

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA MECÂNICA

MAYRA APARECIDA MODOS

**FABRICAÇÃO E ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CORPOS DE
PROVA DE POLIURETANA REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

MAYRA APARECIDA MODOS

FABRICAÇÃO E ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CORPOS DE PROVA DE POLIURETANA (PU) REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO (FA)

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

FABRICAÇÃO E ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CORPOS DE PROVA DE POLIURETANA REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO

POR

MAYRA APARECIDA MODOS

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado às 08:30 hs do dia 01 de dezembro de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO MECÂNICO, linha de pesquisa – mecânica dos sólidos, no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa - Presidente (UTFPR)

Prof. Dr. Amauri Bravo Ferneda
(UTFPR)

Prof. Me. José Aparecido Lopes Junior

“A Folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação de Curso.”

Dedico este trabalho à minha família e amigos que sempre estiveram me apoiando, independente de serem momentos bons ou não, fazendo com que eu nunca desistisse dos meus objetivos me dando força para alcançá-los.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a Deus por todas as bênçãos concedidas a mim.

À minha mãe, Andréia Costa e Silva Modos, que sempre fez de tudo para que eu pudesse realizar meus sonhos e alcançar meus objetivos.

Ao meu pai, Jorge Aparecido Modos, que sempre torceu por mim e me apoiou.

À minha avó, Maria Pedrina Modos, que assim como uma mãe, sempre me colocou em primeiro lugar fazendo todo o possível para me ajudar nesta caminhada.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

À minhas amigas Flavia Taciane do Nascimento e Karoline Leite, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando, ajudando e me estimulando a sempre seguir em frente.

À minha amiga Amanda Albertin por contribuir com seu mestrado.

Às indústrias KEHL, pelo fornecimento da resina e à empresa Toalhas São Carlos, pelo fornecimento do tecido de fibra de algodão.

Por fim, agradeço a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização desta pesquisa.

A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.

Charles Chaplin

RESUMO

MODOS, Mayra Aparecida. **Fabricação e Estudo do Comportamento de Corpos de Prova de Poliuretana (PU) Reforçados com Fibra de Algodão (FA)**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

O presente trabalho visa à fabricação e à caracterização mecânica do compósito de Poliuretana (PU) derivada de uma blenda de óleos vegetais, fornecida pelo fabricante KEHL, (AG201 Pré-polímero + AG201 Polioliol) com proporção de 1:1, reforçados com lâminas de fibra de algodão (FA), diante dos ensaios de tração. O processo de fabricação utilizado é o de moldagem à vácuo, confeccionando uma bolsa de vácuo (ou vacuum bag), em uma mesa de vidro, onde houve a intercalação entre fibra de algodão e resina na hora do empilhamento das lâminas e, após isso, a retirada de todo o ar por meio de uma bomba de vácuo, que ficou em funcionamento durante 24h, objetivando a obtenção de placas de compósitos laminados de PU + FA. Desta forma, foram fabricados corpos de provas com orientações de fibras em 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° . Após a fabricação os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universal, segundo a norma ASTM D3039 / D3039M – 14 que permite avaliar o comportamento mecânico do compósito em relação ao ensaio de tração. Por fim, os resultados foram obtidos, utilizando a quantidade de 07 camadas de fibra de algodão orientadas a 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° . O compósito apresentou uma melhora significativa, com relação à PU pura, nas propriedades mecânicas, principalmente na tensão máxima suportada a tração, sendo para PU pura 41,73 MPa e para o compósito de 84,841 MPa, porém a deformação se manteve praticamente a mesma. O módulo de elasticidade também aumentou em relação ao apresentado pela PU pura.

Palavras-chave: Poliuretana. Fibra de algodão. Bolsa de vácuo. Caracterização.

ABSTRACT

MODOS, Mayra Aparecida. **Fabricação e Estudo do Comportamento de Corpos de Prova de Poliuretana (PU) Reforçados com Fibras de Algodão (FA)**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2017.

The present work intend at the manufacturing and mechanical characterization of polyurethane (PU) composite derived from a blend of vegetable oils, supplied by the manufacturer KEHL, (AG201 Prepolymer + AG201 Polyol) with a ratio of 1: 1, reinforced with blades from cotton fiber (CF) by means of the tensile tests. The manufacturing process used is vacuum molding. A vacuum bag is made on a glass table, where the intercalation between cotton fiber and the resin happens at the time of the stacking of blades and after that, the removal of all air through a vacuum pump, which was in operation for 24 hours, takes place, obtaining laminated composite plates of PU and CF. Thus, test specimens were fabricated with fiber orientations in 0° , $\pm 45^\circ$ and 90° . After a manufacturing, the tests were performed in a universal test machine according to ASTM D3039 / D3039M - 14, which allows to evaluate the mechanical behavior from the composite in relation to the tensile test. Ultimately, the results were obtained using the amount of 7 layers from cotton fiber oriented at 0° , $\pm 45^\circ$ and 90° . The composite showed a significant improvement in the mechanical properties, especially in the maximum tensile strength. The maximum tensile strength for neat PU is 41.73 MPa and for the composite is 84,841 MPa, however the deformation remained practically the same. The modulus of elasticity also increased in relation to that presented by neat PU.

Keywords: Polyurethane. Cotton Fiber. Vacuum bag. Characterization.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados da PU PURA	41
Gráfico 2 – Resultados da PU + 7FA0°.....	41
Gráfico 3 – Resultados da PU + 7FA45°.....	42
Gráfico 4 – Resultados da PU + 7FA90°.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características da FA.....	26
Tabela 2 - Resultados do comportamento mecânico do compósito de PU pura.....	39
Tabela 3 - Resultados do comportamento mecânico do compósito de PU + 7FA0°.....	39
Tabela 4 - Resultados do comportamento mecânico do compósito de PU + 7FA45°.....	40
Tabela 5 - Resultados do comportamento mecânico do compósito de PU + 7FA90°.....	40

LISTA DE SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CDP	Corpo (s) de Prova
FA	Fibra de Algodão
PU	Poliuretana

LISTA DE ACRÔNIMOS

MATLAB Matrix Laboratory

LISTA DE SÍMBOLOS

GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
mm	Milímetro
E	Módulo de elasticidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Delimitação do tema.....	16
1.2	Problemas e premissas.....	17
1.3	Objetivos.....	17
1.3.1	Objetivos específicos.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Compósitos	18
2.1.1	Compósitos poliméricos reforçados com fibras.....	19
2.1.1.1	Interface fibra/matriz.....	21
2.2	Fibras vegetais.....	22
2.2.1	Fibras de algodão.....	24
2.3	Poliuretana.....	27
2.3.1	Poliuretana derivada de uma blenda de óleos vegetais.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	Metodologia e fabricação.....	30
3.1.1	PU pura – Poliuretana derivada de uma blenda de óleos vegetais.....	30
3.1.2	Poliuretana reforçada com fibra de algodão.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

Há cinquenta anos, os materiais compósitos foram utilizados pela primeira vez em projetos estruturais no setor aeronáutico. Hoje em dia, eles têm sido aplicados em diversos setores, como por exemplo: automobilístico, construções civis, marinha, área médica, etc. Isso se dá devido às diversas vantagens apresentadas pelos compósitos tais como baixo peso associado com alta rigidez e resistência mecânica, que reflete diretamente na eficiência do componente e da estrutura global; grande versatilidade de modelar o material de acordo com os requisitos do projeto, permitindo ainda que o mesmo seja reforçado com fibras; baixo custo e curtos ciclos de produção (TITA, 1999).

O uso de matérias primas oriundas de fontes renováveis tem sido foco de estudos devido à sua grande capacidade em substituir os materiais de derivados petroquímicos, sendo visto como uma prática econômica além de reduzir a utilização de produtos de difícil decomposição. O emprego de fibras naturais, como reforço em materiais compósitos, mostra um grande potencial de melhorar o desempenho de polímeros, além de possuir baixo custo, ser abundante e biodegradável, combinar boas propriedades mecânicas com baixa massa específica e apresentar boa estabilidade dimensional. Além disso, o impacto ambiental gerado por essas fibras em sua produção é bem menor. Um exemplo destas fibras que vem sendo estudadas como carga de reforço, por apresentar propriedades físicas muito promissoras em compósito/fibra, é a fibra de algodão (BORSOI et al., 2011).

A efetividade do reforço fibroso, no compósito, está ligada a escolha da matriz polimérica, orientação, dispersão e comprimento das fibras, propriedades e fração volumétrica dos componentes utilizados (AGARWAL; BROUTMAN, 1990). A junção interfacial entre as fibras e a matriz polimérica é outro fato importante, pois quanto maior a compatibilidade química das fases constituintes, maior será transferência de tensões da matriz para as fibras, o que proporciona um aumento das propriedades mecânicas do compósito. Já tem estudos que mostram que a incorporação de fibras vegetais em compósitos está aumentando o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, além de reduzir o peso do produto final (MERLINI, 2011).

Ainda segundo MERLINI (2011), Dentre as matrizes poliméricas provenientes de fontes renováveis a poliuretana (ou poliuretano) com base em óleos

vegetais vem ganhando espaço no mercado atual e em diversas aplicações como no setor automobilístico, construção civil e embalagens. Esse polímero pode ser produzido pela reação de um diisocianato e de um poliol derivados de óleos vegetais como o óleo de mamona e o óleo de soja, devido ao fato desses óleos vegetais serem abundantes e possuírem rápida renovação. O que desperta maior interesse, por apresentar um maior grupo de hidroxilas, por causa da presença do ácido ricinoléico que corresponde à mais de 90% do ácidos graxos constituintes de sua estrutura, tornando-o assim um poliol natural, é o óleo de mamona.

Cada material, devido à sua composição, apresenta um comportamento diferente quando submetido a condições de esforços. Sendo assim, ensaios de tração são essenciais para a classificação e aplicação dos mesmos.

Visando o uso de materiais de fontes renováveis e com possibilidade de serem utilizados em vários setores tecnológicos (MERLINI, 2011), o presente trabalho tem como objetivo a fabricação de corpos de prova, tendo como matriz PU derivada de óleo de mamona e FA como reforço. Após a fabricação será avaliado o comportamento mecânico do compósito através do ensaio de tração, segundo a norma ASTM D3039 / D3039M – 14, de cada CDP.

1.1 Delimitação do tema

O presente trabalho tem como tema a fabricação de CDP do compósito de PU derivada de uma blenda de óleo vegetais, fornecida pela empresa KEHL e apresentada na forma bicomponente, constando de um pré-polímero e de um poliol, identificados pelo fornecedor como componente A e B, reforçados com camadas de tecido de FA com fios orientados no sentido unidirecional, fornecida pela empresa Toalhas São Carlos. Os compósitos produzidos foram orientados a 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° e ainda realizou-se testes de tração, de acordo com a norma para ensaios de tração ASTM D3039 / D3039M – 14, em cada CDP a fim de avaliar o comportamento mecânico de cada um.

1.2 Problemas e premissas

O grande interesse na utilização dos materiais poliméricos reforçados com fibras se deve ao fato de serem de fontes renováveis e apresentarem uma melhora bastante significativa nas propriedades mecânicas. Dentre as várias características de um material polimérico, duas que podem ser destacadas são: facilidade de fabricação e elevada resistência ao impacto. A resistência ao impacto é de extrema importância porque falhas devido à cargas inesperadas são comuns em condições de serviços e ocorrem com frequência, podendo até resultar em fratura.

Portanto, na escolha de utilização de compósitos poliméricos para determinados fins se faz necessário realizar testes de tração, visando analisar o comportamento mecânico do material quando submetido à esforços.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral fabricar e avaliar o comportamento mecânico, diante dos ensaios de tração, de CDPs do compósito polimérico de PU reforçado com FA unidirecional nas orientações de 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° .

1.3.1 Objetivos específicos

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram alcançados os seguintes objetivos específicos:

- Corte das FA e mistura dos agentes AG201 Pré-polímero + AG201 Polioliol com proporção de 1:1 para a obtenção da resina;
- Fabricação da bolsa de vácuo a fim de obter a placa de PU + FA;
- Corte da placa, de acordo com a norma para ensaios de tração ASTM D3039 / D3039M – 14, para obter os CDPs;
- Realização dos testes de tração nos CDPs;
- Análise dos resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo foi destinado às teorias que abrangem o trabalho, buscando referências em trabalhos já publicados.

2.1 Compósitos

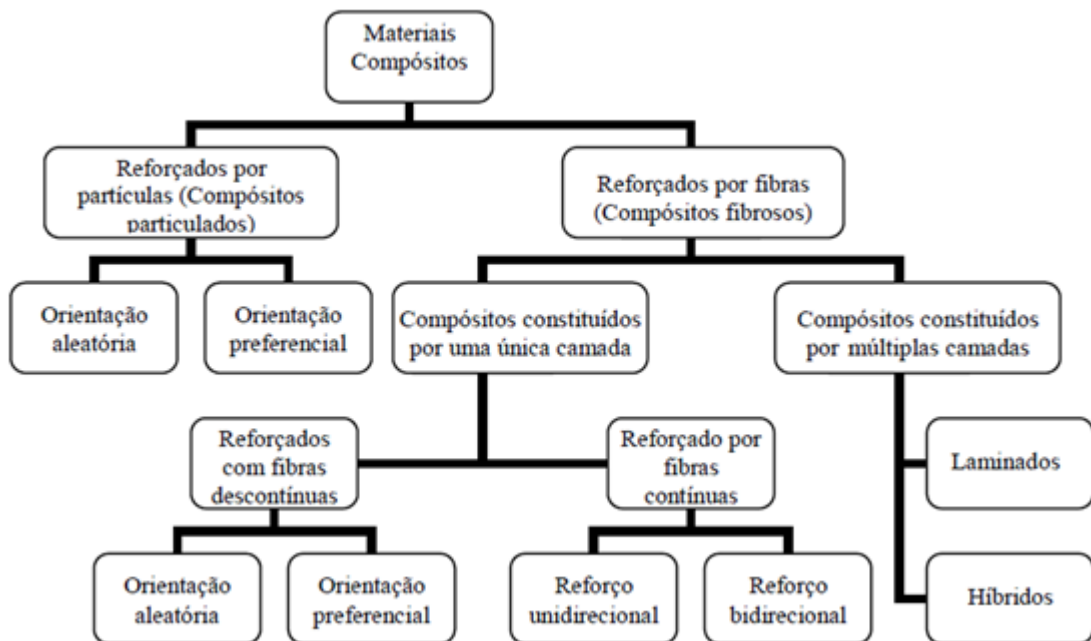
Compósitos são definidos como uma mistura de dois ou mais materiais com diferentes propriedades, composições e estruturas a fim de desenvolver um material formado por duas ou mais fases e com propriedades melhores que as de cada componente. Esses materiais são compostos por uma matriz, fase contínua constituída por material metálico, cerâmico ou polimérico e por uma fase dispersa (FAGURY, 2005).

A função da matriz é de manter a integridade estrutural do compósito por meio da ligação com a fase dispersa por conta de suas características coesivas e adesivas além de fazer a transferência do carregamento para a fase dispersa. A fusão de características físicas e químicas presentes em materiais compósitos com matrizes poliméricas vem acarretando o aumento do uso destes materiais em diversos setores, tais como, aeronáutico, automobilístico, construção civil, área médica, etc. (MEGIATTO, 2006).

A fase dispersa, em compósitos poliméricos, é constituída por um elemento sendo este um agente de reforço ou de enchimento. O material utilizado como reforço é, geralmente, mais rígido e mais resistente que a matriz e seu papel é aprimorar as propriedades mecânicas do polímero, já a carga de enchimento é utilizada para alterar as propriedades da matriz e/ou minimizar os custos (SILVESTRE, 2001).

De acordo com MERLINI (2011), devido à geometria da fase dispersa, os materiais compósitos podem ser classificados da seguinte forma: compósitos particulados, fibrosos e estruturais, como podem ser vistos na Figura 1.

Figura 1 – Classificação de materiais compósitos



Fonte: MERLINI (2011, p.30)

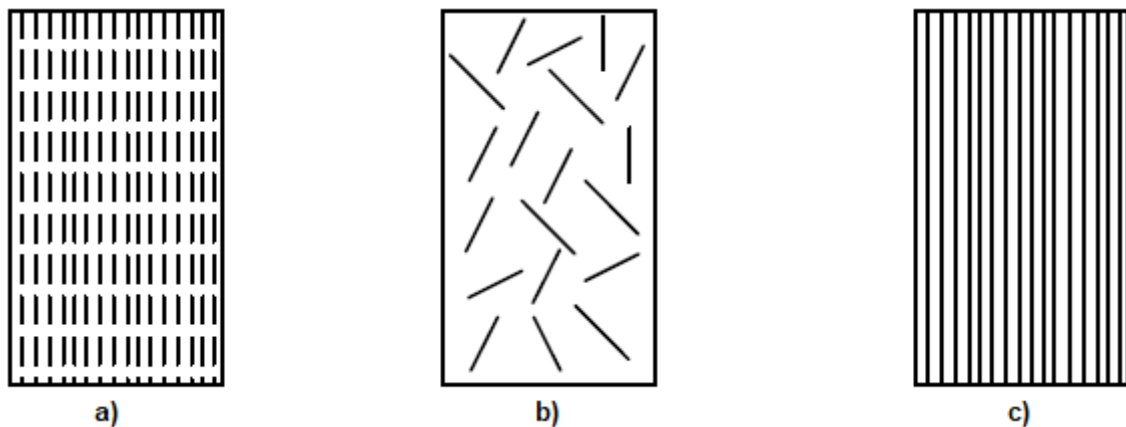
A estrutura de compósitos particulados possui uma fase constituída de partículas espalhadas e partilhadas na matriz polimérica. Geralmente, as cargas particuladas funcionam como enchimento, visando reduzir custos, sem que ocorram variações nas propriedades mecânicas do material compósito quando comparado à matriz polimérica. Em compensação, os compósitos que contém fibras, geralmente possuem propriedades mecânicas melhores que as dos compósitos particulados. As fibras são agentes de reforço com maior eficiência por causa da relação de comprimento com o diâmetro (L/D), também chamada como razão de aspecto, favorecendo uma maior transferência de tensão e capacidade de resistir a esforços mecânicos (MERLINI, 2011).

2.1.1 Compósitos poliméricos reforçados com fibras

De acordo com o ponto de vista tecnológico, os compósitos reforçados com fibras são considerados os de maior importância por apresentarem melhores características específicas (CALLISTER, 2008). Logo abaixo, segue um esquema ilustrativo (Figura 2) das várias formas em que as fibras podem ser obtidas, sendo

elas: contínuas ou descontínuas (curtas), alinhadas ou distribuídas de forma aleatória (MERLINI, 2011).

Figura 2 – Representação esquemática de compósitos reforçados com: a) fibras descontínuas unidirecionais, b) fibras descontínuas aleatórias e c) fibras contínuas unidirecionais



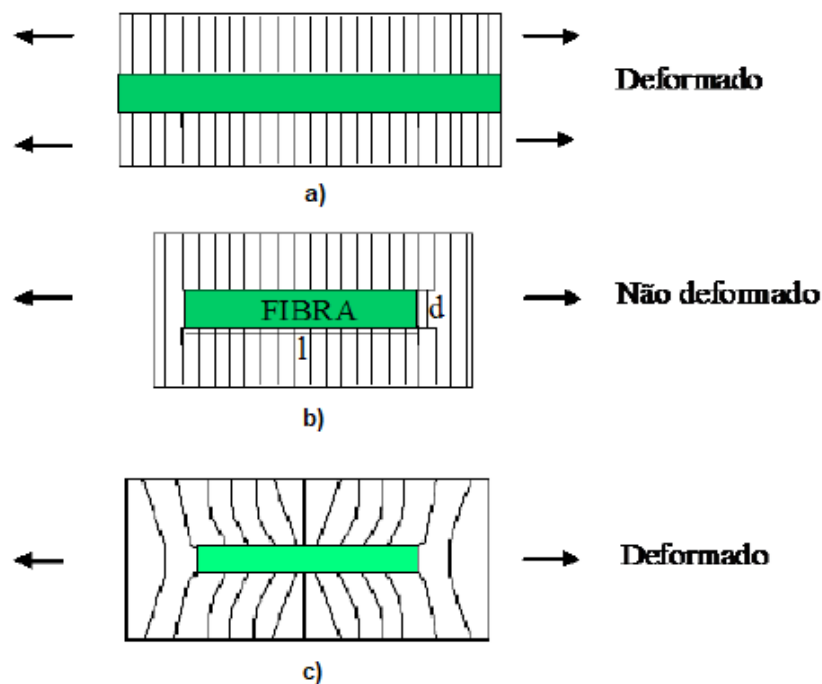
Fonte: MERLINI (2011, p.30)

Segundo CALLISTER (2008), em compósitos que utilizam fibras contínuas como reforço, as características mecânicas decorrem do comportamento tensão-deformação das fibras e da matriz, das frações volumétricas das fases e da direção em que se aplica a tensão.

De acordo com SILVA (2003), na direção das fibras esses materiais apresentam maior rigidez e maior resistência à tração, porém, na direção transversal às mesmas, apresentam baixo desempenho mecânico, devido à isso, a resistência é controlada pelas propriedades da matriz.

Compósitos com fibras descontínuas possuem uma eficiência de reforço menor do que as fibras contínuas, entretanto apresentam maior aptidão de processamento com menor custo, com a capacidade de serem conformados em formas complexas que dificilmente podem ser alcançadas em compósitos com fibras contínuas. Na Figura 3 é mostrado o resultado da deformação em compósitos com fibras contínuas e descontínuas (MERLINI, 2011).

Figura 3 – Efeito da deformação em torno da fibra da matriz sob tensão: a) fibra contínua, b) fibra sem deformação e c) fibra descontínua



Fonte: MERLINI (2011, p31)

Ainda de acordo com MERLINI (2011), dentre os vários parâmetros influentes nas propriedades mecânicas das matrizes poliméricas reforçadas com fibras curtas, pode-se destacar: a distribuição, dispersão, orientação e comprimento, características e frações volumétricas dos elementos e a interface fibra/matriz.

2.1.1.1 Interface fibra/matriz

Segundo MERLINI (2011), a estrutura e as propriedades da interface fibra/matriz têm grande influência nas propriedades mecânicas dos compósitos, por ser através dessa interface que os esforços que atuam na matriz são transferidos para o reforço. Melhorando a adesão interfacial, a transferência de tensões da matriz para a fibra é aumentada, ocasionando o aumento da resistência à tração e do módulo de elasticidade.

Para uma determinada fusão de materiais, têm-se várias formas de adesão entre a matriz e a fibra, tais como:

- Adsorção e molhamento: o molhamento eficaz da fibra pelo polímero retira o ar e espalha-se por toda a área da fibra,

dependendo das tensões superficiais dos elementos. Para que ocorra este sistema, a superfície da fibra deve estar eximida de água;

- **Ligação química:** é a maneira mais eficiente de adesão em compósitos, podendo acontecer com a aplicação de agentes de acoplamento, os quais podem ser usados como elo entre o reforço e o polímero, em virtude da sua dupla utilidade. Segundo BARRA (2004), esses agentes de acoplamento precisam abranger em sua estrutura uma parte que interage com a área superficial da fibra e outra com grupos orgânicos parecidos com as cadeias da matriz polimérica;
- **Interdifusão:** é possível desenvolver uma ligação entre duas superfícies por difusão das moléculas de uma fase na outra. Para que aconteça a adesão, os critérios de solubilidade dos dois elementos devem ser similares;
- **Atração eletrostática:** acontece em faces que possuem cargas elétricas diferentes, como nas interações ácido-base e ligações iônicas, onde a resistência da interface vai depender da densidade de cargas elétricas;
- **Adesão mecânica:** o polímero faz o preenchimento de toda superfície da fibra, ocupando todas as cavidades contidas nessas fibras. Um aumento da rugosidade da superfície ocasionará em um aumento da resistência dessa ligação.

2.2 Fibras vegetais

Um campo que vem se mostrando bastante importante para a utilização das fibras vegetais é o de materiais compósitos, onde elas são usadas como reforço em matrizes poliméricas termorrígidas ou termoplásticas, substituindo assim as fibras sintéticas (SILVA, 2003).

As fibras vegetais são produzidas na maioria dos países e geralmente originadas de materiais lignocelulósicos. Elas podem ser especificadas conforme sua origem no vegetal, podendo ser grupadas em fibras de caule (juta, linho e

cânhamo), fibras de semente (algodão), fibras de fruto (coco) e fibras de folha (bananeira, sisal, carauá). O uso de fibras vegetais é bastante amplo, pois abrange desde as aplicações no setor têxtil até fabricação de vassouras, objetos de decoração e reforços de matrizes poliméricas. (MERLINI, 2011).

Ainda segundo MERLINI (2011), pesquisas envolvendo o uso de fibras vegetais como reforço vêm aumentando cada vez mais por serem de fontes renováveis e possuírem propriedades capazes de substituir as fibras sintéticas.

As fibras vegetais possuem algumas vantagens quanto às fibras sintéticas, como por exemplo, baixo custo, baixa densidade, são menos abrasivas, biodegradáveis, abundantes e de renovação rápida. Apresentam também desvantagens como: baixa temperatura de processamento, com um limite de 200°C, porém, para compósitos com resinas termorrígidas esse aspecto não é um limitante, pois a cura das resinas acontece normalmente em temperaturas abaixo de 200°C; possuem também ausência de uniformidades de propriedades, que decorrem da origem das fibras, da região do plantio e da aptidão manual durante a colheita e a elevada absorção de umidade, que pode ocasionar no inchaço das fibras. Essa absorção pode ser reduzida através da modificação química das fibras e da adesão na interface fibra/matriz (SILVA, 2003). Apesar de apresentarem também características mecânicas inferiores às fibras sintéticas, a densidade das fibras vegetais ($\sim 1,4 \text{ g.cm}^{-3}$) é cerca de metade da fibra de vidro ($2,55 \text{ g.cm}^{-3}$), o que faz com que as características específicas possam ser comparadas com as da fibra de vidro. Outra vantagem dessas fibras, com exceção da fibra de algodão, é a quantidade de energia fundamental para seu processamento, a qual é 80% menor do que a utilizada no processamento de fibras sintéticas.

Segundo MILANESE (2008), os materiais compósitos que utilizam as fibras vegetais como reforço possuem baixa massa específica, baixo desgaste da superfície, baixo custo, são bons isolantes térmico, elétrico e acústico, sem contar com o fato de ser um meio biodegradável e de fonte renovável. A taxa de umidade destas fibras está geralmente entre 5% e 20%.

De acordo com DE SOUSA (2013), as fibras tem grande influência nas propriedades dos compósitos e é expectável que eles tenham elevados módulos de elasticidade e resistência. Geralmente, essas fibras se apresentam em forma circular devido à facilidade de processamento. Com relação ao tamanho das mesmas, elas podem ser longas ou curtas, sendo que as fibras longas proporcionam maior

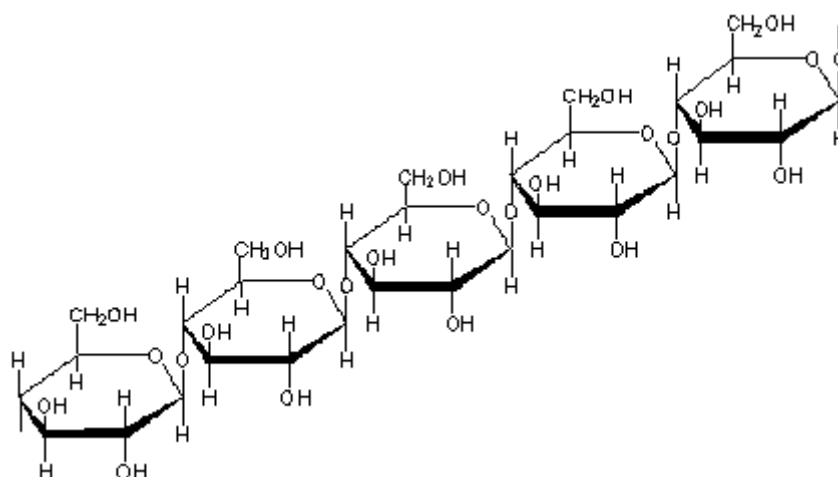
resistência ao impacto e estabilidade dimensional ao compósito. A orientação da fibra também é levada em consideração, pois quando ela está orientada em uma única direção proporciona maior resistência e rigidez no sentido da orientação.

Ainda de acordo com DE SOUSA (2013), os materiais que apresentam fibras contínuas como reforço possuem características mecânicas maiores que os que utilizam fibras descontínuas, apresentando elevada resistência e rigidez na direção das fibras, mas possuem menor desempenho na direção transversal. Porém, mesmo com o desempenho menor, os materiais compósitos constituintes de fibras descontínuas apresentam maior facilidade de processamento e menor custo.

2.2.1 Fibras de algodão

O algodão é uma fibra originada de espécies do gênero *Gossypium*, família *Malvaceae*, que é considerada uma das principais fibras têxteis de produção, tendo seu uso e comércio em larga escala mundial. Essa fibra é considerada, no Brasil, a principal fibra têxtil, onde suas maiores produções estão nas regiões nordeste, sul e centro-oeste do país. A fibra de algodão é formada praticamente de celulose pura. A celulose é um carboidrato cuja fórmula molecular é $(C_6H_{10}O_5)_n$ em que n é alguns milhares. Segue abaixo (Figura 4) a estrutura molecular dela (FINKLER, 2005).

Figura 4 – Estrutura molecular da celulose

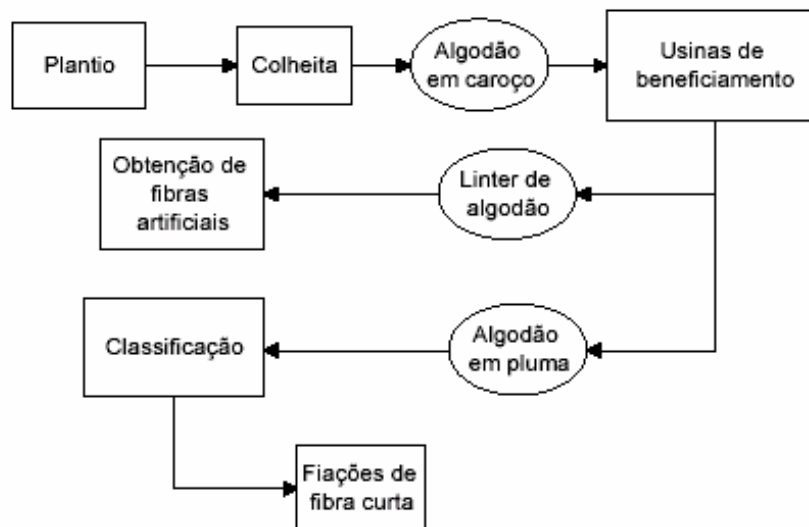


Fonte: FINKLER (2005, p18)

De acordo com FINKLER (2005), a constância da cadeia da celulose e as inúmeras ligações entre o hidrogênio e os grupos hidroxilas das cadeias adjuntas tornam a celulose um material cristalino, insolúvel e infusível, logo não pode ser processada em solução ou no estado fundido.

A fibra de algodão é formada pelos seguintes elementos: 94% celulose, 1,3% proteínas, 1,2% cinzas, 0,9% substâncias pécnicas, 0,8% ácidos, 0,6% cera, 0,3% açúcares e 0,9% não dosados. Essa fibra deve ser modificada para a forma de fio para que se consiga trabalhá-la. Após a coleta elas são ordenadas de forma aleatória e é necessário então cardar o algodão, isto é, desemaranhar as fibras e coloca-las na mesma direção. Este processo possibilita também tirar as poeiras e as fibras curtas demais. Depois da cardação, é possível torcer essas fibras atribuindo a forma de fio. Então, o algodão encontra-se apropriado para se tornar um tecido. A Figura 5 ilustra a obtenção das fibras de algodão (FINKLER, 2005).

Figura 5 – Diagrama para obtenção das fibras de algodão



Fonte: FINKLER (2005, p19)

Ainda segundo FINKLER (2005), o algodão é concedido às indústrias têxteis, pelas usinas de beneficiamento, em forma de pluma, em fardos comprimidos pesando em torno de 200 kg. O tratamento desse algodão, até o alcance dos tecidos acabados, constitui quatro etapas: fiação, tecelagem ou malharia, alvejamento/tingimento e acabamento.

A fibra de algodão pode ser usada de diversas formas, de acordo com a aplicação a que se destina, em oposição com outras fibras. De acordo com FINKLER (2005), as principais são:

- 1) Fios: em linhas de costura e de bordar, confecção de cordas, barbantes, ataduras, etc;
- 2) Tecido: tricoline, organdi, cretone, cetim, riscado, toalha, flanela, etc;
- 3) Malharia: camisas, pijamas, vestidos, etc.

O algodão atribui aos tecidos propriedades como maciez, baixa densidade, frescor, adsorvência, etc, as quais, quase nunca se encontram nos fios sintéticos (FINKLER, 2005).

Na tabela a seguir, são indicadas as características da fibra de algodão no que diz respeito ao meio ambiente, como biodegradabilidade, reciclagem, dentre outras.

Tabela 1 – Principais características da FA

Saúde	É responsável por 24% do consumo de inseticidas e 11% do de pesticidas no mundo, embora utilize 2,4% da área total cultivada. Pode causar bicinose (disfunção pulmonar causada pela aspiração crônica de fibrilas de algodão); Contaminação do solo, da água e da fauna local por pesticidas, inseticidas e fertilizantes.
Ecossistema	Degradação da terra causada por salinização e erosão.
Consumo de energia	Considerada toda a sua vida útil, os produtos de algodão apresentam no total maior consumo de energia que os sintéticos. Os maiores consumos estão focados no combustível para máquinas agrícolas e tratores, na fiação e, principalmente, nos processos de manutenção (lavagem, secagem e passagem a ferro). As principais razões são: necessidade de lavagem mais intensa, maior tempo de secagem em função da maior absorção de água, necessidade de passagem a ferro, grandes perdas no processo de produção, notadamente na fiação (15 a 20%), menor vida útil do produto final.
Durabilidade (possibilidade de reuso)	Média durabilidade.
Biodegradabilidade	Biodegradável

Tabela 1 – Principais características da FA

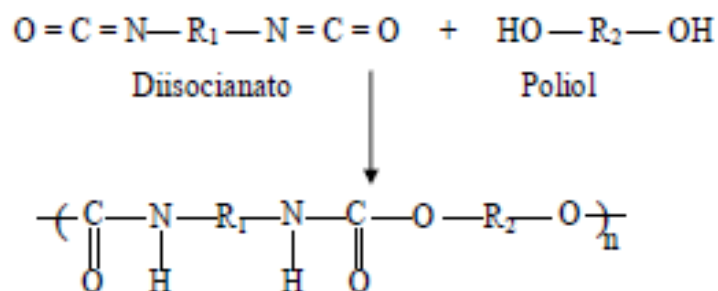
Reciclagem	Pode ser reciclado, mas o pequeno comprimento das fibras dificulta o processo. Os resíduos da fiação são reaproveitados para fios grossos e barbantes.
-------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: ZONATTI (2013)

2.3 Poliuretana

Poliuretana (ou poliuretano) foi desenvolvida por Otto Bayer em 1937. Também conhecido como PU, a poliuretana é geralmente empregada a polímeros que apresentam grupos uretanos formados especificamente pela reação de um diisocianato com um polioliol, como pode ser visto no esquema apresentado na Figura 6 (MERLINI, 2011).

Figura 6 – Representação da reação para formação de uma poliuretana, onde R1 e R2 são diferentes grupos orgânicos



Fonte: MERLINI (2011, p43)

Conforme MERLINI (2011), as matérias-primas mais utilizadas na fabricação das poliuretanas são os di ou poli-isocianatos e os polímeros hidroxilados de baixa massa molar (polióis). Os isocianatos podem ser divididos em três grupos:

- 1) Aromáticos, como o tolueno diisocianato (TDI) e o difenilmetano diisocianato (MDI);
- 2) Alifáticos ou cicloalifáticos, como o hexametil diisocianato (HDI) e o isoforona diisocianato (IPDI);

3) Isocianatos especiais.

Diversos tipos de polióis podem ser utilizados na fabricação de poliuretanas, desde polióis sintéticos (poliéteres ou poliésteres) até compostos naturais como óleos de soja e de mamona.

Segundo LIMA (2007), a cadeia de uma PU constitui-se de uma sequência alternada de segmentos flexíveis e rígidos. Os flexíveis são compostos por moléculas de polióis, que atribuem ao polímero flexibilidade à baixa temperatura e influenciam as características reológicas do material. De acordo com MERLINI (2011), os segmentos rígidos são compostos por isocianatos, que formam as ligações uretanas polares e atribuem características como dureza, resistência à tração e tenacidade do polímero. Logo, as propriedades da PU são instigadas de forma direta pela quantidade e composição do isocianato e do polioliol usados na síntese, sendo capaz de ser preparados para determinadas aplicações por meio da mudança de fatores como: extensão, disposição de segmentos flexíveis e rígidos, razão molar NCO/OH, massa molar e grau de ramificação ou ligações cruzadas das cadeias. Diante disso, é possível obter uma ampla variedade de PUs com diferentes características físicas e químicas. Em virtude dessa variabilidade, as PUs podem ser usadas em diversos tipos de setores como: indústria moveleira, automotiva, calçadista, etc. Seu uso em compósitos poliméricos vem chamando a atenção de indústrias do segmento automotivo, por resultar em elementos com baixa densidade, baixo custo e durabilidade apropriada.

2.3.1 Poliuretana derivada de uma blenda de óleos vegetais

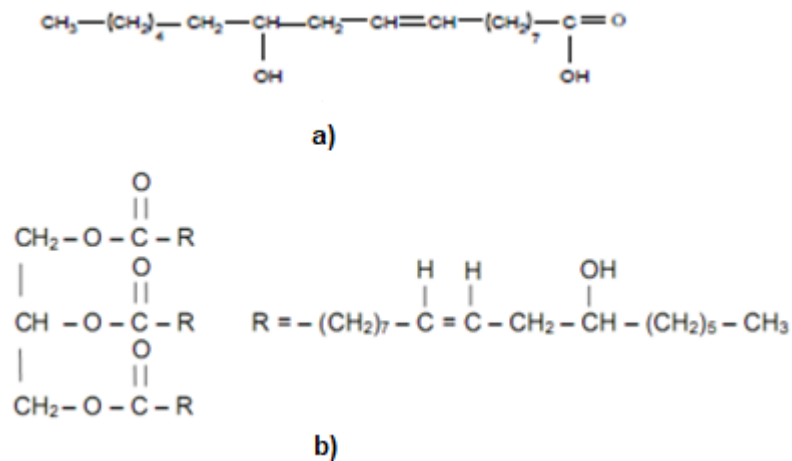
Os óleos vegetais caracterizam um meio interessante para a composição do polioliol por apresentarem triglicerídeos em sua estrutura. Dentre os mais úteis para o desenvolvimento de um polioliol destacam-se o óleo de mamona, de soja e de maracujá.

A extração do óleo de mamona é feita das sementes da planta *Ricinus Communis*, sendo composto de ácidos graxos. Em torno de 90% dos ácidos graxos contidos no óleo de mamona podem ser conferidos ao ácido ricinoléico e os outros 10% conferidos a outros tipos de ácidos como oléicos e linoléicos. A estrutura do ácido ricinoléico é formada por 18 átomos de carbono e possui uma hidroxila no

carbono-12 de sua cadeia, além de apresentar uma dupla ligação cis entre os carbonos 9 e 10, o que o difere de outros ácidos graxos. Tais atributos estruturais e funcionais tornam seu triglicérideo um poliol natural trifuncional, atribuindo ao óleo de mamona algumas de suas propriedades intrínsecas e ativando a molécula tornando-a atingível a muitas reações químicas.

Devido a isso, o uso do óleo de mamona para a associação de PUs torna-se mais atrativo quando comparado aos outros óleos por não haver necessidade de hidroxilação da dupla ligação. A estrutura química do ácido ricinoléico e do óleo de mamona é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Estrutura química: a) ácido ricinoléico e b) óleo de mamona



Fonte: MERLINI (2011, p46)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia e fabricação

Para realizar a análise do comportamento mecânico do compósito de PU reforçado com FA, foram fabricados CDPs de PU pura para serem comparados com CDPs de PU + FA com orientação de 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° , sendo utilizadas 07 lâminas da fibra para cada orientação e, posteriormente realizados testes de tração nos mesmos de acordo com a norma ASTM D3039 / D3039M – 14. A seguir, será descrito o processo de fabricação dos CDPs.

3.1.1 PU pura – Poliuretana derivada de uma blenda de óleos vegetais

A resina utilizada no presente trabalho, fornecida pela empresa KEHL, é a poliuretana derivada de uma blenda de óleos vegetais e é obtida através da mistura e homogeneização de dois componentes: o poliol (componente A – AG201) e o pré-polímero (componente B – AG201), sendo a proporção utilizada é de 1:1. Após a mistura e homogeneização, o polímero é colocado na câmara de vácuo para a retirada do ar, eliminando assim os vazios e, em seguida, é vertido em moldes de silicone e estes são postos no vaso de pressão a 4MPa, onde ficam durante 24h para que a PU sofra o processo de polimerização, possibilitando, então, a desmoldagem dos CDPs (Figura 8).

Após a fabricação, são realizados ensaios de tração nos CDPs permitindo fazer a análise do comportamento mecânico dos mesmos.

Figura 8 – CDP de PU pura



Fonte: Autoria própria

3.1.2 Poliuretana reforçada com fibra de algodão

O processo de fabricação de corpos de prova do compósito de PU derivada de uma blenda óleos vegetais, fornecida pelo fabricante KEHL (AG201 + AG201), com proporção de 1:1, reforçados com 07 (sete) camadas de tecido unidirecional de FA foi através de uma bolsa de vácuo e foi executado da seguinte forma:

- 1) Cortou-se 07 (sete) camadas de tecido de FA no tamanho de 330 x 180 mm. Para a realização desse corte utilizou-se fita crepe para delimitar o tamanho das lâminas de FA unidirecional, bem como possibilitar que essas lâminas não se desfizessem com o manuseio (Figura 9);

Figura 9 - Corte das lâminas de tecido de FA unidirecional



Fonte: Aatoria própria

- 2) Com o tamanho das lâminas de FA, delimitou-se o tamanho da bolsa de vácuo através da fita-dupla face. Dentro da área delimitada para a moldagem foi distribuída uma camada fina de cera a base de carnaúba para facilitar a desmoldagem após o processo de polimerização da placa (Figura 10);

Figura 10 - Delimitação do perímetro da bolsa de vácuo e aplicação de cera a base de carnaúba na superfície do vidro



Fonte: Autoria própria

- 3) Logo após, foi colocado a primeira camada de PEEL PLY (listrado) que objetiva melhorar o acabamento superficial, como pode ser visto na Figura 11;

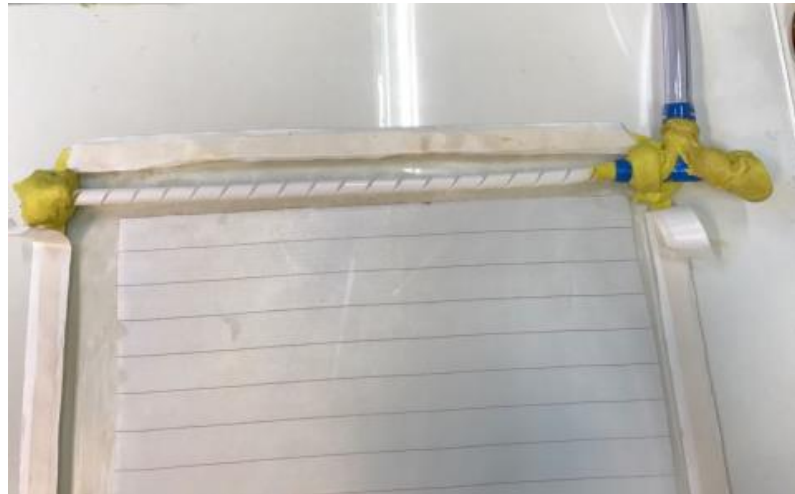
Figura 11 - Primeira camada de Peel Ply



Fonte: Autoria própria

- 4) Em seguida, ocorreu a fixação de uma conexão T e do espiroduto na extremidade da fita para facilitar a retirada do ar de dentro da bolsa (Figura 12), bem como possibilitar que a pressão externa auxilie no processo;

Figura 12 - Fixação da conexão T e do espiroduto



Fonte: Autoria própria

- 5) Foi distribuída, então, a PU (resina) por cima da primeira camada de PEEL PLY onde, das 07 lâminas de FA já cortadas, foram escolhidas 04 lâminas e colocadas alinhadas sobre a camada de PU já vertida (Figura 13);

Figura 13 - Distribuição da PU sobre o Peel Ply e posicionamento das lâminas de FA



Fonte: Autoria própria

- 6) Após posicionamento da primeira parte dessas fibras, é vertida outra porção de PU e distribuída por cima das FA em toda sua superfície (Figura 14);

Figura 14 - PU vertida sobre a primeira parte das lâminas de FA



Fonte: Autoria própria

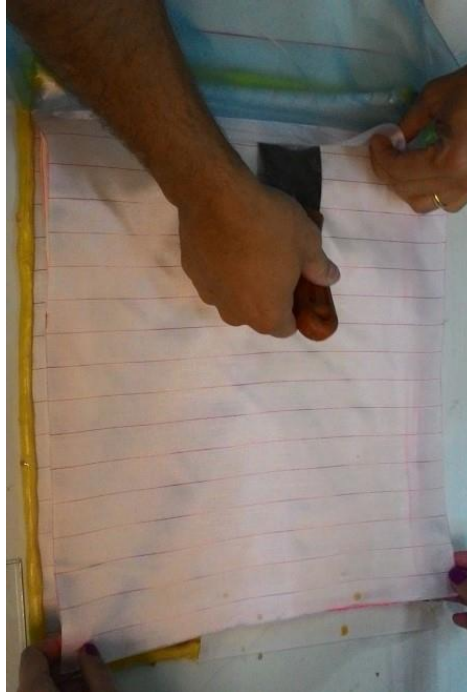
- 7) Na sequência, é posicionada em cima a outra parte das lâminas de FA (03 lâminas) e vertida sobre estas o restante de PU (Figura 15) seguida da segunda camada de PEEL PLY (Figura 16);

Figura 15 - Segunda parte das lâminas de FA impregnadas com PU



Fonte: Autoria própria

Figura 16 - Segunda camada de Peel Ply



Fonte: Autoria própria

- 8) Acrescenta-se a tela distribuidora de resina a fim de garantir uma completa e proporcional distribuição de PU por todo o molde, bem como possibilita o escoamento do ar por toda a bolsa e homogeneidade do vácuo (Figura 17);

Figura 17 - Tela distribuidora de resina



Fonte: Autoria própria

- 9) Por fim, com o plástico a bolsa de vácuo é feita e a completa vedação, com a ajuda da fita adesiva dupla face (Figura 18) e, acionada a bomba de vácuo (Figura 19);

Figura 18 – Bolsa concluída sem a ação da bomba de vácuo



Fonte: Autorial própria

Figura 19 – Bolsa com a bomba de vácuo acionada



Fonte: Autorial própria

A bomba de vácuo fica em funcionamento durante 24h. Feito isso, os corpos de prova são obtidos através do corte da placa de PU + FA, com o auxílio de

um disco de corte, de acordo com as dimensões fornecidas pelas normas de ensaios de tração, ASTM D3039 / D3039M – 14 (Figura 20).

Figura 20 - Corpos de prova obtidos através do corte da placa de PU + FA



Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a fabricação, cada grupo de CDP, sendo: o de PU pura, PU + 7FA0°, PU + 7FA45° e PU + 7FA 90°, foram ensaiados até a ruptura.

O comportamento mecânico dos CDPs, diante dos ensaios de tração, foi analisado por meio do método de Correlação de Imagens Digitais (CID). Este método consiste em uma técnica óptica que determina zonas de deslocamento e deformações sem que haja contato. Essa prática requer um mecanismo óptico para capturar as imagens da área superficial do modelo antes e depois de ser submetido às condições de esforço. Após isso, as imagens são processadas, através de um algoritmo de correlação de imagens, o qual possibilita a obtenção das zonas de deformação e deslocamento.

Para realização do método CID foi necessária a marcação de pontos na superfície do CDP, como pode ser visto na ilustração da Figura 21, uma câmera e um suporte para fixação da mesma, um computador, e alguns softwares como o fotosizer, responsável pela digitalização e organização das imagens e o MatLab, que foi a plataforma utilizada para o desenvolvimento dos programas de correlação de imagens.

Figura 21 – Imagem ilustrativa da marcação de pontos na superfície do CDP



Fonte: Autoria própria

Na Figura 22 tem-se uma imagem do CDP após a deformação.

Figura 22 – Região deformada do CDP



Fonte: Autoria própria

Após os ensaios de tração, foram analisados os resultados obtidos, os quais mostram o comportamento mecânico de cada compósito, que podem ser vistos nas tabelas a seguir.

Tabela 2 – Resultados do comportamento mecânico do compósito de PU pura

Corpos de Prova	Máxima Tensão Suportada (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	41,044	1,527
2	41,73	1,6
3	41,42	1,578

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Resultados do comportamento mecânico do compósito de PU + 7FA0°

Corpos de Prova	Máxima Tensão Suportada (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	75,585	2,630
2	74,622	2,692
3	84,814	2,7612

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Resultados do comportamento mecânico do compósito de PU + 7FA45°

Corpos de Prova	Máxima Tensão Suportada (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	32,864	1,821
2	31,9271	1,806
3	33,364	1,8143

Fonte: Autoria própria

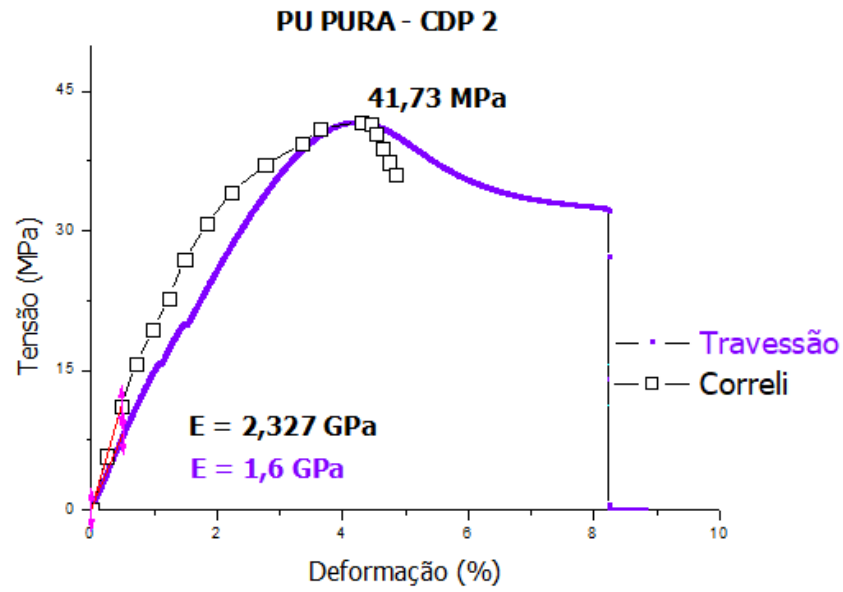
Tabela 5 – Resultados do comportamento mecânico do compósito de PU + 7FA90°

Corpos de Prova	Máxima Tensão Suportada (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	11,173	0,883
2	12,081	0,988
3	12,42	0,928

Fonte: Autoria própria

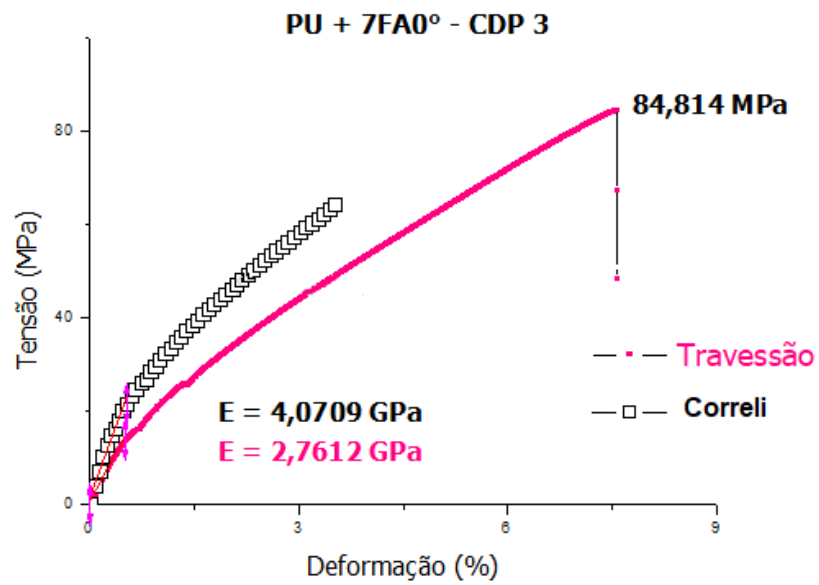
De acordo com os resultados apresentados nas tabelas, comparando os compósitos de PU + FA com o compósito de PU pura, pode-se observar que o compósito de PU + 7FA90° foi o que obteve os piores resultados, com quedas na tensão máxima suportada e no módulo de elasticidade. Já o de PU + 7FA45°, apresentou uma melhora no módulo de elasticidade, porém uma queda na tensão máxima suportada. Portanto, o compósito que apresentou melhores resultados, quando comparado com a PU pura, foi o de PU + 7FA0°, onde a tensão máxima suportada e o módulo de elasticidade foram praticamente dobrados, sendo a tensão para PU pura 41,73 MPa e para o compósito 81,814 MPa e o módulo de elasticidade para PU pura 1,6 GPa e para o compósito 2,7612 GPa. Abaixo, seguem os gráficos, PU pura (Gráfico 1), PU + 7FA0° (Gráfico 2), PU + 7FA45° (Gráfico 3) e PU + 7FA90° (Gráfico 4), para melhor visualização dos resultados.

Gráfico 1 – Resultados da PU pura



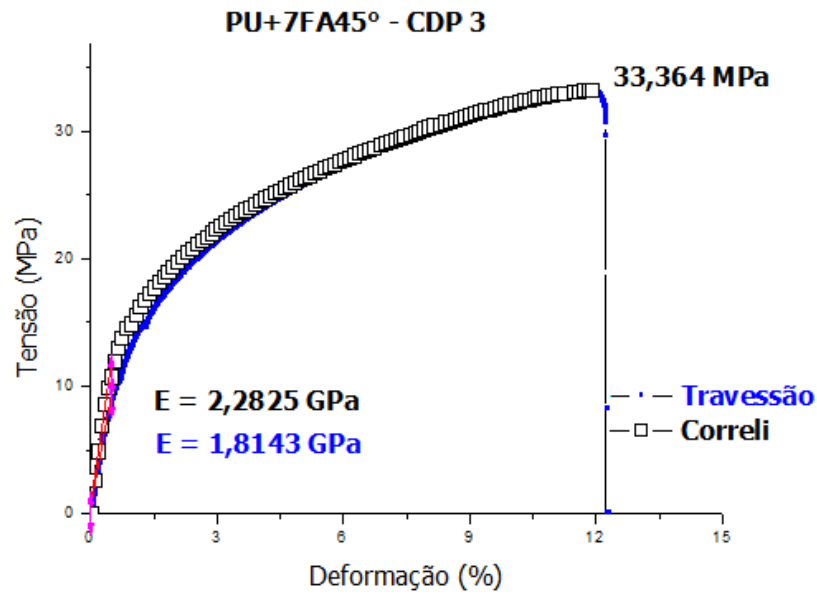
Fonte: Autoria própria

Gráfico 2 – Resultados da PU + 7FA0°



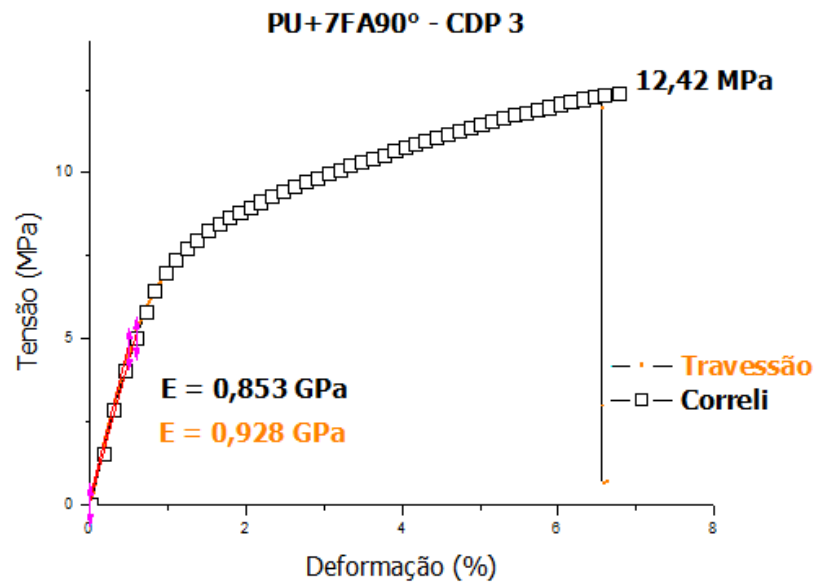
Fonte: Autoria própria

Gráfico 3 – Resultados da PU + 7FA45°



Fonte: Autoria própria

Gráfico 4 – Resultados da PU + 7FA90°



Fonte: Autoria própria

Os resultados do compósito de PU + 7FA0° mostram uma melhora significativa nas propriedades mecânicas, principalmente na máxima tensão suportada e no módulo de elasticidade, porém não houve muita mudança na deformação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o crescente aumento da utilização de materiais poliméricos e compósitos nos diversos setores industriais, o presente trabalho objetivou a fabricação de corpos de prova do compósito de poliuretana derivada de uma blenda de óleos vegetais reforçado com fibra de algodão e, bem como, a realização de ensaios de tração nos mesmos, a fim de avaliar o comportamento destes quando submetidos a esforços. Todo o processo de fabricação e estudo de tal comportamento se deram de forma satisfatória, alcançando assim os objetivos estipulados.

De modo geral, com base nos resultados obtidos, a avaliação do comportamento mecânico do compósito, diante dos ensaios de tração, mostrou-se satisfatória, uma vez que foi dobrada a tensão máxima suportada e ocorreu o aumento do módulo de elasticidade, apesar de a deformação ter continuado praticamente a mesma.

Para possíveis trabalhos futuros, fica como sugestão a realização de outros tipos de ensaios, como por exemplo, torção, flexão, etc., a fim de avaliar e analisar mais a fundo as características mecânicas adquiridas pelo compósito de poliuretana com a adição de fibra de algodão.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, B.D; BROUTMAN, L.J.; Analysis and performance of fiber composites. Second edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, 449 p., 1990.
- ASTM D3039 / D3039M – 14, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- BARRA, G.M.O.; Compósito poliuretano/fibra natural: preparação e estudo da viabilidade de utilização de fibra natural inorgânica. Monografia do concurso público de professor adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- BORSOI, C.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J.; ANGRIZANI, C. C. Obtenção e caracterização de compósito utilizando poliestireno como matriz e resíduos de fibras de algodão da indústria têxtil como reforço. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 21, núm. 4, 2011, pp. 271-279. Laboratório de Polímeros – PGPROTEC – CCET – UCS. Laboratório de Materiais Poliméricos – PPGEM – UFRGS. São Paulo, 2011.
- CALLISTER JÚNIOR, W.D.; Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- DA SILVA, Amanda Albertin Xavier. Comportamento mecânico e de inflamabilidade do compósito de poliuretana derivada de óleos vegetais (PU) reforçado com fibra de algodão e alumina tri-hidratada. QUALIFICAÇÃO – DISSERTAÇÃO – (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2017.
- FAGURY, R,G.V.; Avaliação de fibras naturais para a fabricação de compósitos: Açaí, coco e juta. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.
- FINKLER, M. Desenvolvimento de compósitos com base em rejeito de tecidos de algodão e acrílico em matriz de polietileno de alta densidade. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Materiais. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2005.
- LIMA, V.; Estudo de catalisadores organometálicos na síntese de poliuretanos. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifca Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- MEGIATTO JUNIOR, J.D.; Fibras de Sisal: Estudo de propriedades e modificações químicas visando à aplicação em compósitos de matriz fenólica. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Ciência (Físico-Química), Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.
- MERLINI, C. Análise experimental de compósito de poliuretana derivada de óleo de mamona e fibras de bananeira. Florianópolis, 2011. 78p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

MILANESE, A. C. Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibra de sisal e de vidro. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

SILVA, R.V. Compósito de resina poliuretana derivada do óleo de mamona e fibras vegetais. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

SILVESTRE FILHO, G.D. Comportamento mecânico do poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado com fibra de carbono: Contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

DE SOUSA, L. K. Produção e caracterização mecânica de compósitos de resina de poliuretana à base de óleo de mamona e fibras de rami, sisal e bucha vegetal. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil. Uberlândia, 2013.

TITA, V. Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados. São Carlos, 1999. 125p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ZONATTI, W. F. Estudo interdisciplinar entre reciclagem têxtil e o design: avaliação de compósitos produzidos com fibras de algodão. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Têxtil e Moda, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.