centro da fibra, podendo ocorrer a fratura (OTA, 2004).

2.2.3 Interface, interfase e adesão e mecanismo de reforço.

Nos materiais compósitos existem outros fatores que devem ser observados além de puramente as duas fases envolvidas. Fatores como a interface, interfase, adesão e mecanismo de reforço são muito importantes para as propriedades mecânicas e devem ser analisadas a depender da aplicação desejada. A interface é a região da superfície entre a fibra e a matriz, com espessura zero e tratada como a ligação entre as fases. A interfase é a área adjacente a interface, com espessura finita contada da matriz polimérica e considerada contínua na transferência de tensões entre a fibra e a matriz (OTA, 2004).

A adesão é o efeito que pode surgir do contato íntimo entre a matriz e o material de reforço. Cada combinação específica de materiais leva ao desenvolvimento diferentes tipos de adesão. A adesão depende de vários fatores como presença de impurezas ou agente de acoplamento. Compósitos de matriz polimérica pode ter seu comportamento sob tensão-deformação alterado pelo uso de promotores de adesão e agente de acoplamento. Um importante agente de acoplamento para fibra de vidro são os silanos que alteram a natureza da interface. Os silanos reagem com os grupos hidroxilas da superfície das cargas e com a superfície do polímero, com efeito do aumento da adesão. O principal efeito é o aumento da resistência à tração dos compósitos (OTA, 2004).

Entre os tipos de adesão há a adesão mecânica, adesão eletrostática, adesão química e adesão por interdifusão. A adesão mecânica é um intertravamento ou chaveamento mecânico entre as superfícies. É um mecanismo eficaz para esforços aplicados paralelamente a interface pois aumenta a tensão de cisalhamento. Pode não ocorrer sem a presença de algum outro mecanismo de adesão. A adesão eletrostática ocorre quando as superfícies das fases recebem cargas elétricas, conferindo caráter positivo ou negativo a superfície. Isto promove uma atração eletrostática dependendo da diferença das cargas. Este tipo de interação tem um efeito muito fraco, tendo importância apenas quando as distâncias são de ordem interatômica. A adesão química ocorre entre grupos químicos na superfície das fases. O principal exemplo são os agentes de acoplamento como os silanos que promovem o acoplamento de óxidos da superfície

do vidro com a matriz polimérica. A adesão por interdifusão ocorre pela difusão de átomos ou moléculas dos componentes do compósito (OTA, 2004).

Nos compósitos o grau de adesão interfacial alcançado depende de que o comprimento médio da fibra seja maior que o seu comprimento crítico, assim obtendo uma eficiente distribuição de tensões das fibras na matriz. No caso de compósitos de polipropileno com fibra de vidro a máxima eficiência de reforço e adesão interfacial ocorre quando o valor médio do comprimento das fibras está entre cinco e dez vezes o valor do comprimento crítico. O processamento tem influência na forma oposta a adesão interfacial da fibra de vidro e a preservação do comprimento médio das fibras. Para aumentar a eficiência do reforço na conformação por injeção são utilizados tratamentos superficiais das fibras utilizando agentes de molhamento e agentes de acoplamento interfacial (OTA, 2004).

Nos compósitos de matriz polimérica a interação interfacial tende a ser muito fraca. Para o PP, por exemplo, as reações químicas são muito reduzidas ou inexistentes entre polímero e fibra. As fibras de vidro alteram a morfologia dos compósitos durante o processo de cristalização, atuando como agentes nucleantes, dificultando a formação total de cristais no formato de esferulitos, forçando o crescimento em camadas colunares ao longo da direção normal da fibra (MORAES, 2020; OTA, 2004).

2.2.4 Fabricação de compósitos de matriz polimérica – Moldagem por injeção

A moldagem por injeção consiste em mistura dos componentes do material e levar esta mistura ao estado viscoso, permitindo que seja empurrada para dentro de um molde sob pressão para que ocorra o resfriamento e solidificação da peça. O processo usado para termoplásticos reforçados com fibras descontínuas é o mesmo que para um polímero sem carga. Os grânulos do polímero, reforços e quaisquer outros aditivos são misturados e plastificados através do uso de um parafuso rotativo. O polímero apresenta alta viscosidade de modo que não pode ser injetado no molde por gravidade. Desta forma o parafuso empurra com pressão e velocidades controladas o polímero para dentro da cavidade do molde. Depois da fase de plastificação as fibras podem se quebrar e seus comprimentos podem ser diferentes conforme a posição no molde. Quando a cavidade do molde está totalmente preenchida, a alta pressão é mantida, até que o material seja solidificado. Uma quantidade adicional de polímero deve ser adicionada para limitar e compensar a retração térmica. A peça permanece no molde por algum tempo para que esfrie, após o molde é aberto e a peça removida (LOPEZ, 2018; OTA, 2004).

O processo de moldagem por injeção permite a produção de peças grandes e de geometrias complexas. Por isso é um dos processos mais difundidos na indústria, com curto

tempo para implementação. A confecção de moldes é altamente custosa do ponto de vista financeiro, exigindo grandes investimentos. Este custo está relacionado a alta confiabilidade da geometria final que deve ser apresentada pelas peças. Deformações nas peças estão relacionadas a tensões residuais, que podem afetar o desempenho mecânico. As tensões podem ter origem no escoamento e compactação, não relaxando completamente antes da solidificação pela natureza viscoelástica do material. Neste caso a pressão não desaparece no final do fluxo pelo confinamento na cavidade do molde, uma vez que são tensões fixas induzidas pelo escoamento. Outra possibilidade são tensões devido a contração térmica, associada a um resfriamento não homogêneo. O comportamento termomecânico das peças é governado diretamente pela microestrutura resultante da injeção. Dependendo dos parâmetros de injeção utilizados, o grau de cristalinidade da matriz ou o fator de forma das fibras podem variar muito e defeitos como porosidades podem aparecer (LOPEZ, 2018).

O uso de técnicas de produção como a injeção torna muito eficientes e baratos os produtos de compósitos de fibras curtas em comparação com os processos lentos e complicados para fibras longas, sendo ideais para produção em larga escala. As microestruturas e morfologias produzidas dependem da dispersão, faixa de comprimento e diâmetros das fibras, como as fibras interagem com as paredes do molde e entre si durante o escoamento, da transferência de calor no molde, geometria do molde, etc. (ADVANI, 2012).

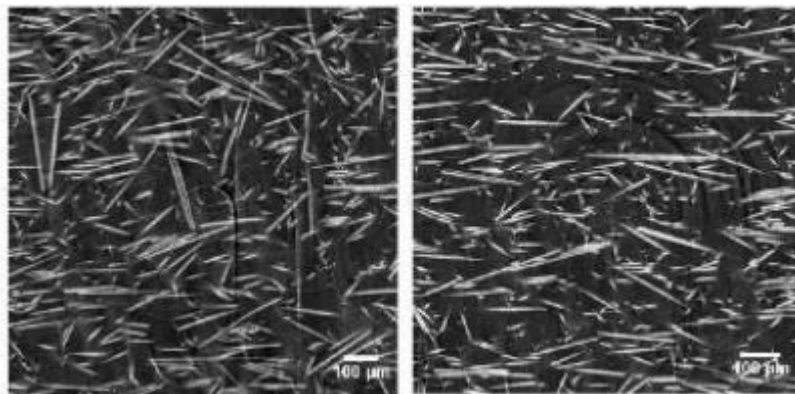
A orientação das fibras, para uma determinada configuração geométrica, é influenciada pela posição dos pontos de injeção, temperatura do molde, velocidade de injeção, velocidade de plastificação, pressão de recalque e temperatura de injeção. A orientação também depende das interações das fibras com elas mesmas, assim como com as paredes do molde. A orientação das fibras também afeta o próprio fluxo, o nível de tensões residuais e, principalmente, a intensidade da anisotropia das propriedades da peça. A tendência principal é que as fibras se alinhem preferencialmente no plano de injeção, durante a fase de preenchimento do molde.

Na

Figura 13 é mostrada uma configuração onde as fibras estão orientadas perpendicularmente no núcleo e aleatoriamente distribuídas na superfície (LOPEZ, 2018).

Figura 13 - Microtomografia de raios-X da PA 6.6 reforçada com 30% de fibras de vidro.

a) fibras aleatórias e b) fibras alinhadas na direção do fluxo.



Fonte: Lopez, 2018.

2.3 SUBSTITUIÇÃO PA 6 FIBRA VIDRO POR PP FIBRA VIDRO

Moraes (2020) estudaram a caracterização e comparação do desempenho mecânico entre compósitos de polipropileno contendo fibras de vidro longas, e de poliamida 6 contendo fibras de vidro curtas. Segundo os autores a PA reforçada com fibra de vidro curta é amplamente utilizada na indústria automotiva. O PP com fibras longas, devido ao seu baixo custo vem se tornando um candidato potencial para substituição de peças metálicas. A comparação das propriedades dos dois compósitos mostrou que com um aumento nos teores de fibras houve um aumento nos módulos elásticos e resistência a tração e a flexão de ambos. A tenacidade e resistência ao impacto mostraram aumento, mas não de forma linear. PP com 40% de fibras longas apresentou maior resistência ao impacto que a PA com 30% de fibra de vidro curta. Concluiu que a similaridade entre várias propriedades demonstra que há grande potencial na substituição do PP com fibra de vidro longa pelo PA com fibra de vidro curta, mas que ensaios na peça real também devem ser realizados.

Corredori (2015) propõe a aplicação de Polipropileno com 35% de Fibra de Vidro em substituição à Poliamida com 35% de Fibra de Vidro na fabricação de Coletores de Admissão em Motores de 03 Cilindros Bi-Combustível. A legislação vem obrigando as empresas do setor automotivo a buscar soluções para a diminuição das emissões de gases do efeito estufa e outras ações para redução de impactos ambientais. Uma das vias utilizadas é a redução de peso, que gera menor arrasto e diminui o consumo de combustíveis. Assim há um crescente interesse em substituir antigas pelas pesadas de metal por peças mais leves em polímeros que tenham alta resistência mecânica e térmica, mantendo a qualidade funcional. O mercado automotivo já utiliza compósitos de PA com fibra de vidro a mais de vinte anos como coletores de admissão.

Hoje estão buscando sua substituição por um compósito mais leve e barato, o PP com fibra de vidro. Este polímero até pouco tempo não era utilizado em aplicações de engenharia, mas hoje é utilizado pela sua alta resistência química e mecânica, boa estabilidade dimensional, flexibilidade, durabilidade e excelente balanço entre impacto e rigidez. A adição de 35% de fibra de vidro em PP de alta cristalinidade resulta em um compósito de aplicabilidade muito próxima a do PA com 35% de fibra de vidro. Apresentou como benefícios a redução de 15% do peso e redução de 15% do custo em relação a PA com carga. Por fim, indica que o material deve ser utilizado para coletores de admissão para motores Ciclo Otto bi-combustível em motores aspirados.

Ota (2004) realizou uma análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional. Tinha por objetivo caracterizar as propriedades mecânicas, térmicas e físicas de compósito de PP com fibra de vidro processados em diferentes temperaturas de injeção e que são utilizados na indústria automotiva para fabricação de ventoinhas do sistema de arrefecimento. O PP apresenta baixo custo e é muito utilizado em conjunto com a fibra de vidro. As principais características para sua utilização são sua maior resistência a tração e a impacto. Foi identificada por microscopia ótica uma redução na quantidade de vazios ou bolhas com o aumento do teor de fibras. Também relatou uma diminuição do arrancamento de fibras da matriz polimérica para temperaturas de injeção entre 170° C e 250° C, indicando que o controle do processo é um importante fator. Outras observações foram diminuição do índice de fluidez com o aumento da concentração de fibras. As fibras são segmentadas no processo de moldagem por injeção, a concentração de fibras não foi alterada com a temperatura, redução da cristalinidade com o aumento da contração das fibras devido a obstrução causada pelas fibras durante o processo de empacotamento das cadeias poliméricas, além de redução da cristalinidade com aumento da temperatura. Houve aumento da resistência à tração e módulo elástico aumentaram enquanto o alongamento diminuiu com o aumento da concentração de fibra. Houve aumento da resistência ao impacto com a concentração de fibras.

Silva e colaboradores (2019) avaliaram o comportamento de compósitos de o PP com fibra de vidro para substituição da carcaça de um elemento filtrante que era produzido com PA e 30% de fibra de vidro. Identificam que peças fabricadas com polímeros de alto desempenho tem sido substituída por outros materiais, como o PP, que é de menor custo. O mais comum é aplicação do PP junto com fibras, resultando em um novo material, com características diferentes de seus constituintes, os compósitos. Os autores analisaram, do comportamento no ensaio de tração, ensaio de flexão, resistência ao impacto, dureza e índice de fluidez. Com o

aumento da concentração de fibra de vidro ocorreu a diminuição da contração do compósito em função da resistência da fibra. Houve aumento da resistência à tração e diminuição do alongamento com o aumento da quantidade de carga. Foi evidenciado que as fibras não aderiram completamente a matriz, mesmo com utilização de agente de adesão. Houve aumento da resistência a flexão, resistência ao impacto com o aumento da carga de fibras. Finalizou indicando que a substituição gera uma redução de custo entre 18% e 22% além de utilizar uma matéria-prima nacional (PP) em comparação com a importada (PA).

Güllü, Özdemir e Özdemir (2006) investigaram a influência das fibras de vidro revestidas com silano em compósito de PP e compósito de PA6. Foram utilizadas cargas de 15% e 30% em massa de fibra de vidro. Observaram que os parâmetros mais importantes que influenciam a resistência a tração e resistência ao impacto são o comprimento e a fração em massa de fibra. O reforço com fibra melhorou a resistência a tração dos compósitos em relação ao polímero puro. O aumento do comprimento da fibra melhorou a resistência a tração e a resistência ao impacto. Aumentar a velocidade da injeção durante a moldagem levou a um aumento de fraturas nas fibras, que se orientaram perpendicularmente em direção ao fluxo. Com aumento da velocidade de injeção houve diminuição da resistência a tração e redução da resistência ao impacto. O aumento da contrapressão de injeção aumentou a resistência a tração e reduziu a resistência ao impacto. Como as propriedades mecânicas do compósito de matriz polimérica são fortemente dependentes da fração peso/volume da fibra e do comprimento da fibra, essas propriedades são determinadas e o comprimento da fibra pode ser controlado de acordo com suas áreas de aplicação. Para obter a distribuição de fibra mais longa, baixa velocidade de rosca e injeção e maior bico de injeção deve ser selecionado.

Lopes e Sousa (1999) relataram a eficiência do reforço em termoplásticos com fibras de vidro curtas depende da preservação do comprimento médio da fibra durante o processo e da otimização das interações na interface. Foram investigadas influência da viscosidade, temperatura, rotação e configuração da rosca numa extrusoras dupla rosca e as interações interfaciais com o agente de acoplamento aminosilano e o compatibilizante interfacial nas propriedades mecânicas dos compósitos de PP com 30% de fibra de vidro em massa. A preservação do comprimento médio das fibras foram as que permitiram uma menor viscosidade, enquanto o aumento da rotação e perfil de cisalhamento mais intenso, reduziram o comprimento médio, mas aumentaram a molhabilidade e a tensão superficial, resultando em aumento da resistência a tração e menor resistência ao impacto. O uso de compatibilizante interfacial resultou em aumentos substanciais da resistência a tração e da resistência ao impacto, pois preservou o tamanho médio das fibras e melhorou adesão interfacial, confirmado pelo MEV.

No recente trabalho de Watanabe e colaboradores (2022) sobre a “foi analisado o comportamento da deformação, em escala molecular, do PP reforçado com fibra de vidro, por uma técnica de imagem de infravermelho por transformada de Fourier reo-óptica (FTIR), baseada em uma análise microscópica FTIR polarizada in situ, combinada com mapeamento de correlação bidimensional de dois traços. Esta técnica, revelou variações na orientação do polímero durante a deformação por tração. As análises de compósitos com fibras simples alinhadas paralelamente e perpendicularmente à direção do alongamento, revelaram claramente que a adição de polipropileno enxertado com anidrido maleico restringe a mobilidade do polímero na interface matriz-fibra e inibe a descolagem interfacial durante o processo de alongamento. A adesão interfacial foi melhorada pelos efeitos de compatibilização do anidrido maleico, que por sua vez contribuiu para melhorar as propriedades mecânicas originadas da transferência de tensão eficiente e redução na formação de fratura na interface.

Hufenbach e coautores (2012) estudaram as propriedades tribomecânicas de compósitos de PP reforçados com fibra de vidro. Como estes compósitos são constantemente utilizados em aplicações estruturais, é muito importante conhecer as propriedades tribológicas do PP, que podem ser melhoradas pela fibra de vidro, permitindo que substituam matérias-primas mais caras como a PA ou o poliacetal. Concluíram que homopolímeros reforçados com pré-formas têxteis de fibra de vidro apresentam um bom potencial para aplicações tribológicas, mas não devem ser utilizados para rolamentos deslizantes, pois suas propriedades são moderadas em comparação com os materiais plásticos clássicos.

2.4 COROA

As bicicletas apareceram em meados do século XIX e desde então vem sendo estudadas e aperfeiçoadas, sendo utilizadas em todos os lugares do mundo para transporte, exercício e diversão. É um produto que ao longo do tempo evoluiu por diferentes necessidades, tais como praticidade, facilidade, agilidade e performance. Nas bicicletas o conjunto responsável por transformar o torque recebido para fazer com que ela saia da inércia é conhecido como movimento central. O movimento central fica localizado na parte central inferior da bicicleta. Une um eixo e dois rolamentos onde estão acoplados braços ou pedivela, onde estão fixados os pedais. No meio deste sistema fica uma engrenagem, que é a coroa (Figura 14). A coroa é uma parte fundamental do sistema de movimentação de uma bicicleta. Ela recebe a tração aplicada pelo ciclista através do pedivela e a transmite pela corrente para o gira das rodas, gerando o movimento (PALMEIRA, 2015).

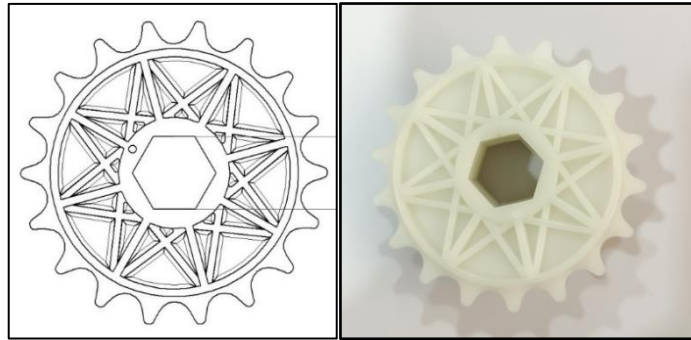
Figura 14 - Representação da coroa no contexto da bicicleta



Fonte: Fonte: MX Bikes Blog (2018).

As coroas a serem produzidas nos materiais estudados, serão utilizadas para produção de bicicletas infantis (Figura 15). Por este motivo é muito importante que a segurança do produto tenha grande importância para os clientes. Do ponto de vista industrial é fundamental que o produto tenha integridade estrutural e seja seguro. A integridade estrutural é necessária para acidentes sejam evitados. Precisa ser evitado que a peça falhe quando entra em serviço. Normalmente as falhas são caracterizadas pelo acúmulo de danos na estrutura, que acarretam alterações permanentes em suas propriedades levando a ineficiência no funcionamento (PAWAR; GANGULI, 2011). Para evitar as falhas é importante conhecer e caracterizar bem o produto. A caracterização é feita pela tomada de medidas, e neste trabalho serão utilizadas principalmente a dureza e a resistência mecânica. Pela descrição de Callister Junior (2016) “A dureza é uma medida da resistência de um material a deformações plásticas localizadas. ”. Já a “resistência mecânica de uma estrutura é a sua capacidade de suportar as solicitações externas sem que estas venham a lhe causar deformações plásticas. ”. Essas propriedades podem ser utilizadas para definir parâmetros para os produtos desenvolvidos. E estes parâmetros podem servir como embasamento para obtenção de produtos mais seguros e confiáveis.

Figura 15 - Coroa



Fonte: Nathor (2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Neste tópico serão apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho.

3.1.1 Coroa

Nos modelos de coroa estudados estima-se que a peça deve apresentar em 21,60 gramas \pm 2 gramas. Para sua produção é utilizado o polipropileno com 30% de carga com fibra de vidro (PP FV).

3.1.2 PP com carga Fibra de vidro

Foi utilizado o polipropileno RTP 0199 x 151265 P NATURAL fornecido pela RTP Company. Neste trabalho será identificado como PP FV. É um polímero reforçado com fibra de vidro curtas na razão de 40% em massa. Entre as propriedades mecânicas melhoradas temos resistência a tração (valor fornecido pela empresa é de 105,1 MPa) e a flexão, aumento da temperatura de deflexão térmica e maior resistência a fluência a longo prazo. Comparativamente na Tabela 5 apresentamos os valores das propriedades do PP individualmente. Observa-se que o PP FV apresenta resistência a tração de aproximadamente 3 vezes maior.

3.1.3 PA6 com carga Fibra de vidro

Foi utilizado poliamida 6 Radilon S ERV300 100 NT fornecido pela RadiciGroup. Neste trabalho será identificado como PA FV. É uma PA6 reforçada com 30% em massa de fibras de vidro curtas. O módulo de elasticidade é de 8900 MPa seco e moldado de acordo com a ISO 16396-2 em ensaio realizado de acordo com a norma ISO 527-2/1A a 1 mm/min.

3.2 METODOLOGIA

Nesta seção descreveremos como foram realizados os procedimentos deste trabalho.

3.2.1 Confeção dos corpos de prova

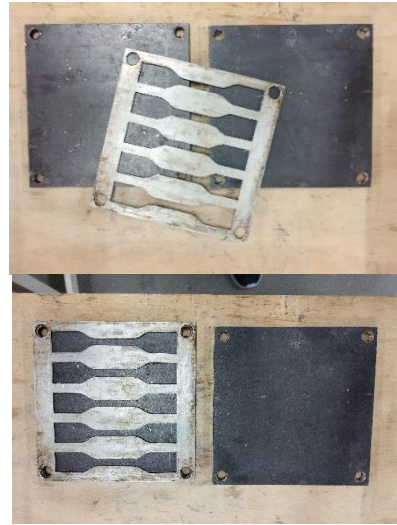
Os corpos de prova foram moldados em uma prensa hidráulica com aquecimento SL-11 fornecida pela Solab Equipamento para laboratórios, conforme apresentado na Figura 16. Foi utilizado um molde em aço com três partes, conforme mostrado na Figura 17. O molde foi preenchido com o polímero para formação dos corpos de prova. Para evitar a adesão do polímero ao molde foram utilizadas folhas de teflon entre a parte interior do molde (parte com recortes no formato dos corpos de prova) e as partes externas. Também foi aplicado desmoldante pelo mesmo motivo para evitar a adesão dos polímeros nas paredes do molde.

Figura 16 - Prensa hidráulica com aquecimento



Fonte: Autor.

Figura 17 - Molde



Fonte: Autor.

A prensa foi aquecida a temperatura de 230° C, com o conjunto de molde mais polímero sendo colocada logo que o equipamento atingiu esta temperatura. O molde e polímero foram mantidos sem pressão por 15 minutos, após este tempo foi aplicada a pressão de 5 toneladas por 5 minutos. Para permitir que houvesse degasagem a pressão foi retirada por 1 minuto, sendo reaplicada a pressão de 5 toneladas por mais 5 minutos. Após este tempo o molde foi retirado da presa quente e colocada em prensa sem aquecimento (Figura 18) por 15 minutos para resfriamento. Após o resfriamento o molde foi aberto e os corpos de provas foram retirados.

Foram produzidos corpos de prova em PP FV e PA FV, sendo que o procedimento acima foi utilizado para produção dos corpos de prova de PP FV. Para os corpos de prova de PA FV além do procedimento descrito foi realizado mais um ciclo de 1 minuto de degasagem e 15 minutos de aquecimento na prensa quente. Exemplo de como ficaram os corpos de prova estão apresentados na Figura 19.

Figura 18 - Prensa hidráulica utilizada para resfriamento dos corpos de prova



Fonte: Autor.

Figura 19 - Corpos de prova PP obtidos



Fonte: Autor.

3.2.2 Ensaio de tração

Para os ensaios de tração foi utilizado equipamento da marca Instron 2300 (Série 23), Piso Coluna Dupla, modelo 23-100 (INSTRON, 2018), localizado no laboratório da sala B022 do bloco B da UFSC Blumenau.

3.2.3 Ensaio de dureza

Para medição da dureza das amostras foi utilizado o durômetro *Shore D* marca Politerm modelo NT85-100.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIO DE DUREZA

Os valores obtidos da dureza permitem classificar os dois materiais como termoplásticos rígidos por apresentarem medidas entre 20 e 100 *Shore D*. Os resultados do ensaio de dureza *Shore D* estão apresentados nas tabelas abaixo:

Tabela 8 - Dureza *Shore D* - PP FV.

PP FV
41,6
41,2
41,3
41,1
40,4
41,5
Média 41,2 ± 0,4

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Dureza *Shore D* - PA FV.

PA FV
38,9
39,5
38,5
39,5
36,6
37,7
Média 38,5 ± 1,1

Fonte: Autor.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

As curvas mostradas na Figura 21 e

Figura 22 apresentam comportamento de um polímero frágil, como na curva A da Figura 4, pois somente apresentam deformação elástica e depois se rompem. Apesar de o PP e PA sejam termoplásticos e o comportamento esperado fosse a da curva B da Figura 4, a adição da carga de fibra de vidro em ambos muda drasticamente seu comportamento mecânico. A adição da fibra de vidro forma um compósito, e este compósito, por sua vez, tem propriedades diferentes, reveladas pelas curvas de tensão-deformação.

A partir dos dados do ensaio de tração do PP FV foram obtidos os valores para o módulo, alongamento na ruptura e resistência a tração, os quais estão tabulados na Tabela 10. Da mesma forma, com base nos dados obtidos nos ensaios de tração da PA FV foram obtidos os valores para módulo, alongamento na ruptura e resistência a tração apresentados na

Tabela 11. Os valores de resistência à tração encontrados foram bem abaixo dos valores indicados pelos fornecedores dos materiais (Tabela 12). Esta diferença possivelmente está ligada a forma como os corpos de prova foram produzidas. O método de produção foi usado a conformação em molde pela aplicação de calor.

Como o material foi adquirido do fornecedor já com a fibra de vidro dispersa nos polímeros, do ponto de vista do aumento da resistência do compósito, não era possível atuar nas variáveis da fração em massa de fibras, concentração de fibras e comprimento das fibras. Assim a variável que estaria disponível para ser alterada no processamento seria a orientação das fibras. O método de produção dos corpos de prova levou a um baixo grau de orientação das fibras. Não houve uma fase onde o polímero no estado viscoso passou por um orifício de injeção para alinhar as fibras, como ocorre na moldagem por injeção. Com isso não foi potencializada as propriedades, principalmente de resistência a tração, pois, uma vez que as fibras de vidros estivessem orientadas na direção da aplicação da tensão, os resultados obtidos poderiam ter sido mais expressivos, conforme indicado na Figura 11. Não houve disponibilidade de equipamentos para permitir que fossem confeccionados corpos de prova por moldagem por injeção.

Como dito anteriormente, o compósito foi adquirido do fornecedor com a fibra de vidro já dispersos nos *pellets* do PP e do PA 6. Como não houve uma fase de homogeneização em que os polímeros pudessem fluir, devem ter restados regiões entre os grânulos que não se fundiram completamente, regiões com falhas, os quais devem levado a redução dos valores obtidos nas propriedades mecânicas em tração. Na Figura 20 apresentamos imagem com corpos de prova que não foram utilizados para realização dos ensaios, Estes corpos de prova apresentam locais em que é visível os contornos dos *pellets*, que são regiões propensas a falhas. Nos corpos de prova utilizados nos ensaios, esses contornos não eram visíveis, mas impurezas ou contaminações podem ter se alojado nesta região impedindo a correta conformação dos corpos de prova.

Pelos mesmos motivos apresentados acima, os valores de alongamento foram maiores que os indicados pela literatura. Ota (2004) encontrou valores entre 1,7% e 2,2% de alongamento na ruptura, valores muito menores que os obtidos em nosso ensaio. O baixo alinhamento, falta de homogeneização durante e as áreas de falha nos contornos dos *pellets* podem dar um indicativo da origem dessas diferenças.

Na comparação entre os dois materiais ensaiados, foi verificado que o PA FV apresentou valores de resistência a tração 52,86% maior, módulo 37,59% maior e alongamento 30,58% maior em comparação com o PP FV. A resistência à tração apresentou comportamento similar, quando comparada ao desempenho das resinas puras. Conforme Ota (2004) o PA puro apresentou valores aproximadamente 45% maiores que o PP puro. Conforme Callister Junior (2016) com relação ao alongamento a PA tem tendência de apresentar maior alongamento que o PP. Quando sob o regime de deformação elástica os polímeros semicristalinos sofrem um

alongamento das macromoléculas das cadeias nas regiões amorfas na direção da aplicação da tensão. O PA tem, de modo geral, menor grau de cristalinidade, comparada com o PP.

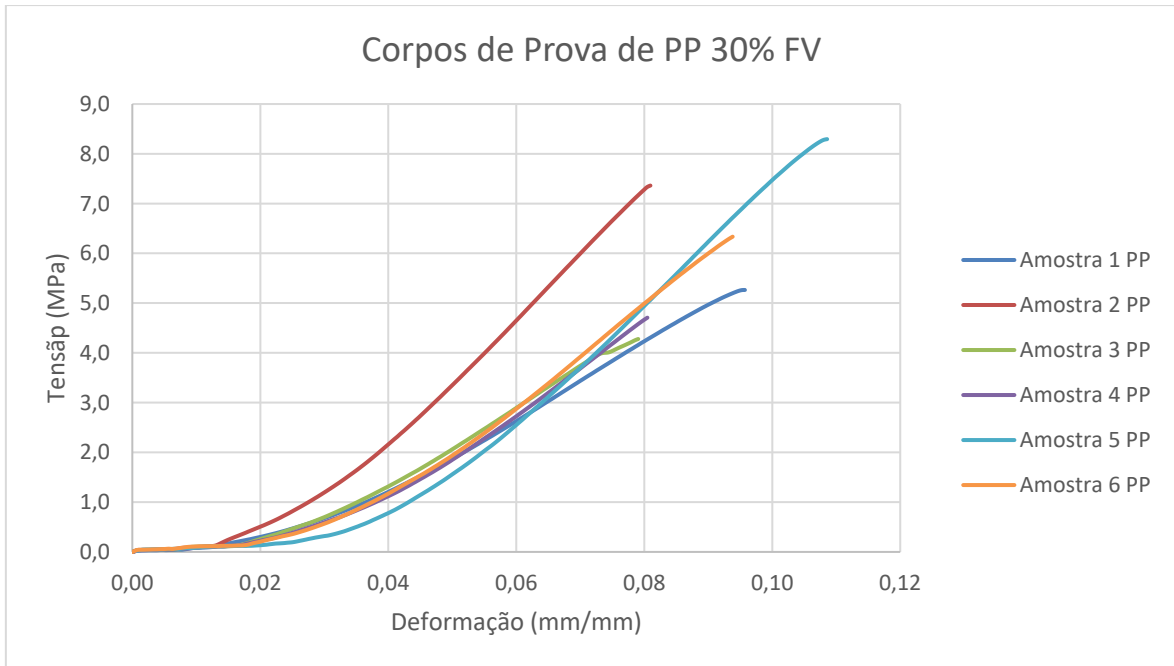
A fato de o método de produção dos corpos de prova apresentar problemas, não inviabilize o método para este tipo de análises deste tipo. Para haver uma melhor preparação, com correções nos parâmetros de processamento. Pode ser melhorada a forma como os pellets foram aplicados no molde afim de evitar contaminações. Deve ser encontrada uma temperatura de trabalho para a prensa de modo que o material flua evitando o aparecimento das áreas de falhas que foram observadas. Pode ser possível a produção de corpos de prova que atinjam valores mais próximos aos encontrados na literatura.

Figura 20 - Corpos de prova não utilizados



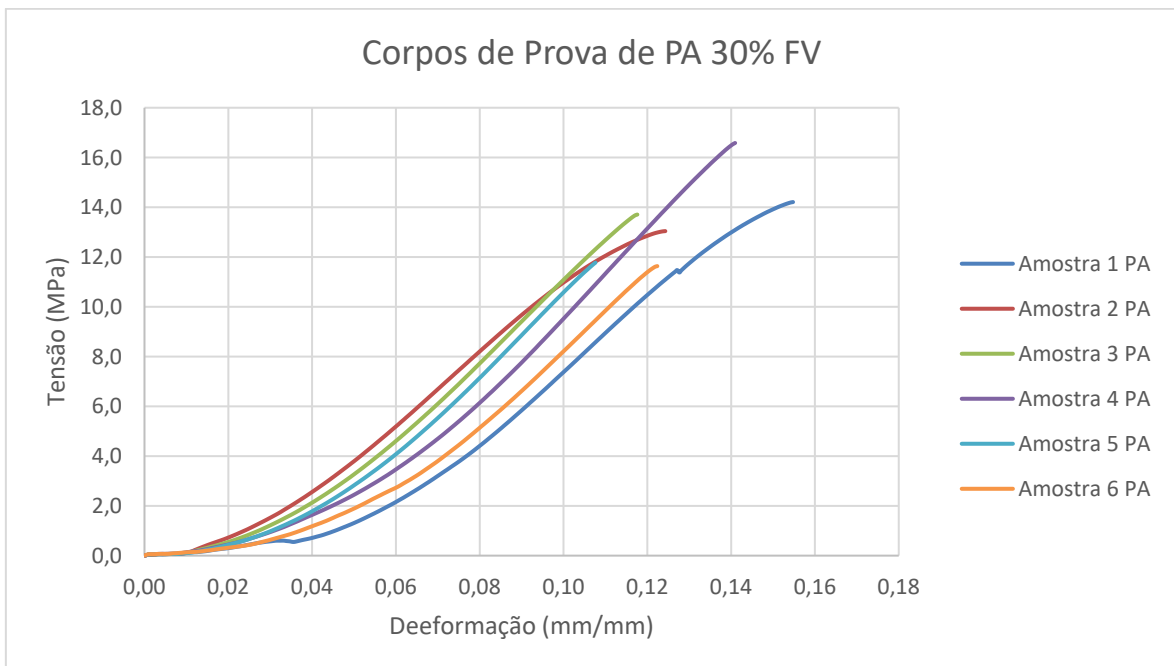
Fonte: Autor.

Figura 21 - Tensão-deformação do PP 30% FV



Fonte: autor.

Figura 22 - Tensão-deformação da PA 30% FV



Fonte: autor.

Tabela 10 - Amostras de PP FV, módulo, alongamento na ruptura e resistência à tração na ruptura.

PP FV			
	MÓDULO	ALONGAMENTO RUPTURA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
<i>Unidade</i>	<i>MPa</i>	<i>%</i>	<i>MPa</i>
AMOSTRA 1	60,56	9,38%	5,20
AMOSTRA 2	97,76	8,05%	7,33
AMOSTRA 3	59,96	7,86%	4,25
AMOSTRA 4	59,87	7,91%	4,58
AMOSTRA 5	83,24	10,71%	8,22
AMOSTRA 6	72,36	9,38%	6,33
MÉDIA	72,29 ± 15,57	8,88% ± 1,15%	5,99 ± 1,58

Fonte: Autor

Tabela 11 - Amostras de PA FV, módulo, alongamento na ruptura e resistência à tração na ruptura.

PA FV			
	MÓDULO	ALONGAMENTO RUPTURA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
<i>Unidade</i>	<i>MPa</i>	<i>%</i>	<i>MPa</i>
AMOSTRA 1	104,73	15,48%	14,21
AMOSTRA 2	121,99	12,43%	8,28
AMOSTRA 3	126,95	11,76%	13,71
AMOSTRA 4	125,87	14,10%	16,58
AMOSTRA 5	116,40	10,76%	11,78
AMOSTRA 6	99,03	12,24%	11,64
MÉDIA	115,83 ± 11,56	12,79% ± 1,70%	12,70 ± 2,82

Fonte: Autor

Tabela 12 - Tabela propriedades materiais estudados

MATERIAL	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	GRAVIDADE ESPECÍFICA
	<i>MPa</i>	<i>kg/m³</i>
PP FV	105,1	1130
PA FV	155,0	1340

Fonte: RadiciGroup (2017), RTP Company Com Term. do Brasil (2022).

Muito embora os ensaios não sejam conclusivos sobre a viabilidade da substituição, a pesquisa bibliográfica também demonstrou que diversos trabalhos indicam a viabilidade da troca de um material pelo outro como apresentado na seção 2.3. A maioria dos resultados apresentado foi para utilização do PP FV em aplicações com alto grau de exigência mecânicas. Principalmente utilizado na indústria automobilística, para aplicações em altas temperaturas,

ambientes corrosivos ou grandes exigências de resistência mecânica. A avaliação da viabilidade da substituição do PA FV pelo PP FV me permitiu conhecer muito bem o que está disponível com relação a esta tecnologia. Foram verificados que diversos autores vêm pesquisando sobre o tema a mais de 3 décadas. Neste tempo já foram desenvolvidas inúmeras soluções, de modo que os fornecedores de insumos já possuem uma grande gama de produtos para atendimento das necessidades das industriais.

A redução de custos e principalmente do uso de matéria prima é de fundamental importância para questões ambientais. A redução do uso de insumos de origem em hidrocarbonetos pode auxiliar na redução dos impactos ambientais. Parte do excedente da economia financeira pode ser utilizada para pesquisas em tecnologias mais “verdes” ou utilizada em ações para gerar mais consciência sobre um correto uso e descarte de materiais poliméricos. Concluo afirmando que a jornada foi árdua, mas necessária, para que possamos ter empresas mais eficientes e um mundo melhor para as próximas gerações.

4.3 VIABILIDADE ECONÔMICA

Considerando o uso comercial dos produtos de compósitos de matriz polimérica é muito importante avaliar se há sentido econômico em uma substituição de materiais. Os custos estão entre os mais importantes fatores para definição de projetos e neste caso não seria diferente.

A PA FV apresenta um valor 23,8% maior no seu custo por quilograma em relação do PP FV (com relação aos preços de mercado praticados no segundo semestre de 2022) conforme informado pela empresa que cedeu as matérias primas para este trabalho. Sem a avaliação das propriedades, uma substituição já tem um bom apelo econômico. Além do custo, o PP FV tem uma densidade menor que a do PA. Conforme a Tabela 12 o PP FV tem uma densidade 15,6% menor que o PA FV, dados corroborados por Silva (2019) que mostra uma redução de aproximadamente 16% no volume em peso de material a ser utilizado. Desta forma, a troca representa um grande benefício do ponto de vista de custos, pois tem grande potencial de redução do custo total para produção da peça, assim como redução de outros custos associados como redução de temperatura, tempo de ciclo total e redução de pressão de injeção (SILVA, 2019).

Contabilizando a redução de matéria prima e redução total do custo, o potencial de economia para a empresa é muito elevado. Conforme apresentado na seção 3.1.1, a peça possui 21,6 g. O consumo diário da peça pronta gira em torno de aproximadamente 2.500 unidades.

Fazendo avaliação no período de 1 ano, considerando 6 dias úteis por semana ou 288 dias de trabalho temos: Redução de mais de 2,5 toneladas de polímeros em matéria prima de PP FV; Redução de 35,70% do custo total de aquisição da matéria prima de PP FV; Redução de 20% do tempo de ciclo de injeção pela maior facilidade de processamento do PP FV; Redução dos custos associados à logística interna e externa com matéria prima; Redução do custo com mão de obra associada ao tempo de processamento; Redução dos custos associados à manutenção de equipamentos e moldes.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal do trabalho foi parcialmente atendido. O trabalho identificou que o PP FV pode ser um candidato para substituição do PA FV. Os ensaios propostos foram realizados (tração e dureza) e foi possível obter os valores para as propriedades de módulo, resistência à tração e dureza. Muito embora as propriedades obtidas apresentem uma considerável diferença entre os materiais, com desfavorecimento ao PP FV.

As propriedades medidas do PP FV apresentaram desempenho numérico em torno de 50% das propriedades do PA FV. As coroas são utilizadas em bicicletas infantis, com indicação de uso para crianças até 1 metro (em torno de 3 a 5 anos). É muito importante que o produto apresente desempenho e segurança adequados ao uso, atendendo a legislação e as expectativas dos responsáveis. Desta forma, não está descartado o uso do PP FV, pois, podem ser realizados mais ensaios e avaliações, principalmente nos componentes em condições de uso.

Em comparação com a literatura os valores obtidos das propriedades estão muito abaixo dos valores citados por outros autores ou mesmo dos valores informados pelos fornecedores. Os gráficos de tensão-deformação apresentaram comportamentos de um material frágil, apresentando uma fratura logo ao término da deformação elástica.

A modalidade disponibilizada para produção das amostras (moldagem por compressão) se mostrou ineficiente em gerar amostras para uma boa avaliação. Após os ensaios foram identificados alguns problemas de descontinuidade. Estes espaços são regiões não contínuas do material que quando as tensões são aplicadas tendem a ser concentradores de tensão que levam a falhas. Concluímos que o polímero não fluiu corretamente, ficando sem preenchimento ou ocorrido algum tipo de contaminação, reduzindo consideravelmente as propriedades mecânicas.

Como as fibras de vidro não tiveram um alinhamento preferencial também houve uma diminuição da potencialidade do reforço das fibras. Se as fibras apresentassem um alinhamento preferencial na direção da aplicação da tensão, os valores das propriedades medidas, como alongamento na ruptura, módulo e resistência à tração poderiam ter auxiliado na obtenção de valores que tendessem mais para os da literatura.

A pesquisa bibliográfica mostrou que outros benefícios secundários aparecem devido à substituição. A substituição leva a uma redução da necessidade de compra de material. A PA 6 apresenta uma densidade maior que o PP, o que faz com que sejam necessárias quantidades menores de material para se obter o mesmo produto final. Além disto, o PP é um polímero de maior facilidade de processamento, com redução de tempo de ciclo, com menor tempo de

utilização do equipamento, levando a redução do desgaste dos moldes e injetoras, assim como também a menor quantidade de mão de obra. Também é possível citar benefícios com a necessidade de transporte e alimentação do material, assim como a redução de emissão de gases do efeito estufa pela redução da movimentação de veículos pesados para movimentação de cargas.

Em relação a questão econômica, não restou nenhuma dúvida que a substituição apresenta grande viabilidade. A redução de custos é intrínseca da substituição, uma vez que o PP tem menor custo que o PA 6. A redução de custos está na faixa de 35%, o que permite um maior investimento em uma investigação mais profunda da substituição por parte da empresa. A redução de custos permite disponibilizar no mercado um produto com a mesma segurança, mas com um custo inferior, atendendo as necessidades dos consumidores.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de outros ensaios (flexão, DSC, tração na peça de PP já produzida, entre outros a serem definidos) para avaliação da viabilidade da troca do PP FV pelo PA FV, principalmente levando em conta as condições de uso.
- Avaliar outras concentrações de fibra de vidro nos polímeros para compensar perdas de propriedade pela substituição do polímero, como vista a identificar uma faixa de concentração ideal.
- Diversos outras peças de bicicletas são produzidas com PA FV sendo possível realizar pesquisa para possíveis outras substituições.

7 REFERÊNCIAS

ADVANI, Suresh G. Molding: short-fiber composites, flow processing. In: NICOLAIS, Luigi; BORZACCHIELLO, Assunta (ed.). **Wiley Encyclopedia of Composites**. 2. ed. Hoboken, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. p. 12.

AGARWAL, Bhagwan D.; BROUTMAN, Lawrence J.; CHANDRASHEKHARA, K.. **Analysis and Performance of Fiber Composites**. 3. ed. Nova Deli, India: John Wiley & Sons, Inc, 2015. 576 p.

ASHBY, Michael; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David. **Materiais: engenharia, ciência, processamento e projeto**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2012. 647 p. Tradução: Arlete Simille Marques. Revisão Técnica: Sérgio Tonini Button.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **The Science and Engineering of Materials**. 7. ed. Boston, Ma, EUA: Cengage Learning, 2016. 898 p.

BAKER, Anne-Marie M.; MEAD, Joey. Thermoplastics. In: HARPER, Charles A. (ed.). **Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites**. 4. ed. Nova York, NY, EUA: McGraw-Hill, 2002. Cap. 1. p. 1-108.

CALLISTER JUNIOR, Willian D.; G. RETHWISCH, David. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro/RJ: LTC, 2016. 910 p. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 280 p.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião Vicente. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo/SP: Artliber, 2003.

CORREDORI, Paulo César. **Aplicação de polipropileno com 35% de fibra de vidro (PP GF35) em substituição à poliamida com 35% de fibra de vidro (PA6 GF35) na fabricação de coletores de admissão em motores de 03 cilindros Bi-combustível**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2015.956383>. Acesso em: 02 set. 2022.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro/RJ: LTC, 2000. 247 p.

GÜLLÜ, Abdulkadir; ÖZDEMİR, Ahmet; ÖZDEMİR, Emin. Experimental investigation of the effect of glass fibers on the mechanical properties of polypropylene (PP) and polyamide 6 (PA6) plastics. **Materials & Design**, Istanbul, Turquia, v. 27, n. 4, p. 316-323, jan. 2006. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.10.013>. Acesso em: 29 set. 2020.

GREENE, Joseph P.. **Automotive Plastics and Composites: materials and processing**. Cambridge, Ma, Eua: Elsevier, 2021. 392 p. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012818008200009X>. Acesso em: 20 nov. 2022.

HUFENBACH, Werner A.; STELMAKH, Aleksander; KUNZE, Klaus; BÖHM, Robert; KUPFER, Robert. Tribomechanical properties of glass fiber reinforced polypropylene composites. **Tribology International**, Dresden, Alemanha, v. 49, n. 1, p. 8-16, maio 2012. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2011.12.010>. Acesso em: 29 set. 2022.

LOPEZ, Delphine. **Comportement d'un thermoplastique renforcé de fibres de verre soumis à des chargements thermo-mécaniques**. 2018. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recherche En Sciences Mécaniques, Institut de Recherche Dupuy de Lôme, Université de Bretagne Sud, Lorient, França, 2018. Disponível em: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01977983>. Acesso em: 10 set. 2022.

LOPES, Paulo Edson; SOUSA, José Alexandrino de. Influência das condições de processamento nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibras de vidro. **Polímeros**, São Carlos, SP, v. 9, n. 1, p. 85-96, 1999. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14281999000100011>. Acesso em: 29 set. 2022.

MASTRO, Paul F. **Plastics Product Design**. Hoboken, Nova Jersey, EUA: Wiley, 2016. Disponível em: <https://www.perlego.com/book/997115/plastics-product-design-pdf>. Acesso em: 10 set. 2022.

MORAES, Everton de. **Caracterização e comparação do desempenho mecânico entre compósitos de polipropileno contendo fibras de vidro longas, e de poliamida 6 contendo fibras de vidro curtas**. 2020. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, SP, 2020. Disponível em: <https://repositorio.fei.edu.br/handle/FEI/3223>. Acesso em: 29 ago. 2022.

MX BIKES BLOG. **Qual é melhor: 1, 2 ou 3 coroas?** 2018. Disponível em: <https://mxbikes.com.br/blog/qual-e-melhor-1-2-ou-3-coroas>. Acesso em: 27 nov. 2022.

NATHOR INDUSTRIA E COMERCIO DE BICICLETAS. **Plano de inspeção Coroa 18 dentes**. Blumenau: NATHOR, 2022.

NOBELPRIZE.ORG. **The Nobel Prize in Chemistry 1963**. 2022. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1963/summary/>. Acesso em: 29 set. 2022.

ODIAN, George. **Principles of Polymerization**. 4. ed. Hoboken, NJ, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 839 p.

OTA, Waldyr Naoki. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2004. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/1285>. Acesso em: 10 set. 2022.

PALMEIRA, Ana Carolina Caliman Sório. **Caracterização dos Sistemas Mecânicos em uma Bicicleta**. 2015. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/28801/28801.PDF>. Acesso em: 15 nov. 2022.

PAWAR, P. M.; GANGULI, R. **Structural Health Monitoring Using Genetic Fuzzy Systems**. London: Springer London, 2011.

RADICI GROUP. **RADILON S ERV300 100 NT**. Gandino, Itália: Radici Group, 2017.

RICHARDSON, Emma. **Investigating the characterisation and stability of polyamide 6,6 in heritage artefacts**. 2009. 374 f. Tese (Doutorado) - Faculty Of Law, Arts And Social Sciences Textile Conservation Centre, University Of Southampton, Southampton, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277860613_Investigating_the_characterisation_and_stability_of_polyamide_66_in_heritage_artefacts. Acesso em: 20 nov. 2022.

RTP COMPANY COM TERM DO BRASIL. **Certificate of analysis**. Barueri/SP: RTP Company Com Term do Brasil, 2022.

SATHISHKUMAR, Tp; SATHEESHKUMAR, S; NAVEEN, J. Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. **Journal of reinforced plastics and composites**, [S.L.], v. 33, n. 13, p. 1258-1275, 8 abr. 2014. SAGE Publications. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0731684414530790>. Acesso em: 20 nov. 2022.

SILVA, Gilmar Cordeiro da; LADEIRA, Geraldo Flávio Ximenes; NASCIMENTO JÚNIOR, Hermano; CARNEIRO, José Rubens Gonçalves. Estudo da substituição do nylon por compósito de polipropileno com fibra de vidro. **Matéria**, Rio de Janeiro/RJ, v. 24, n. 3, p. 1-8, jan. 2019. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0737>. Acesso em: 29 set. 2022.

WATANABE, Ryota; SUGAHARA, Aki; HAGIHARA, Hideaki; MIZUKADO, Junji; SHINZAWA, Hideyuki. Molecular-scale deformation of glass-fiber-reinforced polypropylene probed by rheo-optical Fourier transform infrared imaging combined with a two-trace two-dimensional correlation technique. **Polymer**, Tsukuba, Japão, v. 241, n. 1, p. 124536, fev. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124536>. Acesso em: 29 set. 2022.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. **Plásticos de Engenharia**. São Carlos/Sp: Artliber, 2005. 352 p.