

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
ENGENHARIA MECÂNICA**

GUSTAVO ZUCCO

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE
POLIURETANO REFORÇADOS COM FIBRAS DE ALGODÃO**

JOINVILLE

2024

GUSTAVO ZUCCO

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE
POLIURETANO REFORÇADOS COM FIBRAS DE ALGODÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica no Centro de
Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade
do Estado de Santa Catarina - UDESC

Orientador: Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros

JOINVILLE

2024

GUSTAVO ZUCCO

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE
POLIURETANO REFORÇADOS COM FIBRAS DE ALGODÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica no Centro de
Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade
do Estado de Santa Catarina - UDESC

Orientador: Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros
CCT/UDESC

Membros:

Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros
UDESC/CCT

Profa. Dra. Daniela Becker
CCT/UDESC

Prof. Me. Kelvin Masakazu Kuroki Iwasaki
CCT/UDESC

Joinville, 05 de julho de 2024

AGRADECIMENTOS

A pesquisa por mim concluída foi fruto do esforço de muitas pessoas a quem devo meu reconhecimento.

À Deus por se fazer presente e proporcionar tantas oportunidades.

Meu especial agradecimento à minha mãe, Margit e ao meu pai, Sandro. Toda a educação, paciência, amor e parceria me motivam a sempre querer buscar o melhor de mim, nunca esquecendo os princípios e valores que me passaram.

Ao meu irmão, Marcus, e à minha cunhada, Maria, a quem me espelho e me orgulho todos os dias.

À minha namorada, Patrícia, pelo amor, companheirismo e carinho, me mantendo sempre firme em busca dos objetivos e me incentivando a buscar sempre mais.

Aos meus familiares e à família Coelho por todo suporte.

Ao meu orientador, Professor Ricardo de Medeiros, por me permitir pesquisar um tema tão amado por mim e me guiar em inúmeros desafios. Agradeço sua orientação, o conhecimento compartilhado, a parceria e toda ajuda durante essa jornada.

Ao meu amigo, João Vitor, que dividiu comigo dentro de casa diversas emoções durante essa jornada.

Ao Kelvin, amigo que esteve comigo durante toda minha Iniciação Científica e meu Trabalho de Conclusão de Curso, sempre me incentivando e ajudando com tudo.

Aos Professores que me ajudaram com a realização de ensaios, Marilena Valadares Folgueiras (picnometria de gás, microscópio eletrônico de varredura e Cesar Edil da Costa (estereomicroscópio). Também gostaria de agradecer profundamente ao Jean Carlos Hoepfner pela prontidão em me ajudar em todos os ensaios térmicos (TGA e DMA).

À infraestrutura do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CCT/UDESC).

À Equipe Albatroz Aerodesign, que me alavancou pessoalmente e profissionalmente. Aos membros e ex-membros da equipe por todo o ensinamento repassado a mim.

À Vanessa, que dividiu comigo parte de sua pesquisa, ao João Günther, pela ajuda com a preparação dos corpos de prova para o MEV, e demais membros do Laboratório de Vibrações e Estruturas Leves (LaVEL), que me ensinam e me incentivam a realizar meus objetivos.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) por terem contribuído com a minha formação acadêmica.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC - 2017TR1747, 2019TR779, 2021TR843 e 2023TR563), à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 304795/2022 – 4) e à Döhler S.A. por disponibilizar as fibras de algodão para realização da pesquisa.

À UDESC pelo ensino de alta qualidade.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” - (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Devido a preocupações ambientais e a escassez de matérias-primas, pesquisadores têm buscado alternativas para substituir materiais convencionais com a utilização de insumos *eco-friendly*. Assim, as fibras naturais se destacam em relação aos compósitos fabricados com fibras sintéticas, como o carbono. As fibras naturais pontuam positivamente por serem abundantes na natureza, sendo biodegradáveis e recicláveis, além de não emitirem CO₂ no processo de fabricação das fibras. No cenário brasileiro, a fibra de algodão (FA) se destaca pela sua alta produção, correspondendo a 95% de sua categoria, ao lado de fibras como linho, seda, juta, sisal. A matriz de poliuretano (PU) pode ser derivada do óleo da mamona (fonte renovável), não contendo metais pesados, se tornando um biocomponente econômico. Considerando este contexto, o atual trabalho tem como objetivo a caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano reforçados com fibras de algodão (CPRFA). Análise das frações volumétricas de fibra e matriz foi realizada num estereomicroscópio para cálculo analítico do módulo de elasticidade através da regra das misturas. Para a extração das propriedades mecânicas das fibras, do poliuretano e do compósito, adotou-se as seguintes sequências de empilhamento: [0°]₂, [90°]₄ e [±45°]₈, as quais foram baseadas nas normas ASTM D3039 e D3518. O método de fabricação dos corpos de prova de CPRFA foi a moldagem por transferência de resina assistida à vácuo (VARTM). Finalmente, todas as sequências de empilhamento foram analisadas num microscópio eletrônico de varredura (MEV) para estudo da região fraturada. Os módulos de elasticidade foram retirados após ensaios de tração, sendo o E do PU igual a 0,89±0,22 GPa. Para o CPRFA, o E₁ é de 1,58±0,18 GPa e o E₂ é de 0,99±0,18 GPa. Ainda, a temperatura de transição vítrea do compósito é de 47±2 °C, enquanto a do PU é de 65±2 °C. As frações volumétricas de fibra e de matriz encontradas foram, respectivamente, 70% e 30%. Cálculo analítico através da regra das misturas revelou que os CPRFA possuem fração de vazios de aproximadamente 50%. A fractografia no MEV revelou a presença de vazios nos corpos de prova da CPRFA provenientes do método de fabricação dos compósitos, além da baixa interação entre fibra e matriz.

Palavras-chave: Fibra de Algodão. Poliuretano. Fibra Natural. Material Compósito. Caracterização Mecânica.

ABSTRACT

Environmental concerns and raw material scarcity have driven researchers to seek alternatives to conventional materials, favoring eco-friendly inputs. Natural fibers have emerged as a promising substitute for synthetic fibers, such as carbon, due to their abundance, biodegradability, recyclability, and zero CO₂ emissions during production. In Brazil, cotton fiber (CF) stands out, accounting for 95% of its category, alongside other fibers like linen, silk, jute, and sisal. Polyurethane (PU) matrix, derived from castor oil (a renewable source), is free of heavy metals and solvents, making it an economical biocomponent. This study aims to characterize the thermal and mechanical properties of cotton fiber-reinforced polyurethane composites (CFRPU). The fiber and matrix volume fractions were analyzed using a stereomicroscope to calculate the elastic modulus analytically through the rule of mixtures. Mechanical properties of the fibers, polyurethane, and composite were extracted using stacking sequences [0°]₂, [90°]₄, and [±45°]₈, based on ASTM D3039 and D3518 standards. The CFRPU specimens were fabricated using vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM). All stacking sequences were examined with a scanning electron microscope (SEM) to study the fractured region. The elastic modulus obtained from tensile tests was $E_1 = 1.58 \pm 0.18$ GPa and $E_2 = 0.99 \pm 0.18$ GPa. The glass transition temperature of the composite was 47 ± 2 °C. The fiber and matrix volume fractions were 70% and 30%, respectively. Analytical calculation using the rule of mixtures indicated that CFRPU had a void fraction of approximately 50%. SEM fractography revealed voids in the CFRPU specimens resulting from the manufacturing process and poor fiber-matrix interaction.

Keywords: Cotton Fiber. Polyurethane. Natural Fiber. Composite Material. Mechanical Characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fases de um Compósito	17
Figura 2 – Diferentes Tipos de Compósitos	18
Figura 3 – Disposições das Fibras	19
Figura 4 – Diferentes Tipos de Matriz	20
Figura 5 – Estrutura Molecular dos Termoplásticos.	21
Figura 6 – Estrutura Molecular dos Termorrígidos.	22
Figura 7 – Classificação das Fibras Lignocelulósicas.	26
Figura 8 – Pré-Formas de Fibras Vegetais	27
Figura 9 – Morfologia das Fibras Celulósicas	28
Figura 10 – Desenvolvimento da Planta de Algodão	29
Figura 11 – Cápsula da Planta de Algodão Aberta	30
Figura 12 – Relação Trama:Urdume Fibra de Algodão Döhler S.A.	31
Figura 13 – Fibra de Algodão Fornecida pela Empresa <i>Döhler</i>	33
Figura 14 – Resina de Poliuretano Fornecida pela Empresa Kehl Polímeros	34
Figura 15 – Fluxograma Sequencial das Etapas Realizados	34
Figura 16 – Picnômetro <i>AccuPyc II 1340</i>	35
Figura 17 – Preparo do Molde	36
Figura 18 – <i>Peel Ply</i> Aplicado Sobre o Molde	36
Figura 19 – Fibras Posicionadas Acima da Matriz	37
Figura 20 – Aplicação do Vácuo na Fabricação do Compósito	37
Figura 21 – NETZSCH DMA 242 E Artemis	39
Figura 22 – NETZSCH STA 449 C	40
Figura 23 – Ensaio do Fio de FA	41
Figura 24 – Ensaio de Tração do CPRFA orientado à $[0^{\circ}]_2$	43
Figura 25 – JEOL JCM 7000 <i>NeoScope</i>	45
Figura 26 – Estereomicroscópio Leica MZ9.5	46
Figura 27 – Módulo de Armazenamento em Função da Temperatura do PU	49
Figura 28 – Amortecimento em Função da Temperatura do PU	49
Figura 29 – Módulo de Armazenamento em Função da Temperatura do CPRFA à $[90^{\circ}]_4$	50
Figura 30 – Amortecimento em Função da Temperatura do CPRFA à $[90^{\circ}]_4$	50
Figura 31 – TGA PU	52
Figura 32 – TGA FA	53
Figura 33 – TGA CPRFA	54
Figura 34 – Curva σ (MPa) x ε (%) dos CDP de FA	56
Figura 35 – Curva σ (MPa) x ε (%) do CPRFA à $[0^{\circ}]_2$	57
Figura 36 – Curva σ (MPa) x ε (%) do CPRFA à $[90^{\circ}]_4$	58
Figura 37 – Curva σ (MPa) x ε (%) do CPRFA à $[\pm 45^{\circ}]_8$	59

Figura 38 – CDP de CPRFA ensaiado	61
Figura 39 – $[0^\circ]_2$ com Resolução de $500 \mu\text{m}$	62
Figura 40 – $[0^\circ]_2$ com Resolução de $500 \mu\text{m}$	62
Figura 41 – $[0^\circ]_2$ com Resolução de $100 \mu\text{m}$	62
Figura 42 – $[0^\circ]_2$ com Resolução de $100 \mu\text{m}$	62
Figura 43 – $[90^\circ]_4$ com Resolução de $500 \mu\text{m}$	63
Figura 44 – $[90^\circ]_4$ com Resolução de $500 \mu\text{m}$	63
Figura 45 – $[90^\circ]_4$ com Resolução de $100 \mu\text{m}$	63
Figura 46 – $[90^\circ]_4$ com Resolução de $100 \mu\text{m}$	63
Figura 47 – $[\pm 45^\circ]_8$ Resolução de $500 \mu\text{m}$	64
Figura 48 – $[\pm 45^\circ]_8$ Resolução de $500 \mu\text{m}$	64
Figura 49 – $[\pm 45^\circ]_8$ Resolução de $100 \mu\text{m}$	64
Figura 50 – $[\pm 45^\circ]_8$ Resolução de $100 \mu\text{m}$	64
Figura 51 – $[0^\circ]_2$ com Ampliação de $500\times$	65
Figura 52 – Imagem CPRFA à $[0^\circ]_2$ no Estereomicroscópio Leica MZ9.5	65
Figura 53 – <i>ImageJ</i> revelando frações volumétricas	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas de Diferentes Fibras	14
Tabela 2 – Propriedades Mecânicas de Diferentes Fibras	25
Tabela 3 – Composição Estrutural de Diferentes Fibras	25
Tabela 4 – Dimensões dos CDP de PU	42
Tabela 5 – Dimensões dos CDP Orientados à $[0^\circ]_2$	43
Tabela 6 – Dimensões dos CDP Orientados à $[90^\circ]_4$	44
Tabela 7 – Dimensões dos CDP Orientados à $[\pm 45^\circ]_8$	44
Tabela 8 – Dados de Volume e Densidade da Fibra de Algodão	48
Tabela 9 – Médias e Desvios Padrão das Medições da Fibra de Algodão	48
Tabela 10 – Ensaio de Tração do Fio de Algodão	55
Tabela 11 – Propriedades Mecânicas do PU	57
Tabela 12 – Propriedades Mecânicas dos CDP à $[0^\circ]_2$	59
Tabela 13 – Propriedades Mecânicas dos CDP à $[90^\circ]_4$	60
Tabela 14 – Propriedades Mecânicas dos CDP à $[\pm 45^\circ]_8$	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
CMC	Compósito de Matriz Cerâmica
CMM	Compósito de Matriz Metálica
CMP	Compósito de Matriz Polimérica
CPRFA	Compósitos de Poliuretano Reforçados com Fibra de Algodão
CDP	Corpo de Prova
DMA	Análise Mecânica Dinâmica
FA	Fibra de Algodão
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mm	Milímetro
min	Minuto
PU	Poliuretano
T _g	Temperatura de Transição Vítreá
TGA	Análise Termogravimétrica
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
V _f	Fração Volumétrica de Fibra
V _m	Fração Volumétrica de Matriz

LISTA DE SÍMBOLOS

GPa	Giga Pascal
MPa	Mega Pascal
σ	Tensão
ε	Deformação
W	Watt
K	Coefficiente de Condutividade Térmica
E	Módulo de Elasticidade
%	Porcento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS GERAIS	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	17
2.1.1	Classificação dos Materiais Compósitos	18
2.1.1.1	<i>Compósitos Reforçados com Partículas</i>	18
2.1.1.2	<i>Compósitos Reforçados com Fibras</i>	18
2.1.1.3	<i>Compósitos Estruturais</i>	19
2.2	MATRIZ	20
2.2.1	Poliuretano	22
2.2.2	Degradação Térmica do PU	23
2.3	REFORÇO	23
2.3.1	Fibras Sintéticas	24
2.3.2	Fibras Naturais	24
2.3.2.1	<i>Morfologia das Fibras Celulósicas</i>	27
2.3.2.2	<i>Estabilidade Térmica das Fibras Naturais</i>	28
2.4	ALGODÃO	29
2.4.1	Fibra de algodão	30
2.5	ESTADO DA ARTE	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	MATERIAIS	33
3.2	METODOLOGIA	34
3.2.1	Picnometria de Gás	35
3.2.2	VARTM	35
3.2.3	Análise Dinâmica Mecânica - DMA	38
3.2.4	Análise Termogravimétrica - TGA	39
3.2.5	Ensaio de Tração	40
3.2.5.1	<i>Ensaio de Tração dos Fios de Algodão</i>	40
3.2.5.2	<i>Ensaio de Tração do Poliuretano</i>	42
3.2.5.3	<i>Ensaio de Tração do Compósito de Poliuretano Reforçado com Fibra de Algodão</i>	42
3.2.6	Microscópio Eletrônico de Varredura dos CPRFA	44
3.2.7	Determinação das Frações Volumétricas via Estereomicroscópio	45

3.2.8	Regra das Misturas	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	PICNOMETRIA DE GÁS	48
4.2	ANÁLISE DINÂMICA MECÂNICA - DMA	49
4.3	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA - TGA	51
4.4	ENSAIO DE TRAÇÃO DO FIO DE ALGODÃO	54
4.5	ENSAIO DE TRAÇÃO DO POLIURETANO	56
4.6	ENSAIO DE TRAÇÃO DO COMPÓSITO DE POLIURETANO REFOR- ÇADO COM FIBRA DE ALGODÃO	57
4.7	MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DOS CPRFA	61
4.8	DETERMINAÇÃO DAS FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS VIA ESTEREOMI- CROSCÓPIO	65
4.9	REGRA DAS MISTURAS	66
5	CONCLUSÃO	68
5.1	TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros registros de utilização de materiais compósitos para fins estruturais foram feitos aproximadamente no ano 1500 a.C., quando os egípcios e mesopotâmicos uniram lama e palha a fim de tornar as edificações mais fortes e duráveis (Nagavally, 2017). Desde a década de 1970, a aplicação dos materiais compósitos aumentou significativamente graças ao desenvolvimento de novas fibras, como as de carbono, aramida e sistemas com matrizes feitos de metal e cerâmica (Kaw, 2005). Usualmente, novos materiais surgem devido a necessidade de otimizar a performance e eficiência estrutural. Uma atual manifestação do processo de desenvolvimento de materiais, estruturas e tecnologias está ligada ao aprimoramento dos materiais compósitos, proporcionando novas perspectivas para a tecnologia moderna (Vasiliev; Morozov, 2018).

Os materiais compósitos possuem aplicação na indústria aeronáutica, aeroespacial, náutica e automotiva, podendo também ser utilizados em equipamentos esportivos (Mallick, 2007). A união da fase matriz e da fase reforço proporciona, à estrutura, propriedades que não seriam alcançadas se os materiais fossem estudados individualmente (Mendonça, 2005).

Os compósitos utilizados nas aeronaves comerciais foram aplicados inicialmente em estruturas secundárias, como os profundores, ailerons e estabilizadores. As estruturas eram fabricadas a partir de epóxi reforçado com fibras de carbono de alta resistência, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas de Diferentes Fibras

Aeronave	Componente	Peso (kg)	Redução de Peso (%)
Boeing 727	Estabilizador Horizontal	92	22
Boeing 727	Spoilers da Asa	-	37
Boeing 727	Ailerons, leme, carenagem, etc.	1515 (total)	31
DC-10	Leme Superior	30	26
DC-10	Estabilizador Vertical	378	17

Fonte: Adaptado de Mallick (2007)

Por outro lado, diferentes fibras vegetais originárias de plantas ricas em celulose têm sido estudadas e empregadas na engenharia de compósitos (Satyanarayana; Guimarães; Wypych, 2007). As fibras naturais são opções para substituir as fibras sintéticas uma vez que são provenientes de fontes renováveis, possuem baixo custo e são biodegradáveis, provocando menor impacto ambiental (Mattoso; Ferreira; Curvelo, 1997). Além disso, são encontradas com abundância no meio ambiente e apresentam baixa densidade, fazendo com que suas propriedades mecânicas específicas sejam comparáveis às fibras sintéticas. O processo para obtenção de fibras naturais demanda baixa energia. As fibras de sustentáveis são capazes de neutralizar a poluição proveniente de diferentes tipos de gases (Hargitai; Rácz; Anandjiwala, 2008; Chawla, 2012;

Rajesh; Pitchaimani; Rajini, 2016).

Como desvantagem, há a baixa adesão com algumas resinas poliméricas, a alta absorção de umidade (pela abundante presença de celulose em sua composição), temperatura de fabricação limitada e baixa resistência ao fogo (Azwa et al., 2013).

Recentemente, leis exigem a utilização de materiais renováveis em produtos de engenharia, principalmente na área da mobilidade. A indústria automotiva na Europa deve respeitar a exigência de que aproximadamente 80% de um veículo deve ser produzido a partir de materiais recicláveis, promovendo a economia circular. Diferentes empresas como BMW, Mercedes-Benz e General Motors já utilizam fibras naturais na fabricação de painéis e revestimentos de portas, promovendo uma redução na massa final do veículo de cerca de 40% (Holbery; Houston, 2006).

Na indústria aeronáutica, a aplicação de fibras naturais para redução da massa final de uma aeronave é de total interesse das empresas do setor. Desde 2008, o Grupo de Estruturas Aeronáuticas (GEA) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) é responsável por desenvolver estudos sobre a viabilidade da aplicação de compósitos reforçados com fibras naturais em estruturas aeronáuticas de interior (Vera, 2012; Eloy et al., 2015; Da Costa et al., 2017; Tita et al., 2018; da Costa et al., 2020; da Silva et al., 2022; Silva et al., 2023). E, desde 2016, o Grupo de Vibrações e Estruturas Leves do Centro de Ciências Tecnológicas (CCT) da Universidade do Estado de Santa Catarina desenvolve estudos computacionais e experimentais sobre a aplicação de fibras naturais em estruturas automotivas e aeronáuticas (Iwasaki, 2020; Iwasaki; Reis; De Medeiros, 2022; Iwasaki et al., 2023).

1.1 MOTIVAÇÃO

Tendo em vista que há poucas pesquisas sobre compósitos reforçados com fibras naturais utilizando matrizes poliméricas de fonte natural (principalmente fibra de algodão com matriz de poliuretano), o atual trabalho tem como motivação contribuir com a documentação de potenciais aplicações de compósitos de poliuretano reforçados com fibra de algodão.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo principal deste estudo é a caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano reforçados com fibras de algodão, visando a substituição em estruturas de materiais convencionais.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Estudar a morfologia das fibras de algodão e, posteriormente, executar ensaios quase-estáticos em fibras individuais para a obtenção das propriedades da fibra de algodão.

Por picnometria, calcular-se-á a densidade da fibra de algodão. Também, com o intuito de avaliar o comportamento térmico, realizar a análise termogravimétrica da fibra de algodão, onde as temperaturas de degradações serão reveladas.

- Obter as propriedades térmicas e mecânicas de corpos de prova de poliuretano. Para avaliar o comportamento térmico, utilizará a análise termogravimétrica para obtenção de temperaturas onde ocorrem degradações no material e análise dinâmico mecânica para obter módulo de armazenamento e temperatura de transição vítrea da matriz.
- Fabricar compósitos em todas as direções por *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM), e obter os corpos de prova conforme normas ASTM D3039 (ASTM, 1971) e D3518 (ASTM, 1976). Após a fabricação, determinar as propriedades mecânicas do compósito de poliuretano reforçado com fibra de algodão, como o módulo de elasticidade longitudinal (E_1) e transversal (E_2), além de σ_{\max} e ϵ_{\max} .
- Aferir o comportamento de degradação térmica dos compósitos de poliuretano reforçados com fibras de algodão (CPRFA) através de análise termogravimétrica, além de estimar as frações volumétricas de matriz e de fibra do compósito através de um estereomicroscópio ótico. Os valores de frações volumétricas serão utilizados para calcular propriedades mecânicas do CPRFA de forma analítica através da regra das misturas.
- Analisar a região da fratura dos corpos de prova através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para verificar possíveis vazios e a interface fibra-matriz.

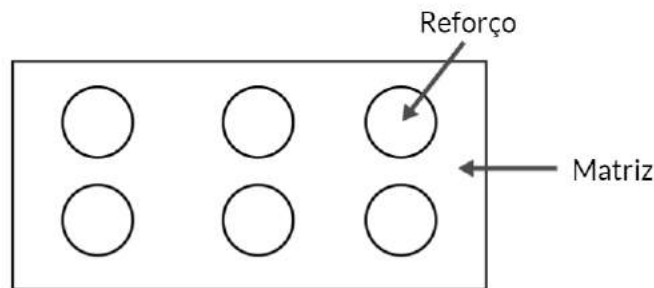
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo principal deste capítulo é realizar a revisão bibliográfica e facilitar o entendimento do conceito de materiais compósitos, abordando matrizes e reforços, suas classificações, características e aplicações.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos se destacam pela combinação, a nível macroscópico, de duas ou mais fases distintas denominadas matriz e reforço, como mostrado na Figura 1. Materiais fabricados a partir de reforços contínuos apresentam uma excelente performance estrutural, considerando-se a resistência e a rigidez específica (razão entre rigidez e a massa específica do material) (Levy Neto; Pardini, 2016). Tanto a fase reforço quanto a fase matriz são capazes de manter suas identidades físicas e químicas, enquanto geram uma combinação estrutural que não seria encontrada em ambas as fases individualmente. Usualmente, as fibras atuam como membros transportadores de carga, enquanto a matriz as mantém no local desejado, atuando como um meio de transferência de carga entre as fibras. A matriz também protege o material de intempéries externas como a elevação excessiva de temperatura e umidade descontrolada (Mallick, 2007).

Figura 1 – Fases de um Compósito



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

A adesão entre fibra e matriz é um aspecto chave na manufatura de compósitos e nas propriedades mecânicas. A fração volumétrica de fibra e de matriz influenciam nas propriedades finais da estrutura. Compósitos reforçados com fibras tem seu desempenho obtido a partir da resistência mecânica e do módulo de elasticidade da fibra, da resistência e estabilidade química da resina e da satisfatória interação entre reforço/matriz para a ocorrência de esforços na interface entre a fibra e a matriz (dos Santos; Sydenstricker; Amico, 2006).

A fração volumétrica de fibra (V_F), a fração volumétrica de matriz (V_M) e a fração volumétrica de vazio (V_V) são parâmetros que quantificam os volumes em porcentagem de fibras, matriz e vazios, respectivamente, quando comparados ao volume total do compósito. Os valores de V_F dependem do processo de fabricação realizado, podendo serem controlados dentro de certos limites (Levy Neto; Pardini, 2016).

Entretanto, a complexa caracterização da estrutura e suas propriedades mecânicas, junto ao alto custo de fabricação são algumas desvantagens dos materiais compósitos. Suas propriedades são baixas quando a força é exercida na direção transversal às fibras (Campbell Jr, 2011).

2.1.1 Classificação dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são classificados de acordo com a matriz e o reforço nas quais são fabricadas. Do mesmo modo que os compósitos são agrupados de acordo com as matrizes, os compósitos também são classificados quanto ao reforço utilizado em sua composição. Eles se dividem em três grupos principais: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e compósitos estruturais (Callister, 2000), como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Diferentes Tipos de Compósitos



Fonte: Adaptado de Callister (2000)

2.1.1.1 Compósitos Reforçados com Partículas

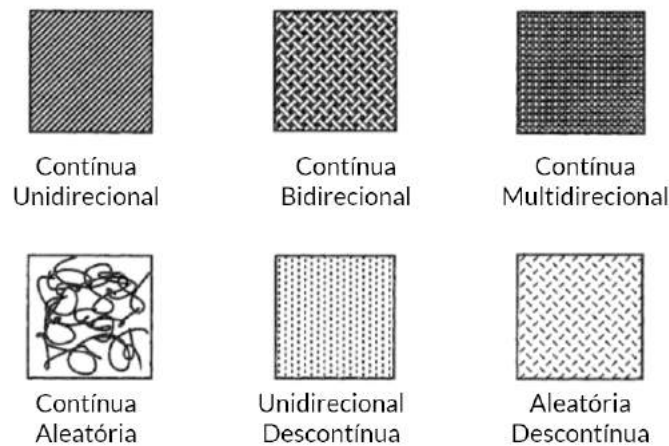
Nesta categoria, há a presença de uma fase particulada (reforço) mais dura e rígida que a fase matriz. Cada partícula, em seu entorno, restringe o movimento da matriz. Quando o compósito está sob solicitação mecânica, a fase matriz transfere parte da tensão para as partículas. Tal transferência de tensão está associado ao grau de interação entre ambas as fases (matriz e reforço) (Callister, 2000). Os compósitos reforçados com partículas são geralmente isotrópicos já que as partículas são adicionadas aleatoriamente (Kaw, 2005).

2.1.1.2 Compósitos Reforçados com Fibras

Tecnologicamente, os compósitos reforçados com fibras são os mais relevantes dentre os demais por apresentarem alta rigidez e módulo específico. A orientação e a forma como as fibras são distribuídas interferem diretamente nas propriedades mecânicas do material. Quando o

compósito é submetido a um carregamento, a matriz transfere parte da carga para as fibras. Nesta categoria, encontram-se as fibras contínuas (alinhadas) e descontínuas (podendo ser alinhadas, parcialmente alinhadas ou alinhadas de forma aleatória), conforme Figura 3. Neste caso, as propriedades mecânicas do compósito são tidas como anisotrópicas, ou seja, dependem da direção na qual a carga é aplicada e da direção em que são medidas as propriedades (Balasubramanian, 2014). A partir de fibras contínuas, pode-se obter fibras unidirecionais, bidirecionais e multidirecional, formando assim o laminado. Estas, quando comparados às configurações de compósitos reforçados com fibras descontínuas ou particuladas, apresentam melhores propriedades mecânicas graças às orientações das fibras estarem na mesma direção da solicitação da carga (Levy Neto; Pardini, 2016).

Figura 3 – Disposições das Fibras



Fonte: Adaptado de Mallick (2007)

2.1.1.3 Compósitos Estruturais

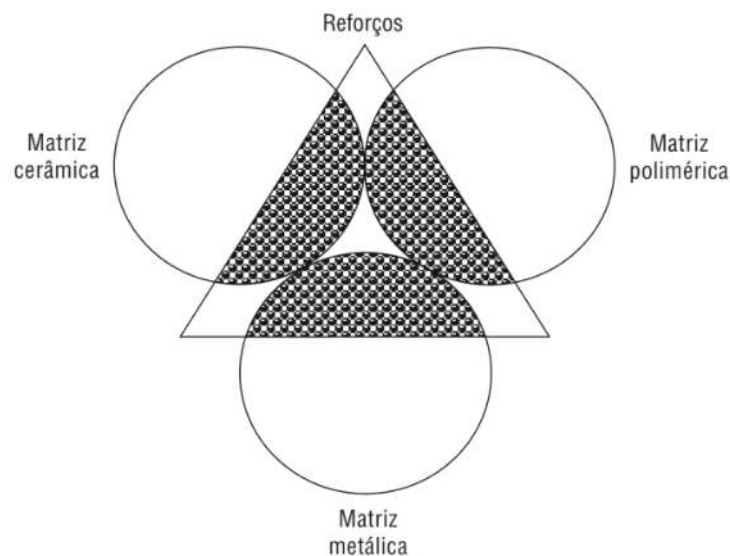
Neste caso, as propriedades finais não dependem apenas das propriedades dos materiais que os compõem, mas também de questões geométricas envolvendo todos os elementos estruturais. Estão contidos nos compósitos estruturais os compósitos laminados e os painéis-sanduíche. Os laminados são formados a partir de lâminas ou painéis bidimensionais, caracterizados por uma direção preferencial de alta resistência. Conforme a sequência de empilhamento das lâminas, a alta resistência não se restringe mais a apenas uma direção. Porém, nenhuma direção terá resistência tão alta quanto se todas as fibras estivessem numa mesma direção. Já os painéis-sanduíche são utilizados como vigas ou painéis de baixo peso, tendo alta rigidez e resistência mecânica. Esta classe de compósitos estruturais constitui os materiais que possuem um núcleo espesso envolto por lâminas externas, separados e unidos por um adesivo. Normalmente o núcleo é leve e apresenta baixo módulo de elasticidade (ao contrário das lâminas) (Callister, 2000).

A seguir será apresentado o conceito da fase matriz, seus diferentes tipos e aplicações.

2.2 MATRIZ

A matriz é a fase contínua de um compósito cujo objetivo é distribuir cargas nas fibras e protegê-las dos possíveis danos durante manuseio e do meio a qual o material está exposto, além de promover a coesão das fibras (Almeida et al., 2012). Destacam-se as matrizes poliméricas (termorrígidas e termoplásticas), cerâmicas e metálicas, conforme Figura 4 (Levy Neto; Pardini, 2016).

Figura 4 – Diferentes Tipos de Matriz



Fonte: Levy Neto e Pardini (2016)

O desenvolvimento de compósitos de matrizes metálicas (CMM) se concentra em três metais: alumínio, magnésio e titânio. Os metais são ligados a outros elementos para otimização de propriedades físicas e mecânicas do material, estas influenciadas por tratamentos térmicos e mecânicos que determinam a microestrutura. Os metais utilizados para compósitos são, em maioria, isotrópicos e dúcteis. Ao contrário de matrizes poliméricas, quando adicionado reforço na matriz metálica, o aumento na rigidez é limitado, embora propriedades como resistência ao desgaste, desempenho de fluência e resistência à distorção térmica alcancem melhorias significativas (Clyne; Hull, 2019).

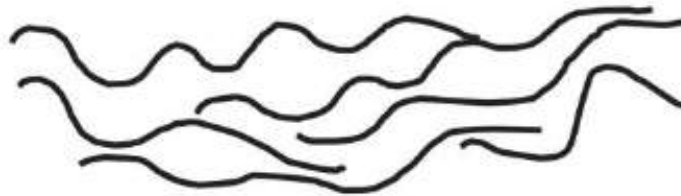
As cerâmicas são materiais compostos por um ou mais metais combinados com um ametal (podendo ser oxigênio, carbono ou nitrogênio). Em geral, as cerâmicas são duras, quebradiças, apresentam baixa uniformidade em suas propriedades e possuem baixa resistência à tração. Em contrapartida, os materiais cerâmicos detêm módulos de elasticidade elevados, baixas densidades, suportando elevadas temperaturas. O objetivo dos compósitos de matrizes cerâmicas (CMC) são endurecer a cerâmica adicionando fibras a ela, promovendo uma maior resistência a altas temperaturas (Chawla, 2012).

Os compósitos de matriz polimérica (CMP) são compostos por uma resina polimérica

(reforço de plástico cuja massa molar é elevada) como matriz e por fibras na fase reforço. Tal gama de matriz é a mais utilizada dentre as demais graças ao seu custo, facilidade no manuseio e pelas suas propriedades à temperatura ambiente. Classificam-se, dentro de polímeros, os termorrígidos (ou termofixos) e os termoplásticos. Enquanto os termorrígidos possuem estrutura rígida (que não podem ser alteradas), os termoplásticos também possuem estrutura rígida, mas sua forma pode ser modificada. (Callister, 2000). Ambos apresentam limitação na faixa de temperatura de aplicação, sendo suscetíveis à degradação ambiental, possuindo baixas resistências transversais (Akovali, 2001).

Materiais convencionais como metais e cerâmicas podem ser substituídos por polímeros termoplásticos, que vêm ganhando destaque em razão de suas propriedades como baixa densidade, baixo custo e alta resistência mecânica, além da capacidade de serem totalmente reciclados (Pereira, 2009). Esta classe de polímero possui a estrutura molecular mais simples entre as demais: ligações lineares ou ramificadas (Figura 5). O termoplástico precisa ser aquecido até atingir o seu ponto de fusão, momento no qual será moldado e solidificado assim que resfriado. O polipropileno, polietileno, poliestireno e o policloreto de vinila (PVC) são alguns exemplos de polímeros termoplásticos (Biron, 2012).

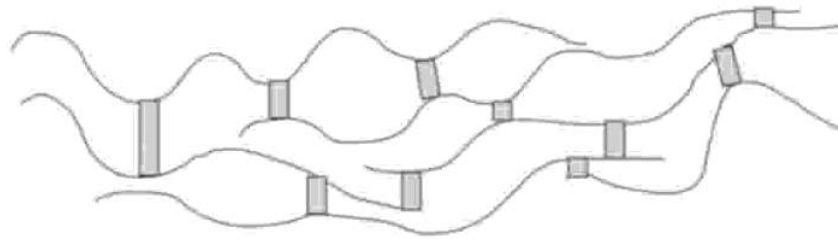
Figura 5 – Estrutura Molecular dos Termoplásticos.



Fonte: (Biron, 2012)

Os polímeros termorrígidos apresentam ligações covalentes entre as cadeias (Figura 6). Também possuem a transição líquido para sólido irreversível (nos termoplásticos é reversível). Para transformar o polímero em fase líquida novamente, seria necessário a quebra das ligações químicas cruzadas. Porém, a energia de ligação delas é a mesma das ligações covalentes (principais), levando à degradação do material (Pascault; Williams, 2013). Os termorrígidos possuem como característica alto alongamento e baixo módulo. Polímeros elastoméricos (classe de termorrígidos) diferem, tendo baixos alongamentos com alta resistência à compressão (Cheremisinoff, 1989).

Figura 6 – Estrutura Molecular dos Termorrígidos.



Fonte: (Biron, 2003)

Os elastômeros são uma classe polimérica onde o material possui alta deformação reversível (cadeias flexíveis, sendo baixo grau de interação entre moléculas e presença de ligações cruzadas) (Dodiuk, 2021). Na temperatura ambiente são capazes de se deformar em, no mínimo, duas vezes o seu tamanho inicial. Também tem a capacidade de retornar ao seu comprimento anterior logo após retirar a carga aplicada ao material. Os elastômeros admitem deformações acima de 200%, mantendo boa resistência à tração quando deformado (Canevarolo Jr, 2002).

As matrizes poliméricas termorrígidas são compostas pela mistura dois componentes: a resina e o endurecedor, que, quando misturados, endurecem (seja à temperatura ambiente ou aquecidos) num tempo chamado de *gel time* (tempo de gelificação). A estrutura formada é quase sempre amorfa, ou seja, não apresenta temperatura de cristalização nem de fusão, apenas a temperatura de transição vítrea (Jones; Ashby, 2012). Quando utilizados em compósitos, as matrizes termorrígidas possuem vantagem sobre as termoplásticas. Os termorrígidos se encontram na fase líquida, permitindo um manuseio mais fácil, possuem alta estabilidade térmica, boa resistência química e à fluência. Embora vantajosos, os termorrígidos, quando ligados aos reforços, apresentam uma natureza frágil com curta vida útil de armazenamento. Seu tempo de fabricação também se torna elevado (Rana; Fangueiro, 2016).

Materiais amorfos, como os polímeros termorrígidos, possuem uma propriedade chamada temperatura de transição vítrea (T_g), ponto no qual ocorre a transição do estado vítreo do material para o estado borrachoso. O processo de amolecimento do material durante seu aquecimento ou de vitrificação durante seu resfriamento ocorre numa faixa de temperatura relativamente ampla. Atingir temperaturas num termorrígido próximas à T_g acarreta numa mudança catastrófica de algumas propriedades. Por exemplo, a resistência à tração (E) cai numa ordem de 2 a 3 vezes (Guo, 2017).

A seguir, é apresentada a matriz utilizada para fabricação dos compósitos do atual estudo.

2.2.1 Poliuretano

Os poliuretanos (PUs) são copolímeros em bloco. As matérias-primas chaves para a produção dos PUs são os di ou poliisocianatos e os polióis (baixa massa molar). Uma pré-polymerização é feita a partir da reação de um di ou poliisocianato com um polioliol para atingir

o teor de isocianato almejado. A reação de polimerização é feita com a mistura a frio do pré-polímero com o polioliol final. Assim, há a formação do PU de alta massa molar. Reações secundárias também ocorrem. Um exemplo é a reação entre o isocianato e a água, formando o gás carbônico, que se decompõe e forma amina primária e dióxido de carbono, promovendo a expansão do polímero. O PU contém, independente do resto da molécula, uma grande quantidade de grupos uretânicos ($-HN-COO-$). Estima-se que 68% dos PUs são usados como espuma, 14% como revestimento e o restante como elastômeros moldáveis e fresáveis, adesivos, polímeros termorrígidos, isolantes térmicos e em elastômeros termoplásticos (Neto, 1997; Silva, 2003; Cangemi; Santos; Claro, 2009; Szycher, 2013; Dodiuk, 2021).

Os poliuretanos podem derivar tanto do petróleo quanto de fontes naturais, como os óleos vegetais. Estes são chamados de biomônômeros. Os óleos são extraídos de diferentes plantas, como a soja, milho, girassol, oliva, mamona, entre outras (Petrovic et al., 1999). Wurts descobriu que isocianatos com a estrutura molecular $R-N=C=O$ reagem de forma acelerada em temperatura ambiente com a água, ácido carboxílico, aminas, álcool, uretanos e ureias (estruturas que contenham átomos de hidrogênio ativos) (Sharmin; Zafar, 2012).

O PU possui como vantagens o seu preço acessível, seu reduzido tempo de reação, baixa viscosidade, boa ligação à fase reforço sem dimensionamento especial das fibras e ausência de compostos orgânicos voláteis. O PU apresenta também alta resistência à abrasão, flexibilidade e elasticidade. A indústria aeronáutica é um setor onde a aplicação de novos compósitos de rápida fabricação se torna interessante por seu uso ser prolongado (Desai et al., 2000; Petrovic; Guo; Javni, 2000; Qiu et al., 2001; Chiou; Schoen, 2002).

2.2.2 Degradação Térmica do PU

De acordo com Trovati et al. (2010) e Alves et al. (2023), o PU apresenta três eventos principais relacionados à reação de decomposição. Inicialmente, há a quebra das ligações uretânicas, seguido da decomposição do éster (dividido em duas etapas). A primeira etapa ocorre numa faixa de temperatura entre 200 a 350 °C. A segunda e terceira fase variam entre 350 e 535 °C.

O atual trabalho é realizado utilizando como matriz a resina de poliuretano derivada do óleo da mamona, onde, conforme a empresa Kehl Polímeros, não há adição de metais pesados nem solventes no produto. O fornecedor informou pós-cura natural da resina decorridos cinco dias da mistura do polioliol e do isocianato. A proporção de polioliol:isocianato utilizada foi de 2:1.

Com o conceito de matriz já definido, é apresentado na sequência a fase reforço, sua função estrutural, seus diferentes tipos e aplicações.

2.3 REFORÇO

As principais funções das fibras na estrutura de um material compósito são suportar a carga (cerca de 70 a 90%), promover a rigidez, estabilidade térmica e demais propriedades

estruturais, isolar ou conduzir eletricidade (dependendo da fibra utilizada) (Mazumdar, 2001). A aplicação da fibra como reforço numa matriz polimérica é tido como um avanço tecnológico graças as propriedades otimizadas, como comentado previamente. Porém, há dificuldade em se obter propriedades específicas que atendam diferentes necessidades de operação. Para isso, diferentes tipos de fibras são estudadas, sendo elas de origem sintética ou natural (Prashanth et al., 2017).

2.3.1 Fibras Sintéticas

As fibras sintéticas são confeccionadas a partir de matérias-primas que provém de fontes não renováveis, como o petróleo, produtos químicos ou petroquímicos. Esta classe de fibras corresponde a cerca de 50% de todo o uso de fibras. Sua aplicação é concentrada na indústria têxtil e em todas as áreas da tecnologia de fibras (Asim et al., 2017).

As fibras com maior notoriedade no mercado são: vidro, aramida e carbono (Talreja; Varna, 2023). No quesito reforço, as fibras de vidro-E possuem módulo de elasticidade de aproximadamente 72 GPa (próximo ao valor das ligas de alumínio - 70 GPa, em média). Os reforços de fibra de aramida possuem módulo de elasticidade aproximado de 130 GPa (valor maior que o titânio - por volta de 110 GPa). Já a fibra de carbono de alta resistência, por exemplo, apresenta módulo de elasticidade maior que 230 GPa (rigidez superior aos aços em geral, tendo módulo de elasticidade próximo a 200 GPa) (Levy Neto; Pardini, 2016).

2.3.2 Fibras Naturais

Há três diferentes maneiras de trabalhar com fibras naturais: na produção têxtil, de papéis e na confecção de tecidos. No ramo dos compósitos, são potencialmente fibras que substituem as sintéticas. As fibras naturais são categorizadas seguindo suas origens: minerais, animais e vegetais (Campilho, 2015). As fibras animais, como a lã e a seda, e as minerais, como o amianto, não são tão utilizados como fibras de reforço para materiais compósitos. Em contrapartida, as fibras vegetais são altamente utilizados como biocompósitos em diferentes ramos industriais, como na área automotiva, naval/marinha e de construção (Ramamoorthy; Skrifvars; Persson, 2015).

Fibras naturais têm ganhado relevância graças às suas boas propriedades mecânicas, reduzido custo e abundância na natureza. Em certas aplicações, suas propriedades mecânicas são comparadas às de fibra sintética, como o vidro-E e o carbono, que são mostradas na Tabela 2 (Osorio et al., 2011; Holbery; Houston, 2006).

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas de Diferentes Fibras

Fibra	Densidade (g/cm³)	Deformação (%)	Xt (MPa)	E (GPa)
Algodão	1,5 - 1,6	7,0 - 8,0	400	5,5 - 12,6
Juta	1,3	1,5 - 1,8	393 - 773	26,5
Linho	1,5	2,7 - 3,2	500 - 1500	27,6
Cânhamo	1,47	2 - 4	690	70
Rami	-	3,6 - 3,8	400 - 938	61,4 - 128
Sisal	1,5	2,0 - 2,5	511 - 635	9,4 - 22
Coco	1,2	30,0	593	4,0 - 6,0
Vidro - E	2,5	0,5	2000 - 3500	70,0
Vidro - S	2,5	2,8	4570	86,0
Aramida	1,4	3,3 - 3,7	3000 - 3150	63,0 - 67,0
Carbono	1,4	1,4 - 1,8	4000	230 - 240

Fonte: Adaptado de Holbery e Houston (2006)

Fibras vegetais têm como base a celulose/lignocelulose (união da celulose, hemicelulose e lignina), a pectina e ceras. A quantidade de cada componente citado anteriormente varia dentre plantas, alterando as propriedades físicas de cada vegetal (Gholampour; Ozbakkaloglu, 2020). A Tabela 3 apresenta a composição química de diferentes fibras vegetais.

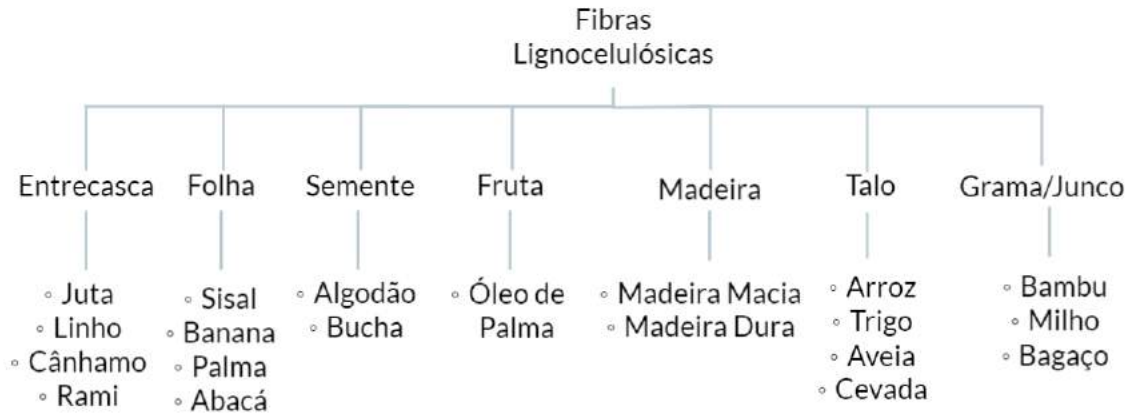
Tabela 3 – Composição Estrutural de Diferentes Fibras

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Ceras (%)
Algodão	85 - 90	5,7	-	0,6
Abaca	56 - 63	20 - 25	7 - 9	3
Coco	32 - 43	0,15 - 0,25	40 - 45	-
Linho	71	18,6 - 20,6	2,2	1,5
Juta	61 - 71	14 - 20	12 - 13	0,5
Bambu	26 - 43	30	21 - 31	-
Cânhamo	68	15	10	0,8
Rami	68,6 - 76,2	13 - 16	0,6 - 0,7	0,3
Sisal	65	12	9,9	2
Carauá	73,6	9,9	7,5	-

Fonte: Adaptado de Gholampour e Ozbakkaloglu (2020)

A partir das fibras lignocelulósicas, classifica-se as fibras pela parte da planta de onde sua fibra é derivada: entrecasca, folha, semente, fruta, madeira, talo e grama/junco, conforme mostrado na Figura 7 (Al-Oqla; Sapuan, 2017).

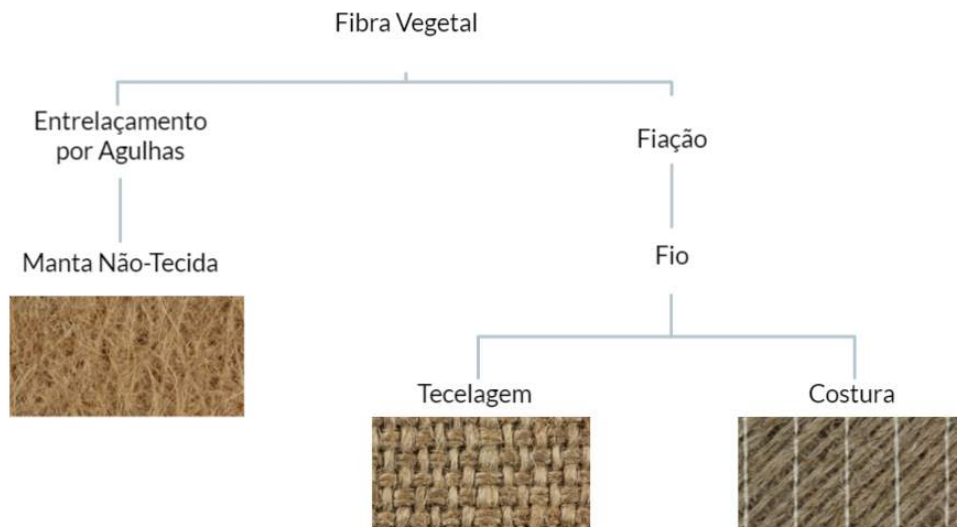
Figura 7 – Classificação das Fibras Lignocelulósicas.



Fonte: Al-Oqla e Sapuan (2017)

Após a extração das fibras das plantas por maceração (processo que separa a fibra da parte lenhosa) e diferentes etapas mecânicas, as fibras podem ser transformadas num fio contínuo através de técnicas de fiação. Durante a fiação, a fita é torcida de modo que as fibras obtenham um formado helicoidal. A área da seção transversal e o grau de compactação do fio são características importantes, mas que recebem pouca atenção no contexto acadêmico. Especula-se que o grau de compactação possa estar relacionado com a permeabilidade do fio para adesão da matriz durante produção dos compósitos. Os tecidos são fabricados a partir de diferentes configurações de tecelagem. Os fios entrelaçados de maneira distinta nas duas direções podem, esporadicamente, apresentar densidades lineares diferentes (Grosberg; Iype, 1999; Madsen et al., 2007; Madsen; Gamstedt et al., 2013). A configuração de pré-forma de fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos são mostradas na Figura 8.

Figura 8 – Pré-Formas de Fibras Vegetais



Fonte: Adaptado de Madsen, Gamstedt et al. (2013)

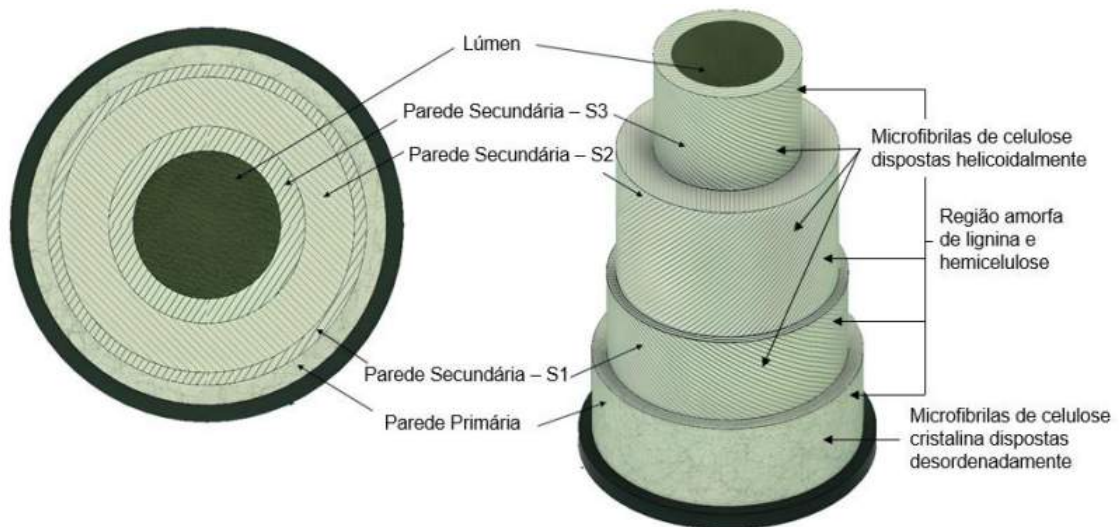
Porém, as fibras naturais possuem natureza hidrofílica (alta afinidade com moléculas de água), resultando no inchaço da fibra e produção de vazios na interface matriz/fibra. Como consequência, propriedades pobres quando comparadas às fibras sintéticas. Entretanto, métodos adequados para contornar tal caso devem ser realizados para produzir compósitos naturais de alta qualidade, como o pré-aquecimento da fibra a fim de eliminar moléculas de água que estejam interagindo com as fibras, evitando possíveis perdas nas propriedades físicas (Gholampour; Ozbakkaloglu, 2020).

A utilização de materiais de origens renováveis é um atual foco de diferentes trabalhos acadêmicos. Trabalhar com essa gama de materiais é uma iniciativa econômica e com objetivo de reduzir o uso de materiais de difícil decomposição (Araujo et al., 2010). Compósitos produzidos a partir de fibras naturais unidas a polímeros biodegradáveis (matrizes) são considerados materiais *ecofriendly* (Bledzki; Gassan, 1999).

2.3.2.1 Morfologia das Fibras Celulósicas

A estrutura das fibras vegetais se dá com a presença de um canal central chamado de lúmen, cuja função é transportar água e nutrientes. Também há a parede celular formada por diferentes camadas. Inicialmente, a parede primária consiste num arranjo desordenado de fibrilas de celulose com matriz de pectina, hemicelulose, lignina e proteína. Já as paredes secundárias são formadas a partir de microfibrilas de celulose cristalina num arranjo espiral, onde a camada S2 (Figura 9) determina as propriedades mecânicas da fibra. A camada S2 é formada por microfibrilas dispostas helicoidalmente de longas cadeias de celulose. A lamela média (parte externa) é composta majoritariamente por pectina, atuando como um cimento entre as fibras (Pereira et al., 2015).

Figura 9 – Morfologia das Fibras Celulósicas



Fonte: (Valcanaia, 2023)

A celulose é definida como uma macromolécula responsável pela resistência e rigidez estrutural da fibra. A hemicelulose é um componente orgânico responsável pela biodegradação, degradação térmica e absorção de umidade, apresentando menor rigidez em relação à celulose. A lignina é termicamente estável, porém é a motivadora da degradação UV. A pectina é definida como componentes estruturais encontrados na parede celular primária e na lamela média, e ajuda na rigidez do vegetal (auxilia no crescimento, amadurecimento, armazenamento e processamento da planta), na adesão entre células e resistência mecânica da fibra (Joslyn, 1970; Saheb; Jog, 1999; Rangappa et al., 2022).

2.3.2.2 Estabilidade Térmica das Fibras Naturais

Estudos acerca da estabilidade térmica das fibras naturais podem ser realizados através de análise termogravimétrica (TGA), que consiste na perda de massa do material (em porcentagem) analisado com o aumento da temperatura (Saheb; Jog, 1999). Quando analisadas em atmosfera de ar, as fibras naturais apresentam degradações em etapas. A primeira equivale aos componentes de menor peso molecular, como a hemicelulose, e ocorre entre 250 e 300 °C. A segunda etapa está ligada com a degradação da celulose, entre 300 e 400 °C. A terceira etapa se dá por volta de 450°C, quando a lignina é decomposta. A última etapa se dá pela degradação da lignina, que ocorre até 900±2 °C (Azwa et al., 2013; Nurul Fazita et al., 2016).

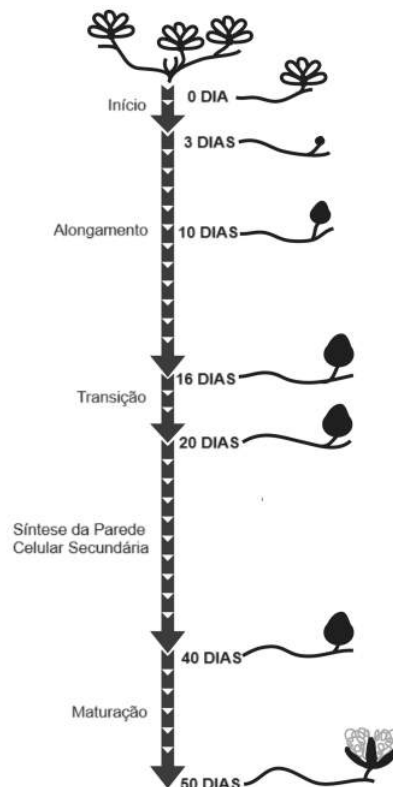
A seguir será discorrido sobre origem, aplicação, características e propriedades sobre a fibra de estudo: o algodão.

2.4 ALGODÃO

O algodão corresponde a cerca de 80% da produção de fibras naturais, em massa, no mundo. O motivo é a facilidade do crescimento da planta em diferentes locais. O algodão é produzido em escala comercial em aproximadamente oitenta países, sendo os maiores produtores a Índia e a China (cada um é responsável por 25% da produção mundial). Os Estados Unidos e o Brasil combinam para 20% de toda a produção mundial de algodão. A produção da planta gera, diretamente, de 35 a 60 milhões de empregos ao redor do mundo (Kozlowski; Mackiewicz-Talarczyk, 2020).

O algodão é uma planta da família da Malvaceae cuja espécie é a *Gossypium hirsutum*. A planta é originária de regiões tropicais e subtropicais. Sua altura varia de 0,5 a 1,5 metro. A produção do algodão é dita eficiente: somente 10% do seu peso é perdido durante o processo de transformação do vegetal cru em fibra pura. A colheita da planta ocorre, normalmente, no mesmo ano de seu plantio. Abaixo de 16 °C, o algodão se torna inativo. Após uma semana de plantio, as mudas surgem do solo. Botões de flores são vistos decorridos 5 a 6 semanas após as mudas emergirem. As flores são visíveis após 3 a 4 semanas. Ao todo, entre a floração e a colheita (cápsula aberta), o período é de 50 a 80 dias (Fang, 2018). A sequência do crescimento do algodão é mostrada na Figura 10, enquanto a cápsula aberta é vista na Figura 11.

Figura 10 – Desenvolvimento da Planta de Algodão



Fonte: Adaptado de Haigler et al. (2012)

Figura 11 – Cápsula da Planta de Algodão Aberta



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

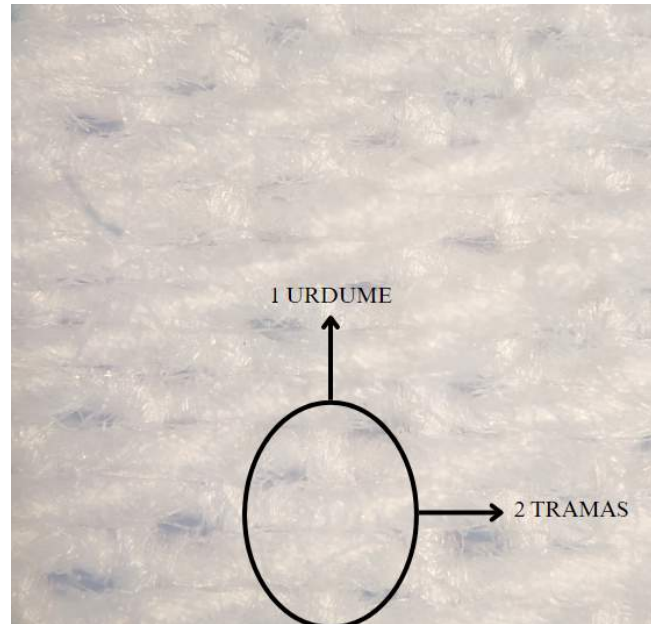
2.4.1 Fibra de algodão

A fibra de algodão se divide em duas classes: fiapos (fibras longas, lisas e torcidas) e línteres (fibras curtas - entre 2 e 7 mm, cilíndricas e de parede espessa). Conforme mostrado na Tabela 2, o algodão apresenta densidade variando entre 1.5 e 1.6 g/cm³. Em comparação à densidade do vidro-E (2.5 g/cm³), é um valor baixo, sendo atrativo em questões estruturais. Também é considerada higroscópica, possuindo alta afinidade com moléculas de água, podendo levar a diminuição de propriedades mecânicas e térmicas (Holbery; Houston, 2006; Pickering, 2008).

O comprimento da fibra é determinado durante a fase de alongamento da planta. A maioria das fibras de algodão apresenta razão de aspecto (relação comprimento/largura) num intervalo de 1000 a 3000. Algumas fibras podem atingir valores de comprimento até 4000 vezes maior que seu diâmetro. Durante a fase de alongamento da planta, a fibra atinge seu valor máximo de comprimento: 15 a 56 mm. Assim, os valores de diâmetro da fibra variam entre 10 μ m e 45 μ m (Gordon; Hsieh, 2006; Al-Oqila; Sapuan, 2018).

O tecido de algodão cru é fornecido pela empresa Döhler S.A., com proporção de trama:urdume de 2:1, Figura 12, visto que a trama é dada na mesma direção da largura (tamanho fixo) do tecido e o urdume é disposto na mesma direção da orela (comprimento). Assim, as propriedades mecânicas dos compósitos fabricados a partir deste tecido não possuem propriedades semelhantes nas diferentes direções.

Figura 12 – Relação Trama:Urdume Fibra de Algodão Döhler S.A.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

2.5 ESTADO DA ARTE

Pesquisa tem sido desenvolvidas buscando avaliar o comportamento quase estático/dinâmico dos mais diferentes tipos de poliuretano. Chen et al. (2004) fabricaram compósitos de poliuretano/nanosílica com resinas compostas de poliéster polioliol/nanosílica feitas após polimerização ou mistura *in situ*. A análise dinâmico-mecânica (DMA) revelou que, com a introdução de nanosílica, a T_g dos PUs aumentava. Moffitt, Chen e Prahl (2006) desenvolveram um método para simular as propriedades ópticas de tecidos biológicos de PU em dois comprimentos de onda na faixa de espectro do visível e do infravermelho. Como resultados, a absorção da luz visível pelo PU diminui com o tempo, sendo estável por um ano com queda de $0.034 \pm 0.003 \text{ cm}^{-1}$ de 500 a 830 nm. Barikani e Mohammadi (2007) avaliaram a reação do amido de milho com o pré-polímero de uretano com o objetivo de alterar o amido e preparar copolímeros hidrofóbicos. Foi pontuado, ao final do estudo, que o aumento da quantidade de ligações de uretano afeta o valor da T_g do material.

Borsoi et al. (2011) utilizaram fibras de algodão como fase reforço em compósitos poliméricos com matriz de poliestireno e o poli(estireno-co-anidrido maleico) como agente compatibilizante. Os ensaios de tração e flexão indicam que a adição de 20% de FA promove um aumento nas propriedades mecânicas, sendo o efeito intensificado com a adição de compatibilizante. Através de análise termogravimétrica (TGA), concluiu-se que adicionar FA desloca o início da perda de massa para temperaturas perto de 200 °C. Ainda, observou-se que adicionando FA, a rigidez e o módulo de armazenamento aumentam. Mahdi e Dean (2020) investigaram a adição de carga nas propriedades mecânicas da FA nos compósitos de polipropileno (PP) e policloreto de vinila (PVC) reforçados com FA sob carregamento quase estático. Concluiu-se

que o aumento no teor de carga promove o aumento na rigidez dos materiais. O PP reforçado com FA apresenta superfície brilhante, enquanto o PVC reforçado com FA possui superfície porosa. Quando submetidos à esforços em tração, falhas por cisalhamento, rompimento da matriz e da fibra e arrancamento da fibra ocorreram.

de Souza et al. (2015) realizaram a caracterização mecânica de corpos de prova de poliuretano ou epóxi reforçados com fibra de algodão ou de vidro (PU + Algodão, PU + vidro, epóxi + algodão e epóxi + vidro). A fabricação foi realizada pelo processo de *vacuum bag*. A sequência de empilhamento dos materiais é $[0^\circ]_5$, $[90^\circ]_5$ e $[+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. Observa-se que o poliuretano tende a gerar um compósito mais dúctil do que a resina epóxi. As propriedades no CPRFA de módulo de elasticidade (E), deformação máxima (ϵ_{\max}) e tensão máxima (σ_{\max}) são (para 0° ; $\pm 45^\circ$ e 90° , respectivamente) 2.40 GPa, 0.069 mm/mm e 61.47 MPa; 0.64 GPa, 0.066 mm/mm e 8.33 MPa; 1.29 GPa, 0.127 mm/mm e 27.91 MPa. Os autores concluem que o PU é um substituto em potencial para resinas sintéticas utilizadas em materiais compósitos.

De acordo com pesquisa elaborada por Gama et al. (2021), as diferenças na hidrofobicidade levam à diminuição da afinidade na interface matriz/fibra, gerando vazios no produto final. Adicionar fibras têxteis resulta na presença de vazios. A fibra de algodão, quando adicionada ao PU, apresenta porosidade de aproximadamente 8,9%. Relatou-se que fibras mais longas aumentam o tamanho dos poros. Além disso, discutiu-se a condutividade térmica da fibra de algodão ($0.07 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) e do PU ($0.18 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Percebeu-se que, adicionando fibras de algodão ao PU, a condutividade térmica do compósito resultante era reduzida em relação à resina pura ($0.11 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ para 70% em peso da fibra). Os autores também estudaram a degradação térmica do PU. Entre 200 - 290°C, há a degradação das porções rígidas da resina (ureia e uretano, por exemplo) e em 450°C a degradação de porções suaves (carbonila do grupo hidroxila). A presença de algodão reduz a estabilidade térmica do material.

Modos (2017) estudou o comportamento mecânico de compósitos de poliuretano reforçados com fibra de algodão. A resina é a AG201, fornecida pela empresa KEHL, com proporção de isocianato para poliálcool de 1:1. O processo de fabricação dos compósitos é o *vacuum bag*. A bomba de vácuo, durante confecção das placas, foi mantida ligada por 24 horas. A autora se baseou na norma ASTM D3039. A sequência de empilhamento dos compósitos é $[0^\circ]_7$, $[90^\circ]_7$ e $[45^\circ]_7$. As propriedades obtidas foram a tensão máxima (σ_{\max}) e o módulo de elasticidade (E). Para a orientação de 0° , obteve-se, respectivamente, 78.34 MPa e 2.69 GPa. Para $\pm 45^\circ$, a σ_{\max} é de 32.72 MPa e o E é de 1.81 GPa. À 90° a tensão máxima é de 11.89 MPa e o módulo de elasticidade é de 0.93 GPa.

Poucos estudos sobre compósitos de poliuretano reforçados com fibra de algodão (CPRFA) foram realizados com o objetivo de conhecer o comportamento térmico e mecânico do material. Portanto, a motivação para o atual trabalho é a reduzida quantidade de trabalhos realizados sobre materiais compósitos que utilizam matriz de poliuretano com fibras de algodão como reforço.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os materiais e metodologias utilizadas para estudo das propriedades térmicas e mecânicas que envolvem o compósito de poliuretano reforçado com fibra de algodão (CPRFA).

3.1 MATERIAIS

Para o presente trabalho, fibras de algodão fornecidos pela empresa *Döhler* (Joinville, SC, Brasil) com densidade de 1.52 g/cm^3 foram utilizadas como fase reforço no compósito. A Figura 13 mostra o tecido de FA empregado no estudo.

Figura 13 – Fibra de Algodão Fornecida pela Empresa *Döhler*



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Para a fase matriz, a resina termorrígida de poliuretano utilizada foi fornecida pela empresa Kehl Polímeros (São Carlos, SP, Brasil). Seu nome comercial é KDG1909. A matriz é composta por um componente A (isocianato) e um componente B (poliol). A proporção utilizada foi de 1 (isocianato) para 2 de poliol. A densidade da resina de PU é de 1.22 g/cm^3 . A Figura 14 apresenta a resina. A cura da resina, segundo fabricante, ocorre de cinco a sete dias após mistura de ambos os componentes.

Figura 14 – Resina de Poliuretano Fornecida pela Empresa Kehl Polímeros



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

3.2 METODOLOGIA

A Figura 15 representa a sequência de etapas realizadas durante realização dos experimentos. O procedimento experimental é iniciado com a análise da densidade da FA através de picnometria de gás. Após, a fabricação e a obtenção de corpos de prova a partir dos compósitos de poliuretano reforçados com fibra de algodão são descritas, seguindo com análise mecânica dinâmica (DMA) do PU e do compósito, partindo para análise termogravimétrica (TGA) do CPRFA, da FA e do PU. Para análises mecânicas, realizou-se o ensaio de tração do fio de algodão, do PU e do CPRFA. Para estudo da interface entre fibra e matriz na região da fratura, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para fractografia dos corpos de prova ensaiados. As frações volumétricas de cada fase são analisados via estereomicroscópio. Ao final, o módulo de elasticidade para o CPRFA é calculado via regra das misturas.

Figura 15 – Fluxograma Sequencial das Etapas Realizados



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

3.2.1 Picnometria de Gás

Esta técnica é utilizada para determinar o volume de algum sólido (neste caso a fibra de algodão) através da diferença de pressão de gás numa câmara cujo volume é conhecido (Webb; Orr, 1997). O gás utilizado foi o hélio, já que é um gás inerte e por adentrar os poros do material facilmente graças ao tamanho de seus átomos, promovendo um resultado mais exato (Moura; Figueiredo, 2002). O ensaio de picnometria foi realizado no Centro Multiusuário do CCT/UEDESC para determinar a densidade da fibra de algodão *Gossypium hirsutum*. O aparato utilizado foi o *AccuPyc II 1340 Pycnometer*, mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Picnômetro *AccuPyc II 1340*



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

3.2.2 VARTM

A escolha do processo de fabricação é um passo fundamental na produção de materiais compósitos. Para compósitos poliméricos, a moldagem por transferência de resina assistida à vácuo (VARTM) é utilizada principalmente por indústrias da mobilidade (em especial os setores aeroespacial, naval e automobilística) para a produção de grandes peças (Tamakuwala, 2021; Kang; Lee; Hahn, 2001).

O método consiste na aplicação da resina diretamente junto às fibras. A tempo de gelificação da resina PU é de 30 minutos a 25 °C e de 1 minuto a 70 °C. Com o objetivo de retirar umidade, as fibras de algodão foram submetidas à estufa numa temperatura de 60 °C por 2 horas. A sequência de empilhamento das fibras para fabricação dos compósitos é de $[0^\circ]_2$, $[90^\circ]_4$ e $[\pm 45^\circ]_8$ na ordem $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$. Para tal, baseou-se nas normas ASTM D3039 (0° e 90°) e ASTM D3518 ($\pm 45^\circ$). Todas as placas foram confeccionadas com dimensão de 300 × 300 mm. A V_F utilizada para cálculos foi de 0.45 (volume de fibra corresponde a 45% do volume total). Calcula-se a massa de matriz necessária para fabricar os compósitos através de

$$m_{\text{matriz}} = \frac{m_{\text{fibra}} \cdot \rho_{\text{matriz}} \cdot (1 - V_F)}{\rho_{\text{fibra}} \cdot V_F},$$

onde m é a massa (em gramas), ρ é a densidade (em g/cm^3) e V_F é a fração volumétrica de fibra (adimensional).

O processo de produção dos CPRFA segue as seguintes etapas:

Passo 1: Preparo do Molde

O preparo do molde compreende em sua limpeza e na delimitação do perímetro de trabalho com fitas *tacky tape* (dupla face), a fim de isolar a bolsa de vácuo, tornando possível a máxima pressão negativa ao fabricar os compósitos. Adiciona-se, também, agente desmoldante (neste caso, cera), com o intuito de facilitar a desmoldagem da peça ao final do processo. O molde já preparado é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Preparo do Molde

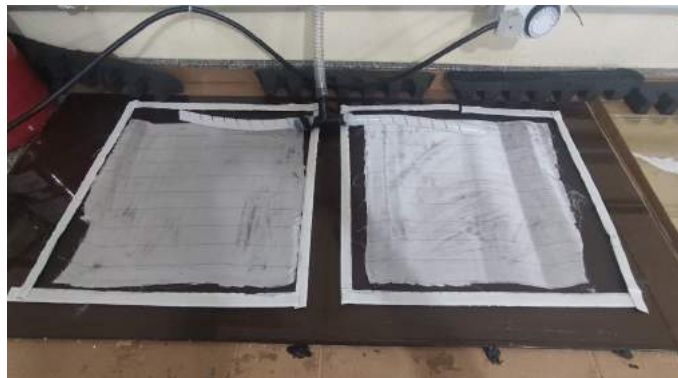


Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Passo 2: Revestimento do Molde

Com a aplicação do agente desmoldante, utiliza o *Peel Ply* para revestir o molde. O *Peel Ply* é um tecido com diferentes texturas, podendo ser mais ou menos rugoso dependendo do processo em que é utilizado. É utilizado a fim de tornar a desmoldagem um processo mais fácil. O *Peel Ply* já inserido sobre o molde é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – *Peel Ply* Aplicado Sobre o Molde



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Passo 3: Aplicação da Resina

Antes mesmo do posicionamento das fibras, a resina é vazada sobre o *Peel Ply*. Após experimentos realizados pelo autor, conclui-se que a aplicação da resina antes das fibras promove uma melhor distribuição da matriz ao longo do reforço.

Passo 4: Posicionamento das Fibras

Nesta etapa, as fibras, em camadas, são dispostas sobre a resina de forma empilhada, respeitando as orientações de projeto. As fibras foram inseridas manualmente. As fibras sobre a matriz é mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Fibras Posicionadas Acima da Matriz



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Etapa 5: Fechamento da Bolsa

Utilizando um filme plástico, o perímetro do molde é lacrado através da fita dupla face (*tacky tape*).

Etapa 6: Aplicação do Vácuo

O ar presente no interior da bolsa é succionado através de uma bomba de vácuo, gerando diferença de pressão. Assim, com a pressão exercida pela bolsa sobre o compósito, o material é compactado com espessura uniforme. O sistema de vácuo opera por 6 horas numa temperatura do ambiente controlada em 23 °C. A Figura 20 apresenta o sistema já com pressão negativa.

Figura 20 – Aplicação do Vácuo na Fabricação do Compósito



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Etapa 7: Tempo de Cura

Ao desligar a bomba de vácuo, o laminado é deixado sobre o molde por 24 horas. Após esse tempo, retira-se a placa e a mantém intacta por no mínimo 5 dias, período de cura completa da resina PU.

Etapa 8: Obtenção dos Corpos de Prova

A utilização de máquinas de corte à água ou laser poderiam danificar o laminado. Portanto, com o auxílio de uma tesoura, os corpos de prova (CDP) do CPRFA foram cortados com cautela respeitando as normas ASTM D3039 e D3518. As dimensões dos corpos de prova foram obtidas através de um paquímetro manual da Mitutoyo com nônio de 0.05 mm. As medidas de largura e espessura dos CDP orientados a 0°, 90° e ±45° são apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7.

3.2.3 Análise Dinâmica Mecânica - DMA

O DMA é uma análise que permite a medição de propriedades mecânicas dinâmicas poliméricas. Durante ensaio, uma perturbação (σ) é aplicada à uma amostra numa determinada temperatura/frequência. Propriedades como E' (módulo de armazenamento elástico) e E'' (módulo de perda) são obtidas. E' significa a capacidade que o material possui em armazenar ou retornar energia. E'' é a capacidade da amostra perder ou dissipar energia. Em polímeros, a amplitude da deformação do material em função da força oscilatória é defasada por um ângulo δ . A tangente deste ângulo ($\tan \delta = E''/E'$) é conhecida como amortecimento. A análise também permite caracterizar as interações entre a interface fibra/matriz (Bashir, 2021).

Propriedades como a T_g e os módulos de armazenamento e perda antes e depois do estado vítreo do material podem ser determinadas através do DMA. A temperatura de transição vítrea é extraída no pico da curva de amortecimento. O módulo de armazenamento, para polímeros com ligações cruzadas (matriz estudada), tende a ser constante no estado borrachoso (Neto, 1997). O ensaio foi realizado no equipamento NETZSCH DMA 242 E Artemis (Figura 21), disponível no Centro Multiusuário do CCT/UDESC. O método de ensaio foi de *single cantilever*. A perturbação exercida no material foi de 1 Hz. A faixa de temperatura setada foi de 0°C a 100°C.

Figura 21 – NETZSCH DMA 242 E Artemis



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

3.2.4 Análise Termogravimétrica - TGA

A termogravimetria é uma análise na qual a perda de massa de um corpo de prova é observada ao longo do tempo e/ou temperatura (Haines, 1995). Portanto, a estabilidade térmica da fibra de algodão, da resina de poliuretano e do CPRFA foi estudada através da TGA, realizado no Centro Multiusuário do CCT/UEDESC no termogravímetro NETZSCH STA 449C, conforme Figura 22. As amostras foram submetidas a uma variação de temperatura de 23 °C a 600 °C numa taxa de aquecimento de 10 °C/min. Para as amostras de FA e CPRFA, a atmosfera foi de nitrogênio. Por falta do gás utilizado nos demais materiais, utilizou-se o gás Argônio (também inerte) para o ensaio do PU.

Figura 22 – NETZSCH STA 449 C



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

3.2.5 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração da FA, do PU e do CPRFA foram realizados na máquina universal de ensaios *Instron* EMIC 23-100, presente no Laboratório de Vibrações e Estruturas Leves (LaVEL) da UDESC-CCT. Para melhor organização, os três ensaios foram divididos em subseções e são apresentados a seguir.

3.2.5.1 Ensaio de Tração dos Fios de Algodão

O ensaio utilizando a fibra de algodão foi feito seguindo a norma ASTM D2256 (ASTM, 2021). Foi setada uma distância entre garras de 250 mm e velocidade de ensaio de 300 mm/min. Prendeu-se os fios através de apertos pneumáticos com pressão de 2 bar, a fim de evitar o escorregamento das amostras, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Ensaio do Fio de FA



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Previamente à execução dos ensaios, 10 corpos de prova (CDP) foram retirados de forma aleatória do tecido de algodão, cortados num comprimento total padrão de 500 mm e pesados. Para análise, considerou-se a seção transversal dos fios constante.

Na indústria têxtil, as propriedades dos fios são retiradas tendo em vista a titulação (densidade linear) já que a seção transversal dos fios pode ser irregular, evitando erros nos cálculos uma vez que a tensão suportada depende da área transversal. Assim, seguindo a norma ASTM D1907, calcula-se a densidade linear, conforme

$$D = \frac{m \times 1000}{l}, \quad (1)$$

onde D é a densidade linear da fibra (em tex), m é a massa (em gramas) e l é o comprimento (em metros). E a resistência à ruptura (e o módulo de elasticidade), através de

$$\sigma_f = \frac{F}{D}, \quad (2)$$

onde σ_f é a tensão suportada pela fibra (em N/tex), F é a força aplicada à fibra (em Newton) e D é a densidade linear (em tex).

Portanto, para determinar a resistência à tração da fibra de algodão, divide-se a força máxima pelo valor da densidade linear calculada. Assim, ao multiplicar o valor da resistência à ruptura pela densidade da fibra, em kg/m^3 , obtém-se o valor da tensão suportada pelo fio em MPa. O módulo de elasticidade é calculado a partir do gráfico Tensão (MPa) \times Deformação (%) através do método da secante, conforme proposto por (Callister, 2000). A partir das 10 amostras, calcula-se a média aritmética e o desvio padrão para os resultados da densidade linear, módulo de elasticidade e tensão máxima de cada CDP.

3.2.5.2 Ensaio de Tração do Poliuretano

A fim de caracterizar a fase matriz do compósito, foram realizados ensaios de tração de 3 CDP de PU conforme especificado pela norma ASTM D638 (ASTM, 2018). A velocidade de ensaio foi de 5 mm/min. É possível calcular o módulo de elasticidade do PU por meio de

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (3)$$

onde $\Delta\sigma$ é a variação de tensão suportada pelo PU (em MPa), $\Delta\varepsilon$ é a variação de deformação sofrida pelo PU (em porcentagem) e E é o módulo de elasticidade do material (em GPa).

Portanto, após utilizar moldes de silicone para confecção dos CDP de PU, obtém-se as dimensões dos mesmos, conforme mostrado na Tabela 4

Tabela 4 – Dimensões dos CDP de PU

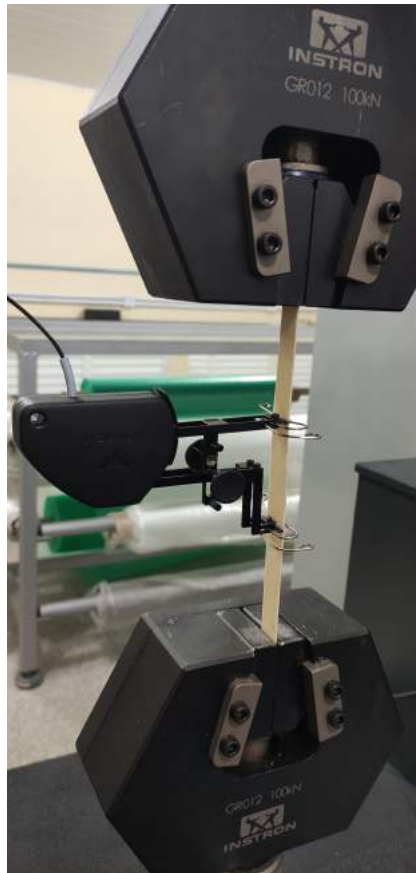
	Largura (mm)	Espessura (mm)
PU₀₁	13,00	3,15
PU₀₂	13,00	3,25
PU₀₃	12,80	3,80
Média	12,93	3,40
Desvio Padrão	0,09	0,29

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

3.2.5.3 Ensaio de Tração do Compósito de Poliuretano Reforçado com Fibra de Algodão

O ensaio de tração do CPRFA foi realizado de acordo com as normas ASTM D3039 e D3518. Para as orientações de 0° e 90° , a norma D3039 é seguida. Já à $\pm 45^\circ$, a norma D3518 é adotada. A velocidade de ensaio foi setada em 2 mm/min para todos os CDP. A Figura 24 mostra um CDP à $[0^\circ]_2$ posicionado nas garras da máquina universal de ensaios com um extensômetro acoplado à ele.

Figura 24 – Ensaio de Tração do CPRFA orientado à $[0^\circ]_2$



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Foram realizados ensaios de 5 CDP de cada orientação de fibra. Portanto, 15 CDP ao todo. As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam as medidas de largura e espessura para cada CDP ensaiado, conforme orientação.

Tabela 5 – Dimensões dos CDP Orientados à $[0^\circ]_2$

	Largura (mm)	Espessura (mm)
CDP₀₁	14,87	0,55
CDP₀₂	14,97	0,73
CDP₀₃	15,10	0,58
CDP₀₄	14,83	0,60
CDP₀₅	14,50	0,68
Média	14,85	0,63
Desvio Padrão	0,22	0,08

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Tabela 6 – Dimensões dos CDP Orientados à $[90^\circ]_4$

	Largura (mm)	Espessura (mm)
CDP₀₆	24,97	1,55
CDP₀₇	24,47	1,60
CDP₀₈	24,73	1,63
CDP₀₉	25,30	1,65
CDP₁₀	25,28	1,65
Média	24,95	1,62
Desvio Padrão	0,36	0,04

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Tabela 7 – Dimensões dos CDP Orientados à $[\pm 45^\circ]_8$

	Largura (mm)	Espessura (mm)
CDP₁₁	25,50	3,78
CDP₁₂	24,85	4,2
CDP₁₃	26,02	3,83
CDP₁₄	25,07	4,07
CDP₁₅	25,22	3,97
Média	25,33	3,97
Desvio Padrão	0,45	0,17

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

3.2.6 Microscópio Eletrônico de Varredura dos CPRFA

Com o intuito de analisar a interface fibra/matriz na região de fratura dos CDP, foram realizados ensaios de fractografia com elétrons secundários dos CPRFA orientados à $[0^\circ]_2$, $[90^\circ]_4$ e $[\pm 45^\circ]_8$ utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL JCM 7000 *NeoScope*, disponível no Centro Multiusuário da UDESC/CC, conforme mostrado na Figura 25. Os CDP foram inicialmente recobertos com uma camada de ouro.

Figura 25 – JEOL JCM 7000 *NeoScope*

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

3.2.7 Determinação das Frações Volumétricas via Estereomicroscópio

Para determinar as reais frações volumétricas de fibra e matriz presentes nos CPRFA, utilizou-se o *software Image Manager* do estereomicroscópio Leica MZ9.5 disponível no Centro Multiusuário da UDESC/CCT (Figura 26). O compósito utilizado para estudo foi o CPRFA empilhado à $[0^\circ]_2$, já que as seções transversais das fibras são posicionadas ortogonalmente em relação a lente do microscópio. A partir do *software* presente no computador, extrai-se uma imagem da região de fratura do compósito e, no *software ImageJ*, é feita a análise da fração volumétrica de fibra.

Figura 26 – Estereomicroscópio Leica MZ9.5



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

3.2.8 Regra das Misturas

As propriedades mecânicas são características do material e determinam seu comportamento à solicitação de esforços. Quanto maior o teor de fibras num compósito, maior a ruptura das fibras, diminuindo assim as propriedades mecânicas à tração do compósito. A grande faixa de comprimentos e orientações que as fibras apresentam dificultam a previsão das propriedades mecânicas em compósitos. A relação conhecida como "regra das misturas" fornece as propriedades mecânicas do compósito a partir das frações volumétricas e do módulo de elasticidade de cada fase. O limite superior para o módulo de elasticidade (força aplicada na direção das fibras) é obtido a partir do modelo de Voigt (Stephenson, 1979), através de:

$$E_c = E_F V_F + E_m V_m, \quad (4)$$

onde E e V são o módulo de elasticidade e a fração volumétrica, enquanto c, F e m correspondem, respectivamente, ao compósito, fibra e matriz. Já o limite inferior para o módulo de elasticidade (força aplicada na direção perpendicular das fibras) é descrito pelo modelo de Reuss (Ghesquiere; Bauwens, 1976), dado por:

$$E_c = \frac{E_m E_F}{E_m V_F + E_F V_m}. \quad (5)$$

O valor real do módulo de elasticidade está entre os dois extremos (Folkes, 1982). O cálculo pela regra das misturas utiliza tanto as frações volumétricas espituladas no projeto dos corpos de prova do CPRFA (V_F de 45% e V_M de 55%) quanto as frações volumétricas encontradas via estereomicroscópio (V_F de 70% e V_M de 30%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PICNOMETRIA DE GÁS

As fibras de algodão foram selecionadas de forma aleatória pelo tecido, cortadas e inseridas num cadinho com volume conhecido. A massa da amostra foi de 3.3734 g. Foram realizadas dez medições do volume e densidade da fibra de algodão (10 ciclos), conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados de Volume e Densidade da Fibra de Algodão

Ciclo	Volume Algodão (cm³)	Densidade Algodão (g/cm³)
1	2,2280	1,5147
2	2,2259	1,5161
3	2,2246	1,5170
4	2,2247	1,5169
5	2,2243	1,5172
6	2,2243	1,5172
7	2,2263	1,5158
8	2,2239	1,5174
9	2,2250	1,5167
10	2,2250	1,5167

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Os valores de média e desvio padrão do volume e densidade do algodão estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Médias e Desvios Padrão das Medições da Fibra de Algodão

	Volume Algodão (cm³)	Densidade Algodão (g/cm³)
Média	2,2252	1,5166
Desvio Padrão	0,0012	0,0008

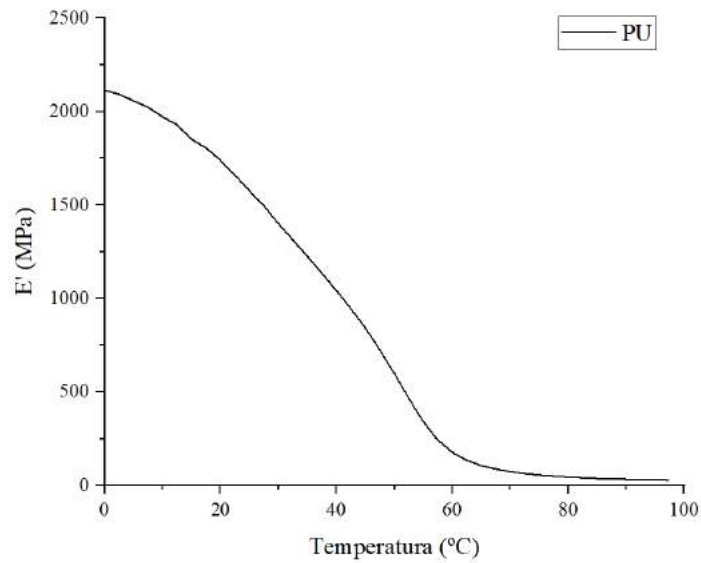
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

A densidade da FA estudada, $1,5166 \pm 0,0008$ g/cm³, é comparável com valores presentes na literatura, como pode ser visto na Tabela 2 (entre 1,5 e 1,6 g/cm³).

4.2 ANÁLISE DINÂMICA MECÂNICA - DMA

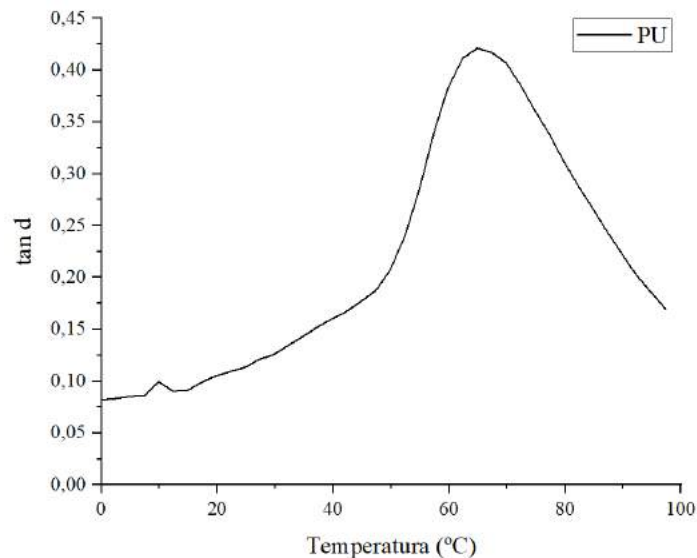
Obteve-se o módulo de armazenamento (E') e o amortecimento ($\tan \delta$) para uma amostra de CPRFA orientado à $[90^\circ]_4$ e um CDP de PU. O módulo de perda (E'') não é mostrado já que é desejável, para este estudo, apenas as propriedades de armazenamento e amortecimento. As demais orientações orientações não foram ensaiadas pela baixa disponibilidade de nitrogênio na UDESC/CCT. As Figuras 27 e 28 apresentam o E' e o amortecimento do PU com o aumento da temperatura, respectivamente.

Figura 27 – Módulo de Armazenamento em Função da Temperatura do PU



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

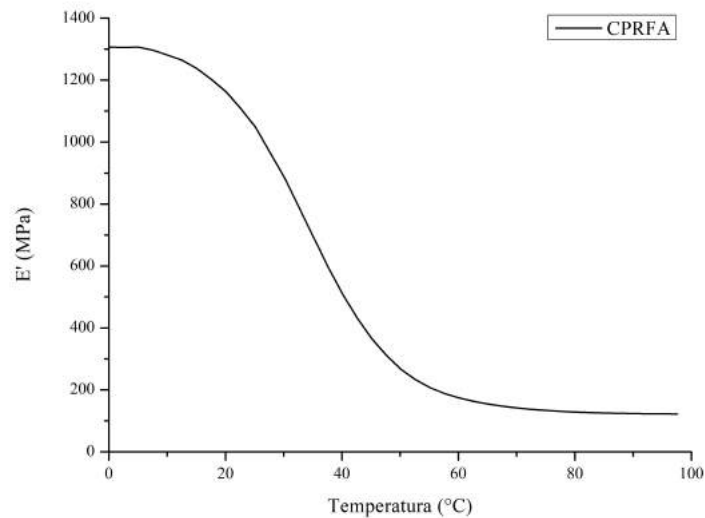
Figura 28 – Amortecimento em Função da Temperatura do PU



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

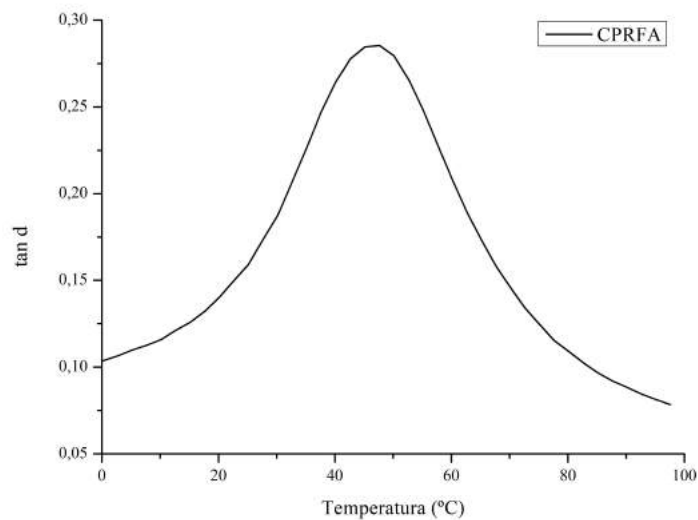
A partir do gráfico do $\tan \delta$, conclui-se que a T_g é de 65 ± 2 °C. Assim, antes desta temperatura, o PU se encontra no estado vítreo e, depois, no estado borrachoso. A partir do gráfico do módulo de armazenamento, nota-se que o CDP do PU utilizado para DMA possui E' de aproximadamente 1600 MPa em temperatura ambiente (23 °C). Já para o estado borrachoso do PU, o E' é constante em aproximadamente 30 MPa. Fez-se também o DMA do CPRFA à $[90^\circ]_4$. O módulo de armazenamento e o amortecimento com o aumento da temperatura são mostrados nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Módulo de Armazenamento em Função da Temperatura do CPRFA à $[90^\circ]_4$



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 30 – Amortecimento em Função da Temperatura do CPRFA à $[90^\circ]_4$



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

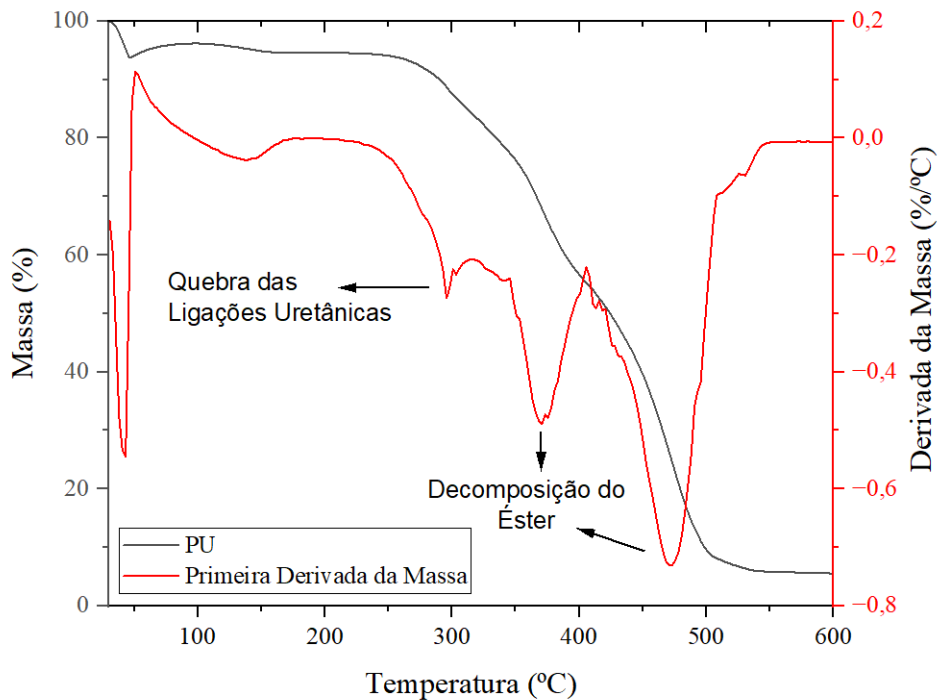
Com base no gráfico do $\tan \delta$, conclui-se que a T_g do CPRFA é de 47 ± 2 °C. Antes desta temperatura, o material está no estado vítreo e, depois, no estado borrachoso. Baseado no gráfico do módulo de armazenamento, nota-se que o CDP do CPRFA utilizado para DMA apresenta E' por volta de 1100 MPa em temperatura ambiente (23 °C). Em temperaturas próximas à T_g (47 ± 2 °C), o módulo de armazenamento do material cai para aproximadamente 500 MPa (queda entre 2 e 3 vezes em comparação ao estado inicial). Tal comportamento é descrito por (Guo, 2017). Já para o estado borrachoso do CPRFA, o E' é constante em aproximadamente 150 MPa, comprovando o comportamento de polímeros amorfos proposto por (Neto, 1997).

A diferença entre a T_g do PU (65 ± 2 °C) e a T_g do CPRFA (47 ± 2 °C) pode ser justificada pela falta de adesão entre a fase reforço e a fase matriz, além da redução nas ligações cruzadas do compósito em relação ao PU.

4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA - TGA

A partir dos gráficos da perda de massa e da primeira derivada da massa em função da temperatura, pode-se obter as temperaturas de degradação para cada material. Inicialmente, para a matriz de PU, observa-se três regiões principais de degradação, conforme Figura 31. A primeira, em aproximadamente 295 ± 2 °C, corresponde à quebra da ligação uretânica. A segunda e a terceira ocorrem, respectivamente, em 370 ± 2 °C e 470 ± 2 °C, sendo relacionadas com a decomposição do éster. Os valores obtidos são coerentes com as temperaturas descritas por (Trovati et al., 2010; Alves et al., 2023).

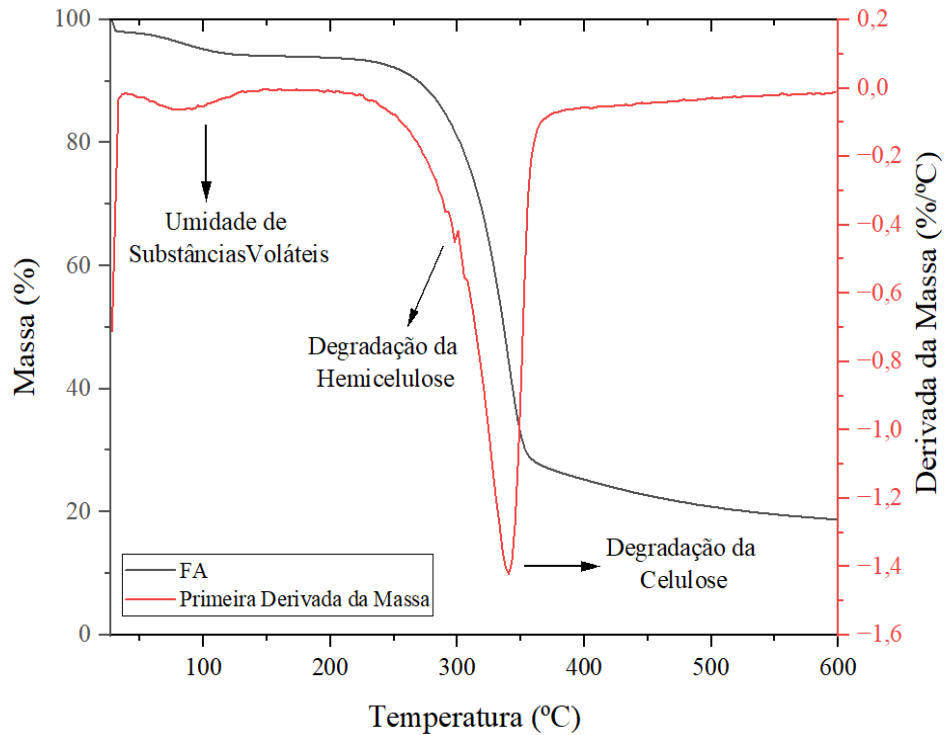
Figura 31 – TGA PU



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Em relação à análise termogravimétrica da FA, observa-se três regiões térmicas em destaque, conforme mostrado na Figura 32. A primeira ocorre em aproximadamente 80 ± 2 °C e se dá pela evaporação de umidade presente e substâncias voláteis. A segunda etapa acontece em 298 ± 2 °C e é justificada pela degradação de componentes de baixo peso molecular, como a hemicelulose. Já em 340 ± 2 °C ocorre a terceira etapa: a degradação térmica da celulose. Em 370 ± 2 °C há a degradação da lignina. Os resultados extraídos do TGA são coerentes com os valores de degradação térmica de fibras naturais propostos por Azwa et al. (2013) e Nurul Fazita et al. (2016).

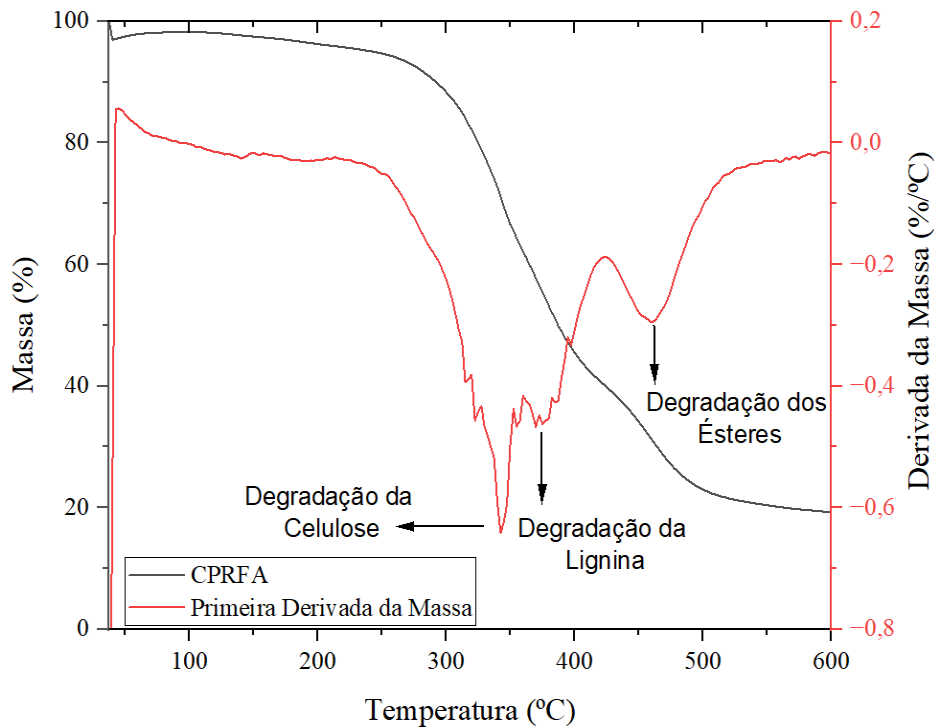
Figura 32 – TGA FA



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

A amostra de CPRFA apresenta uma combinação de propriedades térmicas das duas fases existentes, como mostra a Figura 33. Percebe-se que há três picos principais. O primeiro, em 342 ± 2 °C, corresponde à degradação da celulose presente na FA (reforço). Já o segundo, em 370 ± 2 °C, representa a degradação da lignina. O terceiro pico mais evidente, em 460 ± 2 °C corresponde à degradação dos ésteres presente no PU (matriz).

Figura 33 – TGA CPRFA



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

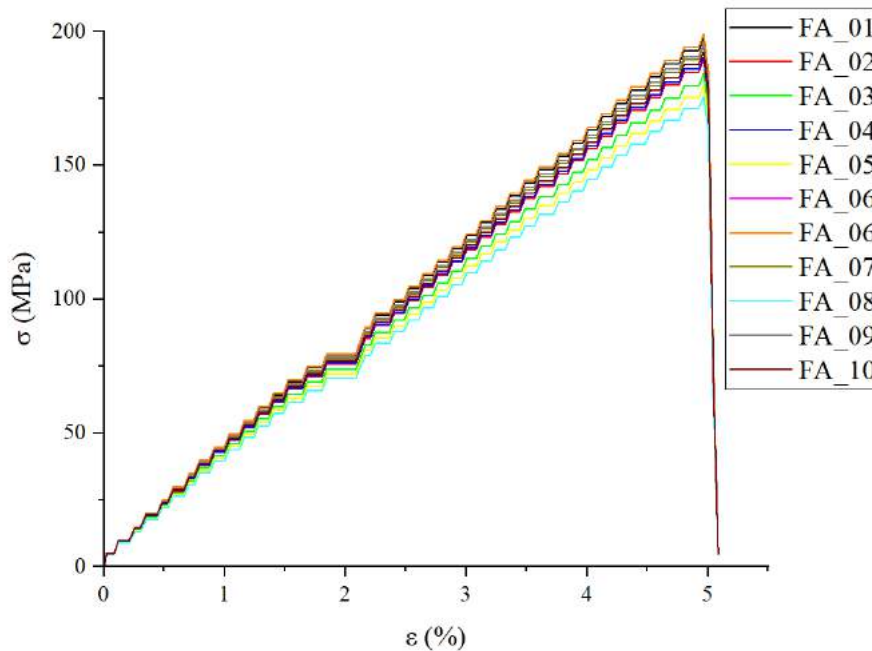
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO DO FIO DE ALGODÃO

O processo de posicionamento dos CDP nas garras da máquina universal de ensaios foi realizado de forma a preservar a estrutura original da FA. Antes de iniciar o ensaio, não houve aplicação de pré-carga. Após tratamento dos dados, obteve-se a média e desvio padrão das propriedades da FA, conforme mostrado na Tabela 10. O valor de D é de $31,98 \pm 1,35 \text{ tex}$, o E é $4,41 \pm 0,18 \text{ GPa}$ e a σ_{\max} é de $190,00 \pm 7,80 \text{ MPa}$. A Figura 34 apresenta o gráfico $\sigma \times \varepsilon$ dos CDP de FA.

Tabela 10 – Ensaio de Tração do Fio de Algodão

	D (tex)	E (GPa)	σ_{\max} (MPa)
FA₀₁	30,64	4,60	197,99
FA₀₂	32,00	4,40	189,58
FA₀₃	32,92	4,28	184,28
FA₀₄	31,82	4,43	190,65
FA₀₅	33,72	4,18	179,91
FA₀₆	30,44	4,63	199,29
FA₀₇	31,20	4,52	194,44
FA₀₈	34,52	4,08	175,74
FA₀₉	31,00	4,54	195,69
FA₁₀	31,52	4,47	192,46
Média	31,98	4,41	190,00
Desvio Padrão	1,35	0,18	7,80

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 34 – Curva σ (MPa) x ε (%) dos CDP de FA

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Apesar das propriedades obtidas serem inferiores às apresentadas na Tabela 2, o desvio padrão calculado apresenta uma baixa variação dos resultados entre CDP de FA, confirmando a exatidão e precisão dos resultados. A abundância de celulose nas fibras de algodão (entre 85 e 90%) contribui com a elevada absorção de umidade. Assim, o material apresenta comportamento inferior ao previsto por teoria.

4.5 ENSAIO DE TRAÇÃO DO POLIURETANO

O ensaio de tração do PU foi realizado pela estudante do mestrado em Engenharia Mecânica da UDESC/CCT, Vanessa Azevedo Santos, e utilizado pelo autor do presente trabalho graças à parceria entre pesquisas do Laboratório de Vibrações e Estruturas Leves (LaVEL). As propriedades mecânicas do PU foram calculadas, sendo E_1 igual a $0,89 \pm 0,22$ GPa, σ_{\max} de $19,66 \pm 2,97$ MPa e ε_{\max} igual a $4,67 \pm 1,75\%$, conforme Tabela 11. Os valores obtidos para as propriedades mecânicas não podem ser comparados com valores da literatura, visto que a origem e proporção utilizada para a mistura da matriz são diferentes dos PUs encontrados nas pesquisas anteriormente realizadas.

Tabela 11 – Propriedades Mecânicas do PU

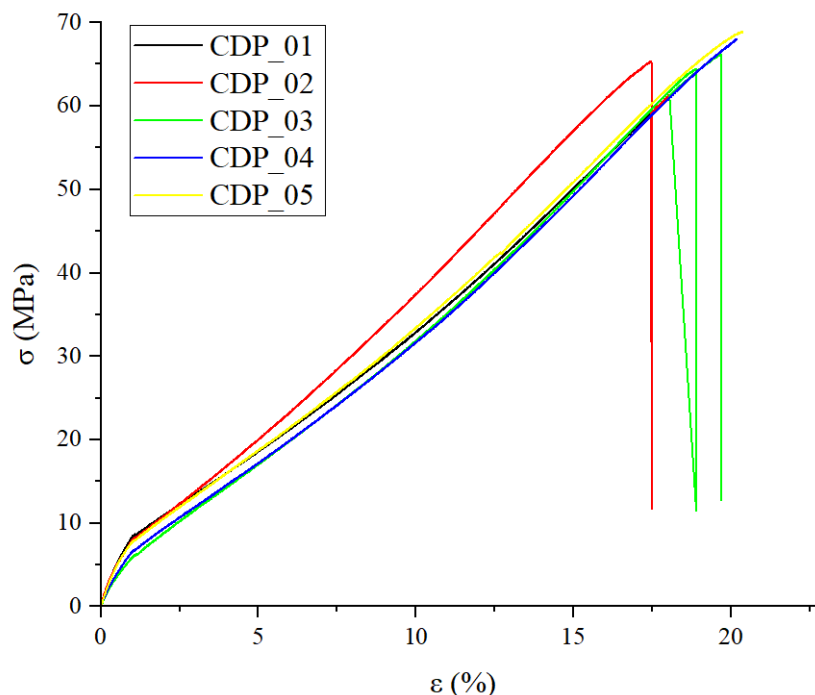
	E_1 (GPa)	σ_{\max} (MPa)	ε_{\max} (%)
PU₀₁	1,07	16,33	6,55
PU₀₂	0,96	22,04	4,35
PU₀₃	0,64	20,60	3,10
Média	0,89	19,66	4,67
Desvio Padrão	0,22	2,97	1,75

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

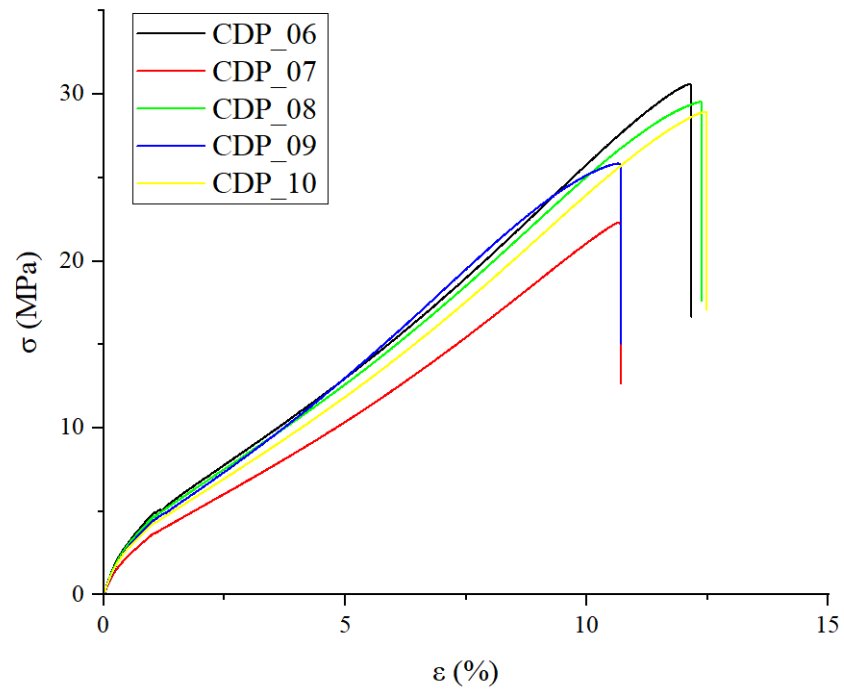
4.6 ENSAIO DE TRAÇÃO DO COMPÓSITO DE POLIURETANO REFORÇADO COM FIBRA DE ALGODÃO

A partir dos valores de comprimento e largura dos CDP, calculou-se a tensão exercida nos compósitos numa relação de força (exercida pela máquina universal de ensaios) e área. Assim, determinou-se a curva tensão (MPa) \times deformação (%) dos CPRFA orientados a $[0^\circ]_2$, $[90^\circ]_4$ e $[\pm 45^\circ]_8$ a fim de obter as propriedades mecânicas dos CDP. As Figuras 35, 36 e 37 representam as curvas $\sigma \times \varepsilon$ das orientações $[0^\circ]_2$, $[90^\circ]_4$ e $[\pm 45^\circ]_8$, respectivamente. As tabelas 12, 13 e 14 apresentam as propriedades mecânicas obtidas para cada corpo de prova e orientação, com valores médios e desvio padrão calculados. X_t , Y_t e S_{12} são, respectivamente, a resistência à tração longitudinal, resistência à tração transversal e a resistência ao cisalhamento.

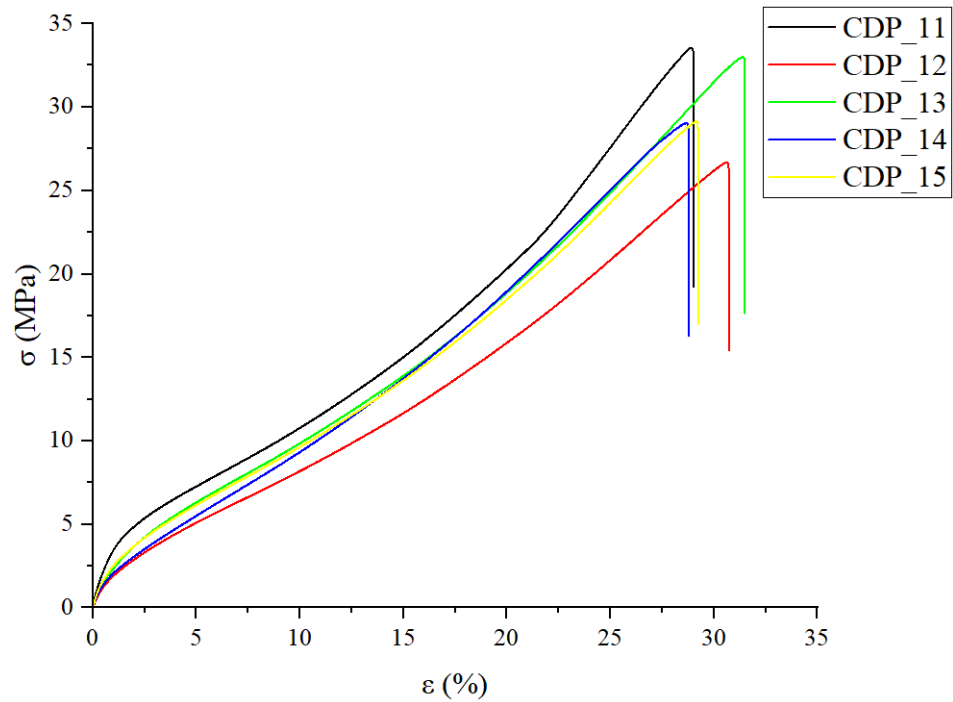
Figura 35 – Curva σ (MPa) \times ε (%) do CPRFA à $[0^\circ]_2$



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 36 – Curva σ (MPa) \times ε (%) do CPRFA à $[90^\circ]_4$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 37 – Curva σ (MPa) \times ε (%) do CPRFA à $[\pm 45^\circ]_8$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Tabela 12 – Propriedades Mecânicas dos CDP à $[0^\circ]_2$

	E_1 (GPa)	X_t (MPa)	ε_{\max} (%)
CDP₀₁	1,83	74,71	19,69
CDP₀₂	1,41	55,66	19,69
CDP₀₃	1,71	69,35	19,69
CDP₀₄	1,52	70,51	21,41
CDP₀₅	1,43	74,20	21,41
Média	1,58	68,89	20,38
Desvio Padrão	0,18	7,74	0,94

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Tabela 13 – Propriedades Mecânicas dos CDP à $[90^\circ]_4$

	E_2 (GPa)	Y_t (MPa)	ε_{\max} (%)
CDP₀₆	0,96	30,61	12,17
CDP₀₇	0,72	25,87	10,71
CDP₀₈	0,97	29,54	12,18
CDP₀₉	1,19	25,85	10,71
CDP₁₀	1,13	28,94	12,49
Média	0,99	28,16	11,65
Desvio Padrão	0,18	2,18	0,87

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

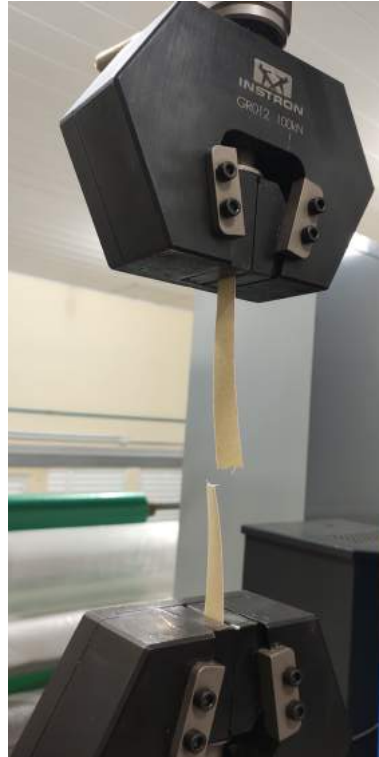
Tabela 14 – Propriedades Mecânicas dos CDP à $[\pm 45^\circ]_8$

	E_{12} (GPa)	S_{12} (MPa)	ε_{\max} (%)
CDP₁₁	0,63	33,55	28,91
CDP₁₂	0,43	28,60	30,65
CDP₁₃	0,58	32,99	31,38
CDP₁₄	0,52	29,03	28,68
CDP₁₅	0,67	29,14	29,16
Média	0,57	30,66	29,76
Desvio Padrão	0,08	2,40	1,06

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Os CDP orientados à $[0^\circ]_2$ apresentaram comportamento de falha esperado, com rompimento das fibras, como mostrado na Figura 38. Os valores de módulo de elasticidade, tensão e deformação máxima foram maiores nesta orientação em comparação com os demais.

Figura 38 – CDP de CPRFA ensaiado



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

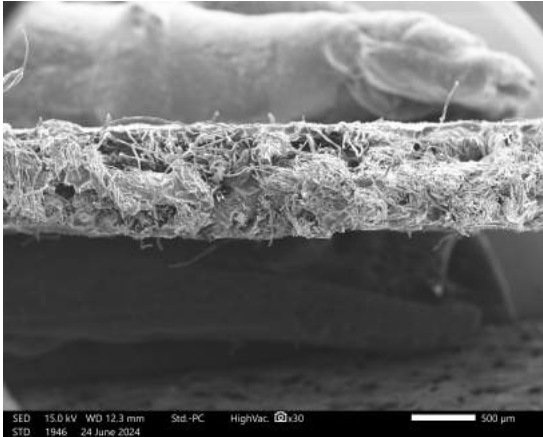
Quando orientados à $[90^\circ]_4$, as falhas se deram na região da matriz, comportamento também esperado devido à menor quantidade de fibras em relação às fibras dispostas na direção perpendicular do tecido (2 fibras na transversal para 1 na longitudinal). O valor médio de tensão máxima e módulo de elasticidade dos CPRFA à $[90^\circ]_4$ são ligeiramente superiores aos valores encontrados no ensaio do PU. Os valores são coerentes visto que a falha também se dá na matriz, mas com adição de fibras, acarretando num aumento das propriedades mecânicas.

Os CPRFA à $[\pm 45^\circ]_8$ apresentam cisalhamento entre as fibras, resultando no estiramento dos CDP, comportamento, este, esperado. Os valores de módulo de cisalhamento transversal não foram obtidos devido à indisponibilidade de um aparelho que pudesse medir a deformação na direção transversal à aplicação de força. Porém, os valores de módulo de elasticidade, resistência máxima ao cisalhamento e deformação foram obtidos.

4.7 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DOS CPRFA

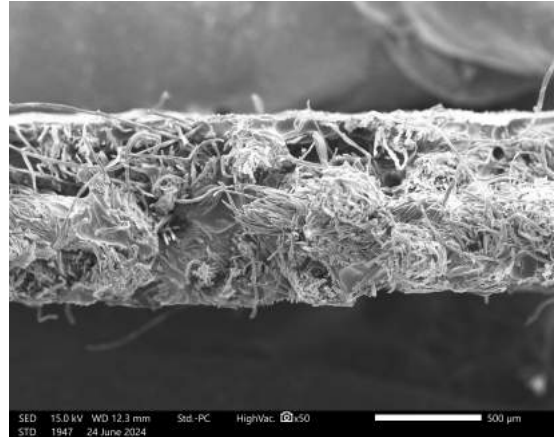
Após realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura, obteve-se as micrografias dos CDP. As Figuras 39, 40, 41 e 42 mostram o CPRFA à $[0^\circ]_2$ analisado no microscópio eletrônico de varredura (MEV) com resoluções de 500 e 100 μm .

Figura 39 – $[0^\circ]_2$ com Resolução de 500 μm



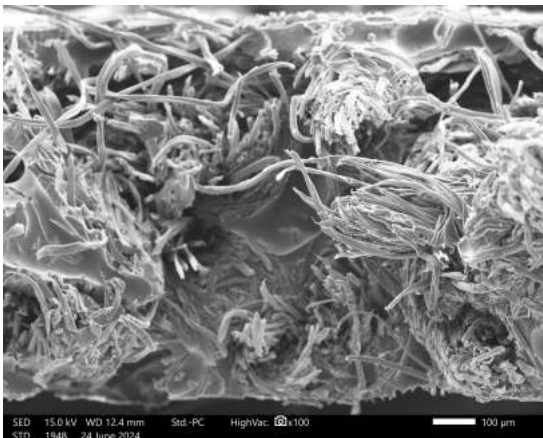
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 40 – $[0^\circ]_2$ com Resolução de 500 μm



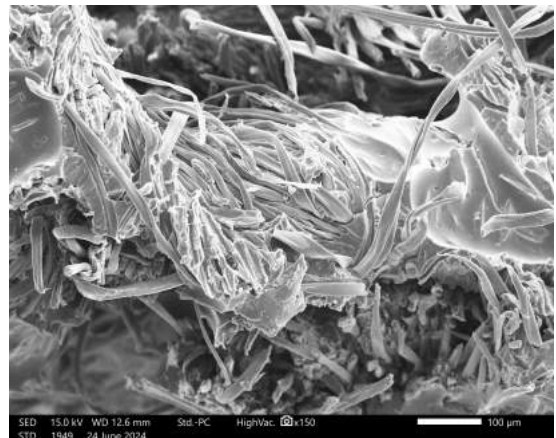
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 41 – $[0^\circ]_2$ com Resolução de 100 μm



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

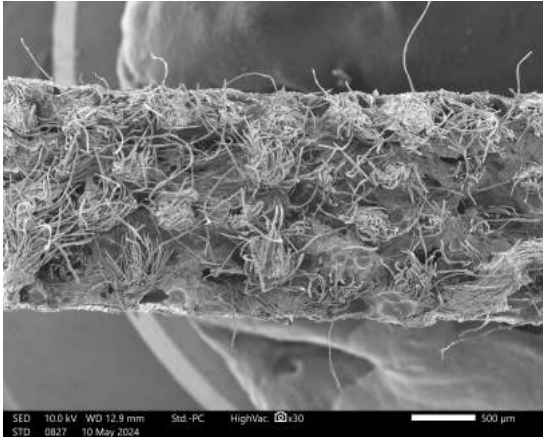
Figura 42 – $[0^\circ]_2$ com Resolução de 100 μm



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

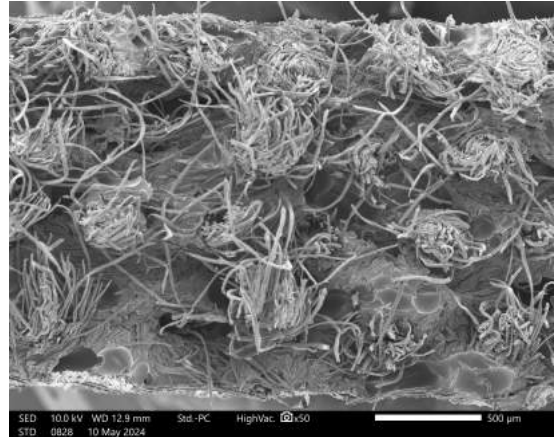
Para os CPRFA à $[90^\circ]_4$, as resoluções de 500 e 100 μm da região fraturada são mostradas, respectivamente, pelas Figuras 43, 44, 45 e 46.

Figura 43 – $[90^\circ]_4$ com Resolução de 500 μm



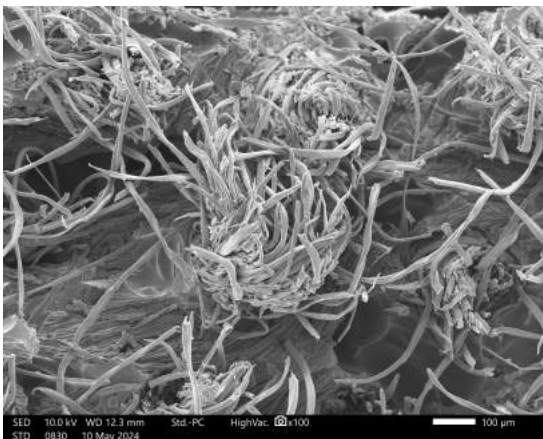
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 44 – $[90^\circ]_4$ com Resolução de 500 μm



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 45 – $[90^\circ]_4$ com Resolução de 100 μm



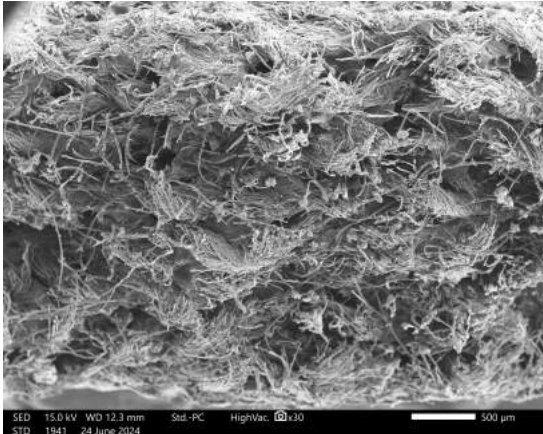
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 46 – $[90^\circ]_4$ com Resolução de 100 μm

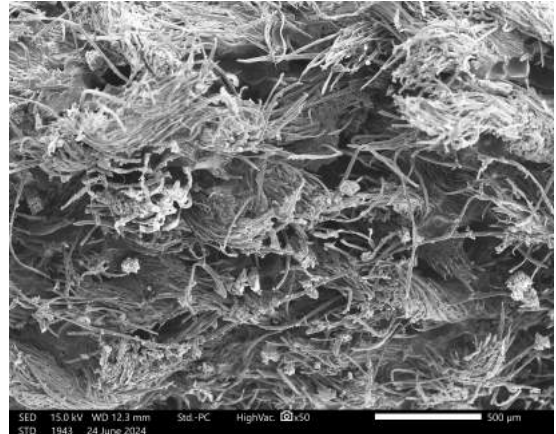


Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

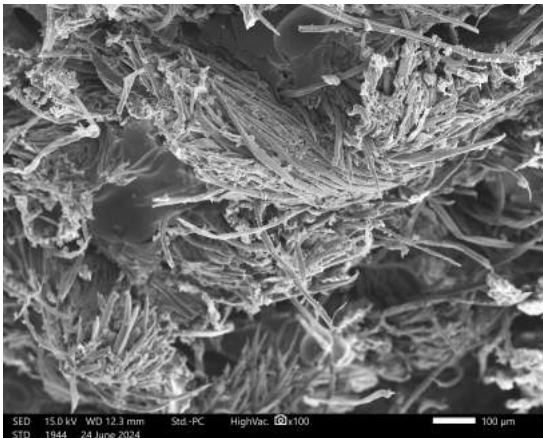
A fractografia dos CPRFA à $[\pm 45^\circ]_8$ com resoluções de 500 e 100 μm são apresentadas nas Figuras 47, 48, 49 e 50.

Figura 47 – $[\pm 45^\circ]_8$ Resolução de 500 μm 

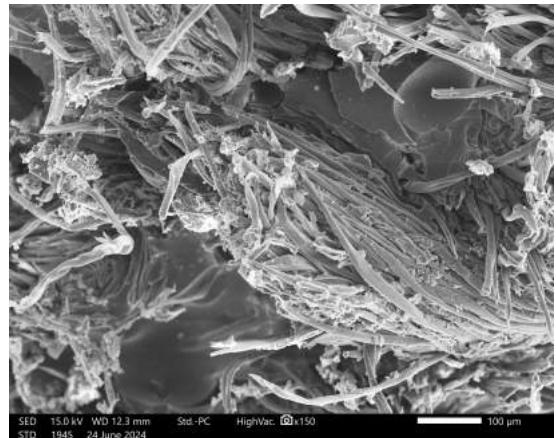
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 48 – $[\pm 45^\circ]_8$ Resolução de 500 μm 

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 49 – $[\pm 45^\circ]_8$ Resolução de 100 μm 

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 50 – $[\pm 45^\circ]_8$ Resolução de 100 μm 

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

As imagens comprovam a existência de vazios que, por sua vez, estão associados ao processo de fabricação dos compósitos, destacando a necessidade de otimizar o método de produção do material. Para o CPRFA à $[0^\circ]_2$, nota-se a falha na região das fibras (esperado). Considerando o CPRFA à $[90^\circ]_4$, observa-se que as fibras mantiveram a orientação original, tendo a falha ocorrido na região da matriz, comportamento esperado para tal orientação. Por fim, o CPRFA $[\pm 45^\circ]_8$ mostra o efeito do cisalhamento entre as fibras, visto que as mesmas se apresentam com inclinações em relação à posição original.

A Figura 51 apresenta um CPRFA à $[0^\circ]_2$ numa resolução de 50 μm . Observa-se que a ambas as fases não possuem boa interação, pois não estão totalmente unidas. Também percebe-se a presença de vazios na matriz. A justificativa é a formação de CO_2 a partir da reação entre o polioli e o isocianato (reagentes do PU).

Figura 51 – $[0^\circ]_2$ com Ampliação de 500x

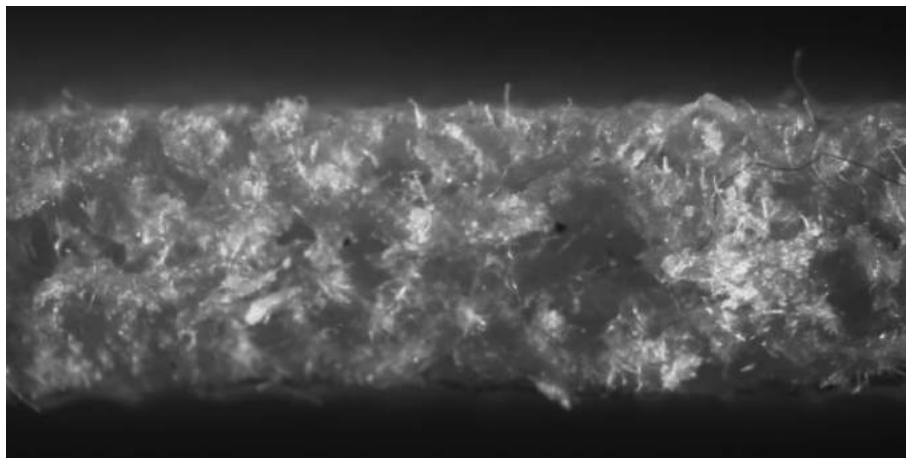


Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

4.8 DETERMINAÇÃO DAS FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS VIA ESTEREOMICROSCÓPIO

Com o estereomicroscópio Leica MZ9.5, foi possível obter uma imagem da seção transversal de um CPRFA à $[0^\circ]_2$, conforme Figura 52. A região branca corresponde às fibras, enquanto o escuro é a matriz. Assim, com o *software* de processamento de imagem ImageJ, estimou-se a fração volumétrica de fibra, 70%, e matriz, 30%, como mostrado na Figura 53. Os valores percentuais encontrados foram diferentes dos estimados, revelando problemas na fabricação dos compósitos.

Figura 52 – Imagem CPRFA à $[0^\circ]_2$ no Estereomicroscópio Leica MZ9.5



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 53 – *ImageJ* revelando frações volumétricas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

4.9 REGRA DAS MISTURAS

Com todos os valores necessários para aplicação nos modelos de Voigt (limite superior) e Reuss (limite inferior), tem-se que o limite superior do módulo de elasticidade do CPRFA, para os parâmetros de projeto dos corpos de prova, é igual a

$$E_c = 2,47GPa, \quad (6)$$

enquanto o limite inferior é

$$E_c = 1,38GPa. \quad (7)$$

Já para as frações volumétricas encontradas via estereomicroscópio, tem-se que o limite superior do módulo de elasticidade é de

$$E_c = 3,35GPa, \quad (8)$$

e o limite inferior é

$$E_c = 2,01GPa. \quad (9)$$

Assim, o limite superior analítico para condições de projeto apresenta módulo de elasticidade E_1 igual a 2,47 GPa, para frações estipuladas via estereomicroscópio é de 3,35 GPa, enquanto o CPRFA à $[0^\circ]_2$ possui módulo de 1,58 GPa. Já para o limite inferior, o E_2 de projeto é de 1,38 GPa, com frações recalculadas é 2,01 GPa, enquanto o módulo do CPRFA à $[90^\circ]_4$ é igual a 0,99 GPa. A fração volumétrica de vazios é de aproximadamente 50% nos CDP analisados.

Sendo assim, percebe-se que os compósitos de poliuretano reforçados com fibras de algodão não obtiveram as propriedades mecânicas esperadas analiticamente graças à formação de vazios no material. A celulose é altamente hidrofílica, justificando a baixa adesão entre fibra e matriz, resultando em propriedades mecânicas mais pobres do que o previsto, além da presença do dióxido de carbono proveniente da reação dos reagentes da resina de PU.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste estudo consistiu na caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano reforçados com fibras de algodão de forma experimental visando a substituição em estruturas de materiais convencionais ou fibras sintéticas pelo material proposto. As considerações do trabalho foram:

- A obtenção de propriedades térmicas e mecânicas da fibra de algodão são compreendidas de uma forma melhor a partir dos estudos da microestrutura das FA. As fibras estudadas foram extraídas pelo método de maceração e os tecidos produzidos por fiação. Assim, com o objetivo de analisar o possível potencial das fibras de algodão da espécie *Gossypium hirsutum*, foram realizados ensaios térmicos e mecânicos na fibra. A picnometria de gás revelou que a densidade da FA estudada é de $1,5166 \pm 0,0008 \text{ g/cm}^3$. A análise termogravimétrica evidenciou temperaturas de degradação térmica da FA: $80 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (evaporação de umidade presente), $298 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (degradação da hemicelulose), $340 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (degradação da celulose) e $370 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (degradação da lignina). Para o ensaio de tração dos fios de algodão, tem-se que o módulo de elasticidade (E) é igual a $4,41 \pm 0,18 \text{ GPa}$ e a σ_{max} é de $190,00 \pm 7,80 \text{ MPa}$.
- As propriedades mecânicas dos CDP de PU foram calculadas pela aluna do mestrado acadêmico em Engenharia Mecânica da UDESC/CCT, Vanessa Azevedo Santos, graças à parceria das pesquisas elaboradas. O módulo de elasticidade (E_1) do PU é de $0,89 \pm 0,22 \text{ GPa}$, a tensão máxima (σ_{max}) de $19,66 \pm 2,97 \text{ MPa}$ e a deformação máxima (ϵ_{max}) é igual a $4,67 \pm 1,75\%$. O DMA revelou que a T_g do PU é de $65 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. A TGA mostrou que as principais temperaturas de degradação do PU são: $295 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (quebra da ligação uretânica), $370 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $470 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (decomposição dos ésteres).
- O método utilizado para fabricação de corpos de prova de CPRFA foi a moldagem por transferência de resina assistida à vácuo. As orientações estudadas e respectivas sequências de empilhamento foram $[0^\circ]_2$, $[90^\circ]_4$ e $[\pm 45^\circ]_8$. A confecção dos CDP e a realização dos ensaios seguiram as normas ASTM D3039 (0° e 90°) e D3518 ($\pm 45^\circ$). Quando ensaiados à tração, foram obtidos gráficos $\sigma \times \epsilon$ das diferentes orientações de CPRFA. A partir dos gráficos foram obtidas propriedades mecânicas dos CDP. O módulo de elasticidade (E_1) é de $1,58 \pm 0,18 \text{ GPa}$ para $[0^\circ]_2$, (E_2) é de $0,99 \pm 0,18 \text{ GPa}$ para $[90^\circ]_4$. Já o E_{12} , para $[\pm 45^\circ]_8$, é de $0,57 \pm 0,08 \text{ GPa}$. As tensões máximas para $[0^\circ]_2$, $[90^\circ]_4$ e $[\pm 45^\circ]_8$ são, respectivamente, $68,89 \pm 7,74 \text{ MPa}$, $28,16 \pm 2,18 \text{ MPa}$ e $30,66 \pm 2,40 \text{ MPa}$. Já as deformações máximas para $[0^\circ]_2$, $[90^\circ]_4$ e $[\pm 45^\circ]_8$ são $20,38 \pm 0,94 \%$, $11,65 \pm 0,87 \%$ e $29,76 \pm 1,06 \%$, respectivamente.
- O DMA revelou que a T_g do CPRFA é de $47 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, valor $18 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ menor que a T_g do PU. Tal comportamento é justificado pela presença de umidade na amostra de CPRFA,

demonstrando uma ação plastificante da água. Já o TGA mostrou que as temperaturas de degradação do compósito consistem na combinação de temperaturas de degradação das duas fases presentes (matriz e reforço). Após, através de estereomicroscópio, foram descobertas as frações volumétricas de fibra e matriz (70% e 30%, respectivamente). Assim, calculou-se pelo método da regra das misturas os limites superior e inferior do módulo de elasticidade do CPRFA esperados. O módulo de elasticidade esperado para o CPRFA à $[0^\circ]_2$ é de 3,35 GPa, enquanto o limite inferior (CPRFA à $[90^\circ]_4$) é de 2,01 GPa. A fração volumétrica de vazios nas amostras é de 50%.

- Através de ensaio de microscopia eletrônica de varredura, pôde-se avaliar a região de fratura dos CPRFA orientados à $[0^\circ]_2$, $[90^\circ]_4$ e $[\pm 45^\circ]_8$. Os compósitos apresentaram vazios, conforme proposto pela diferenças de propriedades obtidas entre regra das misturas e resultados experimentais. Assim, conclui-se que o cuidado com a não absorção de umidade por parte da FA e a melhoria do processo de fabricação dos CPRFA devem ser realizados para obtenção de propriedades mecânicas mais compatíveis com o esperado teoricamente.

Com base no exposto, a utilização de compósitos de poliuretano reforçados com fibras de algodão apresentam perspectivas promissoras nos setores da mobilidade, principalmente o aeronáutico e automotivo. A utilização de CPRFA permite a redução de custo e de massa do produto final, além de ser proveniente de fontes renováveis e ser biodegradável, gerando assim impacto social e econômico positivo pela geração de empregos em diferentes setores da economia.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade e aprimoramento do atual estudo, sugere-se:

- Ajustar processo de fabricação dos compósitos a fim de obter maior teor de fibras, aumentando assim propriedades como módulo de elasticidade e tensão máxima admissível;
- Variar a proporção entre polioli e isocianato para estudar o comportamento do compósito quando em diferentes condições de mistura da matriz de PU.
- Elaborar método de mistura para o PU para minimizar a quantidade de bolhas geradas pela reação natural da matriz.
- Extrair o módulo de cisalhamento no plano e resistência ao cisalhamento para CPRFA orientados à $[\pm 45^\circ]_8$, e obtenção do coeficiente de Poisson para todas as orientações através de dispositivo de imagem que possa captar deformações em diferentes direções.
- Ensaiar os CPRFA à flexão.

REFERÊNCIAS

- Akovali, Güneri. **Handbook of composite fabrication**. [S.l.]: iSmithers Rapra Publishing, 2001. Citado na página 21.
- Al-Oqla, Faris M; Sapuan, SM. **Materials selection for natural fiber composites**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2017. Citado na página 26.
- Al-Oqla, Faris M; Sapuan, S. Natural fiber composites. **Materials Selection**, 2018. Citado na página 30.
- Almeida, Nuno Miguel Bastos de et al. Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta. 2012. Citado na página 20.
- Alves, Lucas Repecka et al. Synthesis and characterization of polyurethane and samarium (iii) oxide and holmium (iii) oxide composites. **Polímeros**, SciELO Brasil, v. 33, n. 4, p. e20230039, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 51.
- Araujo, JR et al. Biomicrofibrilar composites of high density polyethylene reinforced with curauá fibers: Mechanical, interfacial and morphological properties. **Composites Science and Technology**, Elsevier, v. 70, n. 11, p. 1637–1644, 2010. Citado na página 27.
- Asim, Mohammad et al. Processing of hybrid polymer composites—a review. **Hybrid polymer composite materials**, Elsevier, p. 1–22, 2017. Citado na página 24.
- ASTM. **D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1971. Citado na página 16.
- ASTM. **D3518 Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1976. Citado na página 16.
- ASTM. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. [S.l.]: ASTM International, 2018. (ASTM D638-14). Citado na página 42.
- ASTM. **Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method**. [S.l.]: ASTM International, 2021. (ASTM D2256/D2256M-21). Citado na página 40.
- Azwa, ZN et al. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. **Materials & Design**, Elsevier, v. 47, p. 424–442, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 15, 28 e 52.
- Balasubramanian, Murugesan. **Composite materials and processing**. [S.l.]: CRC press Boca Raton, 2014. v. 711. Citado na página 19.
- Barikani, M.; Mohammadi, M. Synthesis and characterization of starch-modified polyurethane. **Carbohydrate Polymers**, v. 68, n. 4, p. 773–780, 2007. Citado na página 31.
- Bashir, Muhammad Ahsan. Use of dynamic mechanical analysis (dma) for characterizing interfacial interactions in filled polymers. **Solids**, MDPI, v. 2, n. 1, p. 108–120, 2021. Citado na página 38.
- Biron, Michel. **Thermosets and composites**. [S.l.]: Elsevier, 2003. Citado na página 22.

Biron, Michel. **Thermoplastics and thermoplastic composites**. [S.l.]: William Andrew, 2012. Citado na página 21.

Bledzki, AK; Gassan, Jochen. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in polymer science**, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999. Citado na página 27.

Borsoi, Cleide et al. Obtenção e caracterização de compósitos utilizando poliestireno como matriz e resíduos de fibras de algodão da indústria têxtil como reforço. **Polímeros**, SciELO Brasil, v. 21, p. 271–279, 2011. Citado na página 31.

Callister, William. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução** . [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 21 e 42.

Campbell Jr, Flake C. **Manufacturing technology for aerospace structural materials**. [S.l.]: Elsevier, 2011. Citado na página 18.

Campilho, Raul DSG. **Natural fiber composites**. [S.l.]: CRC Press, 2015. Citado na página 24.

Canevarolo Jr, Sebastião V. Ciência dos polímeros. **Artiliber editora, São Paulo**, v. 24, 2002. Citado na página 22.

Cangemi, José Marcelo; Santos, AM dos; Claro, NS. Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil. **Química Nova na Escola**, v. 31, n. 3, p. 159–164, 2009. Citado na página 23.

Chawla, Krishan K. **Composite materials: science and engineering**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 20.

Chen, Yongchun et al. Preparation and characterization of nanocomposite polyurethane. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 279, n. 2, p. 370–378, 2004. Citado na página 31.

Cheremisinoff, Nicholas P. **Handbook of polymer science and technology**. [S.l.]: CRC Press, 1989. v. 4. Citado na página 21.

Chiou, Bor-Sen; Schoen, Paul E. Effects of crosslinking on thermal and mechanical properties of polyurethanes. **Journal of applied polymer science**, Wiley Online Library, v. 83, n. 1, p. 212–223, 2002. Citado na página 23.

Clyne, Trevor William; Hull, Derek. **An introduction to composite materials**. [S.l.]: Cambridge university press, 2019. Citado na página 20.

Da Costa, Romeu RC et al. Experimental and numerical analysis of single lap bonded joints: Epoxy and castor oil pu-glass fibre composites. **The Journal of adhesion**, Taylor & Francis, v. 93, n. 1-2, p. 77–94, 2017. Citado na página 15.

da Costa, Romeu RC et al. Polyurethane derived from castor oil reinforced with long cotton fibers: Static and dynamic testing of a novel eco-friendly composite material. **Journal of Composite Materials**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 54, n. 22, p. 3125–3142, 2020. Citado na página 15.

da Silva, Amanda AX et al. Flammability and mechanical behavior of cotton fiber polymeric composite laminate with polyurethane and alumina trihydrate. **Journal of Composite Materials**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 56, n. 4, p. 645–662, 2022. Citado na página 15.

- de Souza, Felipe Eloy et al. Comparison between mechanical properties of bio and synthetic composites for use in aircraft interior structures. 2015. Citado na página 32.
- Desai, Sonal et al. Effect of polyols and diisocyanates on thermo-mechanical and morphological properties of polyurethanes. **European Polymer Journal**, Elsevier, v. 36, n. 4, p. 711–725, 2000. Citado na página 23.
- Dodiuk, Hanna. **Handbook of thermoset plastics**. [S.l.]: William Andrew, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- dos Santos, Alexandre M; Sydenstricker, TH; Amico, Sandro C. Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia. **Curitiba: Universidad Federal de Parana**, 2006. Citado na página 17.
- Eloy, F de S et al. Comparison between mechanical properties of bio and synthetic composites for use in aircraft interior structures. In: **Meeting on Aeronautical Composite Materials and Structures, São Carlos, Brazil**. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 15.
- Fang, David D. **Cotton fiber: physics, chemistry and biology**. [S.l.]: Springer, 2018. Citado na página 29.
- Folkes, MJ. Short fibre reinforced thermoplastics. (**No Title**), 1982. Citado na página 47.
- Gama, Nuno et al. Pu composites based on different types of textile fibers. **Journal of Composite Materials**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 55, n. 24, p. 3615–3626, 2021. Citado na página 32.
- Ghesquiere, A; Bauwens, Jean Claude. Theoretical model for the elastic behavior of composites reinforced with short fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, Wiley Online Library, v. 20, n. 4, p. 891–902, 1976. Citado na página 46.
- Gholampour, Aliakbar; Ozbakkaloglu, Togay. A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications. **Journal of Materials Science**, Springer, v. 55, n. 3, p. 829–892, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- Gordon, Stuart; Hsieh, You-lo. **Cotton: Science and technology**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2006. Citado na página 30.
- Grosberg, Percy; Iype, Cherian. **Yarn production: Theoretical aspects**. [S.l.]: Textile Institute, 1999. Citado na página 26.
- Guo, Q. **Thermosets: Structure, Properties, and Applications**. Elsevier Science, 2017. (Woodhead Publishing in Materials). ISBN 9780081010280. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=qCxHDgAAQBAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 51.
- Haigler, Candace H et al. Cotton fiber: a powerful single-cell model for cell wall and cellulose research. **Frontiers in plant science**, Frontiers, v. 3, p. 26402, 2012. Citado na página 29.
- Haines, PJ. Thermogravimetry. In: **Thermal Methods of Analysis: Principles, Applications and Problems**. [S.l.]: Springer, 1995. p. 22–62. Citado na página 39.

Hargitai, Hajnalka; Rácz, Ilona; Anandjiwala, Rajesh D. Development of hemp fiber reinforced polypropylene composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 21, n. 2, p. 165–174, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

Holbery, James; Houston, Dan. Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. **Jom**, Springer, v. 58, n. 11, p. 80–86, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 15, 24, 25 e 30.

Iwasaki, KMK et al. Carbon nanotube deposition through intermittent high voltage pulsed electrophoresis on jute fibre. **Applied Surface Science**, Elsevier, v. 611, p. 155548, 2023. Citado na página 15.

Iwasaki, Kelvin MK; Reis, Pedro A; De Medeiros, Ricardo. Characterization of long bamboo guadua angustifolia fibre composite extracted via rotary–peeling method. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Springer, v. 44, n. 4, p. 135, 2022. Citado na página 15.

Iwasaki, K. M. K. **Análise experimental e computacional de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bambu Guadua angustifolia visando a aplicação estrutural**. 180 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2020. Orientador: Ricardo de Medeiros. Citado na página 15.

Jones, David RH; Ashby, Michael F. **Engineering materials 2: an introduction to microstructures and processing**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2012. Citado na página 22.

Joslyn, Maynard Alexander. *Methods in food analysis. physical, chemical and instrumental methods of analysis*. 1970. Citado na página 28.

Kang, MK; Lee, WI; Hahn, HT. Analysis of vacuum bag resin transfer molding process. **Composites Part A: Applied science and manufacturing**, Elsevier, v. 32, n. 11, p. 1553–1560, 2001. Citado na página 35.

Kaw, Autar K. **Mechanics of composite materials**. [S.l.]: CRC press, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 18.

Kozłowski, Ryszard M; Mackiewicz-Talarczyk, Maria. **Handbook of natural fibres: volume 1: types, properties and factors affecting breeding and cultivation**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2020. Citado na página 29.

Levy Neto, Flávio; Pardini, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. [S.l.]: Editora Blucher, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 17, 19, 20 e 24.

Madsen, Bo; Gamstedt, E Kristofer et al. Wood versus plant fibers: similarities and differences in composite applications. **Advances in Materials Science and Engineering**, Hindawi, v. 2013, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

Madsen, Bo et al. Hemp yarn reinforced composites–i. yarn characteristics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 38, n. 10, p. 2194–2203, 2007. Citado na página 26.

Mahdi, Elsadig; Dean, Aamir. The effect of filler content on the tensile behavior of polypropylene/cotton fiber and poly (vinyl chloride)/cotton fiber composites. **Materials**, MDPI, v. 13, n. 3, p. 753, 2020. Citado na página 31.

Mallick, Pankar K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design**. [S.l.]: CRC press, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 14, 17 e 19.

Mattoso, LHC; Ferreira, FC; Curvelo, Antônio Aprígio da Silva. Sisal fiber: morphology and applications in polymer composites. **Lignocellulosic-plastics composites**, 1997. Citado na página 14.

Mazumdar, Sanjay. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. [S.l.]: CrC press, 2001. Citado na página 24.

Mendonça, Paulo de Tarso Rocha de. **Materiais compostos e estruturas-sanduiche: projeto e análise**. [S.l.]: Manole, 2005. Citado na página 14.

Modos, Mayra Aparecida. **Fabricação e estudo do comportamento mecânico de corpos de prova de poliuretana (PU) reforçados com fibra de algodão (FA)**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Citado na página 32.

Moffitt, Theodore P.; Chen, Yin-Chu; Prael, Scott A. Preparation and characterization of polyurethane optical phantoms. **Journal of Biomedical Optics**, SPIE, v. 11, n. 4, 2006. Citado na página 31.

Moura, Maria José; Figueiredo, Maria Margarida. Aplicação das técnicas de picnometria de gás e de porosimetria de mercúrio à caracterização da madeira de e. globulus. **Silva Lusitana**, v. 10, n. 2, p. 207–216, 2002. Citado na página 35.

Nagavally, Rahul Reddy. Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. **Int. J. Mech. Prod. Eng.**, v. 5, n. 9, p. 82–87, 2017. Citado na página 14.

Neto, Salvador Claro. **Caracterizações físico-química de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos**. Tese (Doutorado), 1997. Citado 3 vezes nas páginas 23, 38 e 51.

Nurul Fazita, MR et al. Green composites made of bamboo fabric and poly (lactic) acid for packaging applications—a review. **Materials**, MDPI, v. 9, n. 6, p. 435, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 52.

Osorio, Lina et al. Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites. **Journal of reinforced plastics and composites**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 30, n. 5, p. 396–408, 2011. Citado na página 24.

Pascault, Jean-Pierre; Williams, Roberto JJ. Thermosetting polymers. **Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing**, Wiley Online Library, p. 519–533, 2013. Citado na página 21.

Pereira, Francisco Sávio Gomes. Polímeros-fundamentos científicos e tecnológicos. **Instituto Federal de Pernambuco. Recife**, 2009. Citado na página 21.

Pereira, Paulo Henrique Fernandes et al. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. **Polímeros**, SciELO Brasil, v. 25, p. 9–22, 2015. Citado na página 27.

Petrovic, ZS et al. Thermosetting resins from vegetable oils. In: **Annual technical conference**. [S.l.: s.n.], 1999. v. 57. Citado na página 23.

Petrovic, Zoran; Guo, Andrew; Javni, Ivan. **Process for the preparation of vegetable oil-based polyols and electroninsulating casting compounds created from vegetable oil-based polyols**. [S.l.]: Google Patents, 2000. US Patent 6,107,433. Citado na página 23.

Pickering, Kim. **Properties and performance of natural-fibre composites**. [S.l.]: Elsevier, 2008. Citado na página 30.

Prashanth, S et al. Fiber reinforced composites-a review. **J. Mater. Sci. Eng**, v. 6, n. 03, p. 2–6, 2017. Citado na página 24.

Qiu, Yiping et al. Fabrication and characterization of three-dimensional cellular-matrix composites reinforced with woven carbon fabric. **Composites science and technology**, Elsevier, v. 61, n. 16, p. 2425–2435, 2001. Citado na página 23.

Rajesh, M; Pitchaimani, Jeyaraj; Rajini, NJPE. Free vibration characteristics of banana/sisal natural fibers reinforced hybrid polymer composite beam. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 144, p. 1055–1059, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

Ramamoorthy, Sunil Kumar; Skrifvars, Mikael; Persson, Anders. A review of natural fibers used in biocomposites: Plant, animal and regenerated cellulose fibers. **Polymer reviews**, Taylor & Francis, v. 55, n. 1, p. 107–162, 2015. Citado na página 24.

Rana, Sohel; Figueiro, Raul. **Fibrous and textile materials for composite applications**. [S.l.]: Springer, 2016. Citado na página 22.

Rangappa, Sanjay Mavinkere et al. Lignocellulosic fiber reinforced composites: Progress, performance, properties, applications, and future perspectives. **Polymer Composites**, Wiley Online Library, v. 43, n. 2, p. 645–691, 2022. Citado na página 28.

Saheb, D Nabi; Jog, Jyoti P. Natural fiber polymer composites: a review. **Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute**, Wiley Online Library, v. 18, n. 4, p. 351–363, 1999. Citado na página 28.

Satyanarayana, KG; Guimarães, JL; Wypych, Fernando. Studies on lignocellulosic fibers of brazil. part i: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 38, n. 7, p. 1694–1709, 2007. Citado na página 14.

Sharmin, Eram; Zafar, Fahmina. Polyurethane: an introduction. **Polyurethane**, InTech Rijeka, Croatia, v. 1, p. 3–16, 2012. Citado na página 23.

Silva, Ênio Henrique Pires da et al. Green pu as adhesive in single lap bonded joints. 2023. Citado na página 15.

Silva, Rosana Vilarim da. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003. Citado na página 23.

Stephenson, RC. Design information for thermoplastic composites: Coupled glass-fibre-reinforced polypropylene. 1979. Citado na página 46.

- Szycher, M. Polyurethanes. **Szycher'S Handbook of Polyurethanes; CRC Press Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA**, p. 1–12, 2013. Citado na página 23.
- Talreja, Ramesh; Varna, Janis. **Modeling damage, fatigue and failure of composite materials**. [S.l.]: Elsevier, 2023. Citado na página 24.
- Tamakuwala, Vigneshkumar Ramdas. Manufacturing of fiber reinforced polymer by using vartm process: A review. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 44, p. 987–993, 2021. Citado na página 35.
- Tita, Sandra Patrícia da Silva et al. Chemical modification of sugarcane bagasse and sisal fibers using hydroxymethylated lignin: Influence on impact strength and water absorption of phenolic composites. **Journal of Composite Materials**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 52, n. 20, p. 2743–2753, 2018. Citado na página 15.
- Trovati, Graziella et al. Characterization of polyurethane resins by ftir, tga, and xrd. **Journal of Applied Polymer Science**, Wiley Online Library, v. 115, n. 1, p. 263–268, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 51.
- Valcanaia, Amanda. **Avaliação do efeito da deposição de nanotubos de carbono através do processo de deposição eletroforética nas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e antimicrobianas em fibras de juta**. 17 p., 2023. Citado na página 28.
- Vasiliev, Valery V; Morozov, Evgeny V. **Advanced mechanics of composite materials and structures**. [S.l.]: Elsevier, 2018. Citado na página 14.
- Vera, Rômulo Vinícius. **Estruturas aeronáuticas de interior em compósito natural: fabricação, análise estrutural e de inflamabilidade**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado na página 15.
- Webb, Paul A; Orr, Clyde. **Analytical methods in fine particle technology**. [S.l.]: Micromeritics Instrument Corporation, 1997. Citado na página 35.