



CARACTERIZAÇÃO E FABRICAÇÃO DE COMPÓSITO COM RESINA EPÓXI VERDE REFORÇADOS COM FIBRAS DE COCO

Felipe Affonso Nunes (a57288)

Relatório final da unidade curricular de Projeto/Dissertação apresentado à **Escola Superior de Tecnologia e Gestão** para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica no âmbito de dupla diplomação com o **CEFET/RJ**.

Orientadores:

Professor Doutor João Eduardo P. C. Ribeiro

Professor Doutor João da Rocha e Silva

Professor Doutor Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Bragança, Portugal

Mai de 2024



CARACTERIZAÇÃO E FABRICAÇÃO DE COMPÓSITO COM RESINA EPÓXI VERDE REFORÇADOS COM FIBRAS DE COCO

Felipe Affonso Nunes (a57288)

Relatório final da unidade curricular de Projeto/Dissertação apresentado à **Escola Superior de Tecnologia e Gestão** para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica no âmbito de dupla diplomação com o **CEFET/RJ**.

Orientadores:

Professor Doutor João Eduardo P. C. Ribeiro

Professor Doutor João da Rocha e Silva

Professor Doutor Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Bragança, Portugal

Mai de 2024

“Life is not measured by the number of breaths we take,
but by the moments
that take our breath away”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que trilhou e mostrou-me o caminho até aqui, me deu força, conforto e paciência para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, Carlos e Marcia, que sempre me apoiaram, me incentivaram e me aconselharam em quaisquer que fossem as decisões que enfrentei em minha vida pessoal, acadêmica e profissional.

Ao meu irmão Guilherme, que durante toda a vida esteve ao meu lado em qualquer situação e sempre foi minha inspiração pessoal e profissional.

Aos meus familiares que mesmo de longe me apoiaram e torceram por mim durante minha trajetória acadêmica.

À Sarah, que por muitos anos me acompanhou, me apoiou e esteve torcendo por mim em diversas fases da minha vida pessoal e acadêmica.

Aos meus amigos no Brasil, que tenho comigo desde o ensino médio e os levo para a vida, sempre me ajudaram quando preciso e me apoiaram.

Aos Equilibrados, amigos que fiz no CEFET/RJ que compartilharam toda a minha trajetória na instituição e tiveram grande influência no meu crescimento acadêmico.

À todos os amigos que fiz em Portugal, que ao longo de quase um ano e meio passaram em minha vida deixando eternas lembranças, experiências, trocas de diferentes culturas e costumes, viagens, eventos e laços formados. Todos fizeram parte de um crescimento pessoal e acadêmico inefável e os levarei por toda a vida.

Aos caras do lab, colegas de laboratório e amigos pra vida, pessoas que dividiram grande parte do tempo dos últimos meses de mestrado comigo, dividindo vitórias, frustrações, conquistas e tornando toda essa experiência um pouco mais leve.

Em especial ao Lucas, que por toda a minha trajetória em Portugal se tornou um grande amigo e parceiro em viagens, eventos, cursos, matérias e tese de mestrado.

Aos meus professores orientadores João Ribeiro, João Rocha e Ricardo Aguiar, que estiveram disponíveis para me aconselhar e orientar sempre que tive dúvidas e dificuldades durante o desenvolvimento do projeto, responsáveis pelo êxito deste estudo.

Por fim, aos técnicos dos laboratórios do IPB que me ajudaram e auxiliaram no desenvolvimento das atividades práticas e complementares do estudo, em especial à prof^a Paula Plasencia do Laboratório de Química Analítica, o prof^o Jorge Paulo do Laboratório de Tecnologia Mecânica e a prof^a Luísa Barreira do Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais.

RESUMO

Atualmente, a utilização dos materiais compósitos tem crescido significativamente devido à sua ótima razão resistência/peso, gerando a necessidade de se produzir materiais mais sustentáveis nesse campo. Este estudo teve como objetivo a fabricação e caracterização de um material compósito sustentável, utilizando fibras de coco e resina *Greenpoxy*. Foram analisadas as propriedades mecânicas sob tração e flexão, além da influência do tratamento químico superficial de mercerização nas fibras e da fração volumétrica de fibras sobre as propriedades finais do compósito. A caracterização das fibras de coco revelou que o tratamento das fibras ocasionou em uma pequena redução das propriedades mecânicas da fibra. Para a resina, os ensaios refletiram resultados satisfatórios e coerentes. Já para os compósitos, fabricados contendo 3% e 6% de fração volumétrica com fibras tratadas e não tratadas, os ensaios indicam que, para baixos níveis de fração volumétrica, o tratamento de mercerização não teve efeito significativo, mas para níveis mais altos, indicou propriedades mecânicas superiores, indicando que o tratamento gerou melhoria na adesão entre fibra e a matriz. Em conclusão, o tratamento de mercerização nas fibras de coco melhorou significativamente a aderência entre as interfaces fibra-matriz, especialmente em frações volumétricas mais altas, comprovando sua eficácia na melhoria das propriedades finais do compósito reforçado com fibras naturais.

Palavras-chave: Mercerização, Fibras de coco, *Greenpoxy*, Compósito sustentável

ABSTRACT

The use of composite materials has grown significantly in recent times due to their excellent strength-to-weight ratio, creating a need for more sustainable materials in this field. The goal of this study is to manufacture and characterize a sustainable composite material using coir fibers and Greenpoxy resin. The mechanical properties under tensile and flexural loads were analyzed, along with the influence of mercerization surface treatment on the fibers and the effect of fiber volume fraction on the final composite properties. The characterization of coir fibers revealed that fiber treatment caused a slight reduction on fibers' mechanical properties. For the resin, the tests reflected satisfactory and consistent results. For the composites, fabricated with 3% and 6% volume fractions of treated and untreated fibers, the tests indicated that at low volume fractions the mercerization treatment had no significant effect, but at higher levels, it indicated superior mechanical properties, suggesting that the treatment improved the adhesion between the fiber and the matrix. In conclusion, the mercerization treatment on coir fibers significantly improved the adhesion between the fiber-matrix interfaces, especially at higher volume fractions, proving its effectiveness in enhancing the final properties of the natural fiber-reinforced composite.

Keywords: Mercerization, Coir fibers, Greenpoxy, Sustainable composite.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	3
CAPÍTULO 2	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS.....	5
2.1.1. CLASSIFICAÇÃO.....	6
2.1.2. FASE MATRIZ.....	7
2.1.2.1. RESINA <i>GREENPOXY</i>	9
2.1.3. FASE REFORÇO EM FIBRAS.....	11
2.1.3.1. FIBRAS DE COCO.....	12
2.2. FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO	16
2.2.1. LAMINAÇÃO MANUAL EM MOLDE ABERTO.....	16
2.2.2. PRÉ-IMPREGNAÇÃO POR FUSÃO A QUENTE	17
2.2.3. PROCESSO DE LAMINAÇÃO A VÁCUO NO AUTOCLAVE.....	17
2.3. DENSIDADE DE FIBRAS NATURAIS.....	18
2.3.1. MÉTODO DA DENSIDADE LINEAR E DIÂMETRO.....	20
2.3.2. MÉTODO DE ARQUIMEDES (EMPUXO).....	20
2.3.3. MÉTODO DA COLUNA DE GRADIENTE	21
2.3.4. MÉTODO DE PICNOMETRIA COM HÉLIO	22
2.3.5. MÉTODO DE PICNOMETRIA COM LÍQUIDOS	23
2.4. ENSAIOS MECÂNICOS	24

2.4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO	24
2.4.2. ENSAIO DE FLEXÃO	26
2.5. MÉTODO DE TAGUCHI	28
CAPÍTULO 3	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1. APLICAÇÃO PRÉVIA DO MÉTODO DE TAGUCHI	31
3.2. METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE COCO .	32
3.2.1. TRATAMENTO DE MERCERIZAÇÃO	32
3.2.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DAS FIBRAS DE COCO.....	33
3.2.3. PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA.....	35
3.2.4. ENSAIO DE TRAÇÃO EM FIBRAS DE COCO.....	37
3.3. METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA RESINA <i>GREENPOXY</i> 37	
3.3.1. PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA.....	38
3.3.2. ENSAIO DE TRAÇÃO PARA RESINA <i>GREENPOXY</i>	43
3.3.3. ENSAIO DE FLEXÃO PARA RESINA <i>GREENPOXY</i>	44
3.4. METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO	45
3.4.1. COMPRIMENTO CRÍTICO DE FIBRA	46
3.4.2. FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRA	46
3.4.3. PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA.....	47
3.4.4. ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O COMPÓSITO.....	52
3.4.5. ENSAIO DE FLEXÃO PARA O COMPÓSITO	53
CAPÍTULO 4	54
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SUA ANÁLISE	54
4.1. RESULTADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE COCO	54

4.1.1. RESULTADO PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DAS FIBRAS DE COCO	54
4.1.2. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE TRAÇÃO	57
4.2. RESULTADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA RESINA <i>GREENPOXY</i> .	60
4.2.1. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE TRAÇÃO	60
4.2.2. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE FLEXÃO	62
4.3. RESULTADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO	63
4.3.1. CÁLCULO DE COMPRIMENTO CRÍTICO DE FIBRAS	64
4.3.2. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE TRAÇÃO	65
4.3.3. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE FLEXÃO	67
4.3.4. ANÁLISE DE DADOS UTILIZANDO O MÉTODO DE TAGUCHI....	69
4.3.4.1. RAZÃO S/N	69
4.3.4.2. ANOVA.....	72
CAPÍTULO 5	74
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	74
5.1. CONCLUSÃO.....	74
5.2. LINHAS DE INVESTIGAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de diferentes características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa. (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação [1].	6
Figura 2 - Esquema de classificação de alguns compósitos [1].	7
Figura 3 - Classificação de matrizes poliméricas [2].	8
Figura 4 – Rota produtiva da resina <i>GreenPoxy</i> comparada ao epóxi convencional. Adaptado de [5].	10
Figura 5 - Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra sob tração [1].	12
Figura 6 - O ciclo de vida dos compósitos à base de fibras naturais. Traduzido de Goyat <i>et al.</i> 2022 [10].	13
Figura 7 - (a) Fibras de coco maduro e (b) Composição química de fibras de coco maduro não tratado. Traduzido de Goyat <i>et al.</i> 2022 [10].	14
Figura 8 – Laminação manual de camadas em molde aberto [17].	16
Figura 9 - Processo de pré-impregnação por fusão a quente. Traduzido de Gibson 2016 [18].	17
Figura 10 - Laminação a vácuo na autoclave. Traduzido de Gibson 2016 [18].	18
Figura 11 - Densidade média e desvio padrão para diferentes métodos de medida de uma mesma amostra [20].	19
Figura 12 – Aparato para método de Arquimedes [24].	21
Figura 13 – Desenho esquemático da picnometria com hélio [26].	22
Figura 14 – Representação esquemática do dispositivo usado para a condução de ensaios de tração [1].	24
Figura 15 - Diagrama de tensão-deformação convencional para um aço dúctil [28].	25
Figura 16 – Dimensões (em mm) de provetes de ensaio de tração Tipo I segundo ASTM D638 [29].	25

Figura 17 – Exemplos de montagem de suportes segundo ASTM C1557 [30].	26
Figura 18 - Esquema de ensaio de flexão [31].	26
Figura 19 – Arranjo de ensaio de flexão de três pontos [33].	27
Figura 20 - Arranjo de ensaio de flexão de quatro pontos [33].	27
Figura 21 – (a) fibras não tratadas. (b) fibras pós-tratamento.	32
Figura 22 – Picnômetro de sólidos 50ml.	33
Figura 23 – Estufa Series 9000.	33
Figura 24 – Balança digital ADA 210/C.	34
Figura 25 – Corpos de prova de fibras de coco.	36
Figura 26 – Fixação de provetes com lixas.	36
Figura 27 - Shimadzu Autograph AGS-X 10KN.	37
Figura 28 – Molde para ensaio de tração segundo norma ASTM D638.14 [29] com dimensões em mm.	39
Figura 29 – Molde para ensaio de flexão segundo norma ISO 178 [32] com dimensões em mm.	39
Figura 30 – Corte de chapa de alumínio.	40
Figura 31 – Usinagem dos moldes.	40
Figura 32 – Estufa WTC Binder.	41
Figura 33 – Configuração final de moldes para fabricação de resina.	42
Figura 34 – Molde para ensaios de flexão de resina feito em silicone.	42
Figura 35 – Montagem do corpo de prova de resina na máquina de ensaio de tração.	43
Figura 36 – Fratura de corpo de prova sob ensaio de tração.	44
Figura 37 – Montagem do corpo de prova de resina na máquina de ensaio de flexão.	45
Figura 38 - Tensão limite de escoamento [42].	46

Figura 39 – Molde utilizado para fabricação do compósito.....	47
Figura 40 – Balança de precisão HCB602H da Adam Highland.....	48
Figura 41 – Fabricação do compósito.	48
Figura 42 – Montagem do molde de compósito sob pressão no macaco hidráulico..	49
Figura 43 – Estado final de placas de compósito fabricadas.....	49
Figura 44 – Fresadora CNC <i>STEEL PRO 2515</i> da <i>OUPLAN</i>	50
Figura 45 – Corpos de prova de tração e flexão, respectivamente, em processo de usinagem.....	51
Figura 46 – Corpos de prova do compósito usinados contendo respectivamente 6% e 3% de fração volumétrica de fibras.	51
Figura 47 – Montagem do corpo de prova de compósito na máquina de ensaio de tração.	52
Figura 48 – Montagem do corpo de prova de compósito na máquina de ensaio de flexão.	53
Figura 49 – Gráfico tensão x deformação de fibras tratadas.	58
Figura 50 – Gráfico tensão x deformação de fibras não tratadas.	58
Figura 51 – Gráfico tensão x deformação para tração da resina <i>Greenpoxxy</i>	61
Figura 52 – Gráfico tensão x deformação para flexão da resina <i>Greenpoxxy</i>	62
Figura 53 – Padrão de nomeação de corpos de prova.	64
Figura 54 – Gráfico tensão x deformação para tração do compósito.....	65
Figura 55 – Gráfico tensão x deformação para flexão do compósito.....	67
Figura 56 – Médias de resistência a tração e flexão com respectivo desvio padrão. .	70
Figura 57 – Média de S/N para ensaio de tração.....	71
Figura 58 – Média de S/N para ensaio de flexão.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de materiais poliméricos termoplásticos e termorrígidos [4].	9
Tabela 2 – Propriedades mecânicas da resina <i>GreenPoxy</i> . Traduzido e adaptado de [9].	11
Tabela 3 - Algumas propriedades mecânicas importantes de fibras naturais, assim como de fibras sintéticas. Adaptado de Dugvekar <i>et al.</i> 2022 [11].	14
Tabela 4 – Seleção do arranjo ortogonal de Taguchi. Adaptado de R. de Lacerda 2021 [37].	29
Tabela 5 – Variáveis de controle do compósito.	31
Tabela 6 – Arranjo ortogonal de Taguchi L4.	31
Tabela 7 – Densidade da água destilada de acordo com a temperatura [20].	35
Tabela 8 – Propriedades SR <i>GreenPoxy</i> 56. Adaptado de [9].	38
Tabela 9 – Propriedades SD <i>Surf Clear</i> . Adaptado de [9].	38
Tabela 10 – Resultado obtido para o fator de correção e teor de umidade.	54
Tabela 11 – Massa dos picnômetros utilizados, vazio e cheio com água destilada. ..	55
Tabela 12 – Densidade das fibras não tratadas.	55
Tabela 13 – Densidade das fibras tratadas.	56
Tabela 14 – Valores de densidade de fibras de coco obtidas experimentalmente.	57
Tabela 15 – Diâmetro de corpos de prova de fibras de coco para ensaio de tração. ...	57
Tabela 16 – Resistência à tração e deformação máxima obtidas no ensaio de tração para fibras de coco tratadas e não tratadas.	59
Tabela 17 – Medidas de corpos de prova de resina para tração.	60
Tabela 18 – Resistência à tração e deformação máxima obtidas no ensaio de tração da resina <i>Greenpoxy</i>	61
Tabela 19 – Medidas de corpos de prova de resina para flexão.	62

Tabela 20 - Resistência à flexão e deformação máxima obtidas no ensaio de flexão da resina <i>Greenpoxy</i>	63
Tabela 21 – Propriedades obtidas experimentalmente utilizadas para calcular o comprimento crítico.....	64
Tabela 22 – Resistência à tração e deformação máxima obtidas no ensaio de tração dos compósitos.....	66
Tabela 23 – Resistência à tração e deformação máxima obtidas no ensaio de flexão dos compósitos.....	68
Tabela 24 – Valores de S/N para ensaio de tração.....	69
Tabela 25 – Valores de S/N para ensaio de flexão.....	69
Tabela 26 – ANOVA para ensaio de tração.....	72
Tabela 27 – ANOVA para ensaio de flexão.....	73

LISTA DE ABREVIACOES

ANOVA	Análise de Variância
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
CNC	Controle Numérico Computadorizado (<i>Computer Numerical Control</i>)
DOE	Experimento Fatorial (<i>Design of Experiments</i>)
ESTiG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FABLAB	Laboratório de Fabricao
GL	Graus de Liberdade
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
ISO	Organizao Internacional de Normalizao (<i>International Organization for Standardization</i>)
NaOH	Hidróxido de Sódio
NT	Amostras com Fibras Não Tratadas
pH	Potencial Hidrogeniônico (medida da acidez ou alcalinidade de uma soluço)
QM	Média dos Quadrados
S/N	Razão Sinal-Ruído (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
SQ	Soma dos Quadrados
T	Amostras com Fibras Tratadas

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os compósitos, materiais constituídos por duas ou mais fases distintas, têm desempenhado um papel cada vez mais significativo na indústria devido à sua capacidade de combinar propriedades complementares de diferentes materiais. Os compósitos apresentam diversas vantagens para diferentes aplicações, entre elas, a principal é a relação de baixo peso e alta resistência, juntamente com diversas outras propriedades específicas de cada material constituído.

“Materiais com propriedades específicas e não usuais são necessários para uma gama de aplicações de alta tecnologia, tais como, as encontradas nas indústrias aeroespacial, submarina, de bioengenharia e de transporte. Por exemplo, os engenheiros aeronáuticos estão buscando cada vez mais materiais estruturais que apresentem baixas massas específicas, sejam resistentes, rígidos e tenham resistência à abrasão e ao impacto, e que não sejam corroídos com facilidade” [1].

Em um contexto global de crescente preocupação com a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais, há uma pressão crescente sobre a indústria para adotar práticas mais sustentáveis. Nesse sentido, ganha destaque a utilização de materiais sustentáveis na produção de compósitos. A resina verde, como a *GreenPoxy*, surge como uma alternativa promissora às resinas epóxi convencionais, derivadas de recursos não renováveis. A *GreenPoxy* oferece a vantagem de utilizar matérias-primas renováveis e processos de fabricação de baixo impacto ambiental, contribuindo para a redução da pegada de carbono e a preservação dos recursos naturais.

Em paralelo, as fibras de coco emergem como um reforço sustentável para compósitos. Além de serem derivadas de uma fonte renovável e abundante, as fibras de coco possuem características intrínsecas de resistência e rigidez que as tornam adequadas para aplicações de reforço em compósitos. Embora cada aplicação exija uma avaliação cuidadosa das propriedades específicas do compósito em questão, as fibras de coco têm sido reconhecidas como um reforço

eficaz em matrizes poliméricas, contribuindo para a obtenção de compósitos sustentáveis e de alto desempenho.

Além das vantagens ambientais, os compósitos fabricados com resina verde e fibras de coco também podem oferecer benefícios econômicos, como custos de produção potencialmente mais baixos e maior acessibilidade de matérias-primas. Embora a comparação direta das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo com os compósitos convencionais ainda necessite de análises específicas, acredita-se que suas características únicas e sua pegada ambiental reduzida possam viabilizar sua aplicação em uma variedade de setores industriais. Seja na construção civil, na fabricação de peças automotivas ou em outras áreas, o potencial de substituição gradual dos compósitos convencionais por alternativas mais sustentáveis representa um passo importante em direção a uma indústria mais ecológica e socialmente responsável.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal a fabricação e caracterização de um compósito formado por matriz de resina *GreenPoxy* e reforçado com fibras de coco. Para alcançar esse objetivo central, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

Caracterização da Resina *GreenPoxy*:

Realizar ensaios de tração e flexão para caracterizar as propriedades da resina *GreenPoxy*. Isso incluirá a determinação da resistência à tração e deformação máxima.

Caracterização das Fibras de Coco:

Realizar ensaios de tração para caracterizar as fibras de coco *in natura* e fibras de coco mercerizadas. Parte das fibras de coco foram submetidas a tratamentos superficiais de mercerização com NaOH para avaliar a sua influência na adesão entre fibra e matriz e sua relação com as propriedades mecânicas da fibra e do compósito.

Fabricação do Compósito:

Desenvolver uma metodologia para a fabricação do compósito, considerando diferentes frações volumétricas de fibras de coco e a influência do tratamento químico das fibras. Serão exploradas técnicas de fabricação, como moldagem por compressão, para obter amostras de compósitos com fração volumétrica e distribuição controladas.

Análise das Propriedades Mecânicas do Compósito:

Realizar ensaios mecânicos, como ensaio de tração e flexão, para avaliar as propriedades mecânicas do compósito e as relacionar com adesão entre as fases matriz e reforço. Será investigada a influência das diferentes frações volumétricas de fibras de coco e do tratamento químico das fibras nas propriedades mecânicas do compósito.

Ao alcançar esses objetivos, espera-se contribuir para o conhecimento científico na área de compósitos sustentáveis, fornecendo informações relevantes sobre as propriedades e aplicações dos compósitos fabricados com resina *GreenPoxy* e fibras de coco. Essa pesquisa poderá abrir caminho para futuros desenvolvimentos na utilização de materiais renováveis e *eco-friendly* na indústria de compósitos, visando a redução do impacto ambiental e a promoção da sustentabilidade.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho está dividida em seis capítulos, organizados da seguinte maneira:

No primeiro capítulo, são apresentados na introdução a importância do estudo em seu contexto geral na atualidade, os objetivos da pesquisa e uma visão geral da estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, é feita uma contextualização do estudo dentro do panorama de pesquisas e bibliografias existentes, buscando embasar teoricamente o trabalho a partir das contribuições da comunidade científica.

O terceiro capítulo detalha os procedimentos experimentais adotados, o uso de materiais e sua disponibilidade, que englobam desde o tratamento e caracterização das fibras, preparação de moldes e corpos de prova para resina até a fabricação e caracterização do compósito.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados experimentais após o tratamento das fibras, fabricação e ensaios mecânicos dos corpos de prova de fibras, resina e dos compósitos de *GreenPoxy* reforçados com fibras de coco, incluindo valores das principais propriedades mecânicas obtidas em cada ensaio. Além disso, os dados são analisados através do método de Taguchi usando a razão sinal-ruído e ANOVA e, posteriormente, discutidos e comparados com a literatura existente.

O quinto capítulo abrange as conclusões derivadas da interpretação dos dados obtidos ao longo do estudo, bem como sugestões para pesquisas futuras sobre o tema.

Por fim, são fornecidas as referências bibliográficas que embasaram e enriqueceram o desenvolvimento da pesquisa.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura e estudos existentes até à publicação deste material, que é relevante para o entendimento e desenvolvimento deste trabalho.

Portanto, é abordado no tema dos materiais compósitos as suas classificações, fases constituintes e principais características dos tipos de compósitos que podem ser formados por diversos materiais. Em seguida, é ressaltado alguns dos principais métodos de fabricação de compósitos aplicáveis ao tipo de material estudado. Também são abordados os métodos experimentais que são utilizados na atualidade para medir a densidade de materiais, fator que é considerado para medir a densidade das fibras e calcular a fração volumétrica dela no compósito. Não obstante, são abordados, também, as principais características e parâmetros dos ensaios mecânicos realizados e quais propriedades mecânicas são extraídas de cada um. Por fim, é discutido o método de Taguchi e análise ANOVA utilizado no trabalho para organizar os corpos de prova fabricados levando em consideração as variáveis de controle escolhidas e, posteriormente, realizar o tratamento e análise dos resultados obtidos.

2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos em sua definição são caracterizados pela união de fases distintas que apresentem uma proporção significativa das propriedades dos materiais constituintes. O desenvolvimento de tais materiais busca agregar as melhores combinações de propriedades para diferentes aplicações através desse princípio da ação combinada. Desta forma, pode-se formar materiais que oferecem melhores proporções de resistência mecânica, leveza, resistência às condições ambientais, altas variações de temperatura e outros [1].

Os materiais compósitos são comumente formados por duas fases: a fase matriz que agrega e envolve a outra fase, que é a fase dispersa ou reforço. O tipo de fibra, tipo de matriz, grau de aderência, processo de fabricação do compósito e a quantidade, comprimento e

orientação das fibras são os fatores que influenciam nas propriedades finais dos compósitos. Alguns desses fatores são exemplificados na Figura 1.

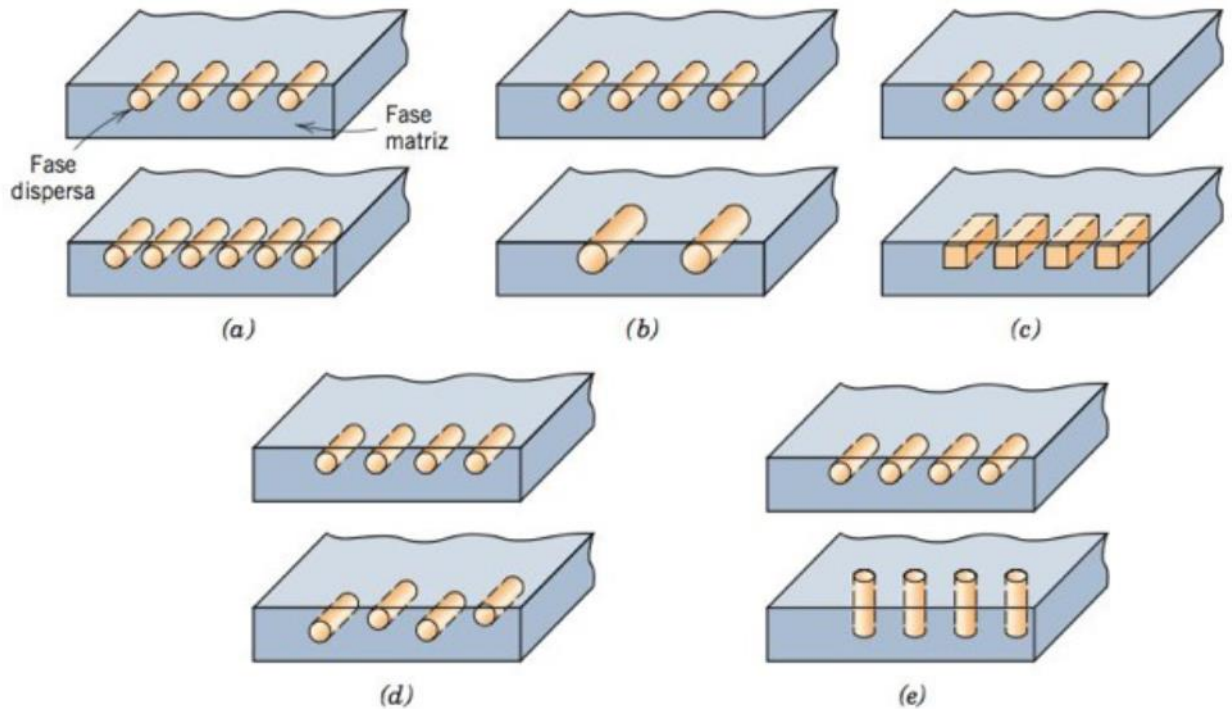


Figura 1 - Representação de diferentes características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa. (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação [1].

2.1.1. CLASSIFICAÇÃO

Na Figura 2 são apresentadas as classificações deste tipo de material. No entanto, no âmbito do projeto, será analisado o compósito reforçado por fibras, que se destaca pela capacidade de produzir materiais com resistência e rigidez elevadas em relação ao seu peso.



Figura 2 - Esquema de classificação de alguns compósitos [1].

2.1.2. FASE MATRIZ

O propósito da fase matriz do compósito é transferir e distribuir o carregamento para a fase de reforço, que é a fibra. A matriz tem a responsabilidade de suportar apenas uma fração mínima do carregamento externo. Todavia, é importante que a matriz seja dúctil.

Outra função desta fase é funcionar como uma barreira contra trincas. A matriz deve proteger as fibras contra danos superficiais decorrentes de abrasão ou reações químicas com o ambiente, evitando falhas sob níveis baixos de tensão de tração causado por propagação de trincas [1].

A matriz polimérica é, frequentemente, empregada em conjunto com fibras de reforço, constituindo um dos compósitos mais utilizados em diversas aplicações, devido às suas propriedades à temperatura ambiente, facilidade de produção e custo acessível. Os tipos de matrizes poliméricas são mostrados na Figura 3.

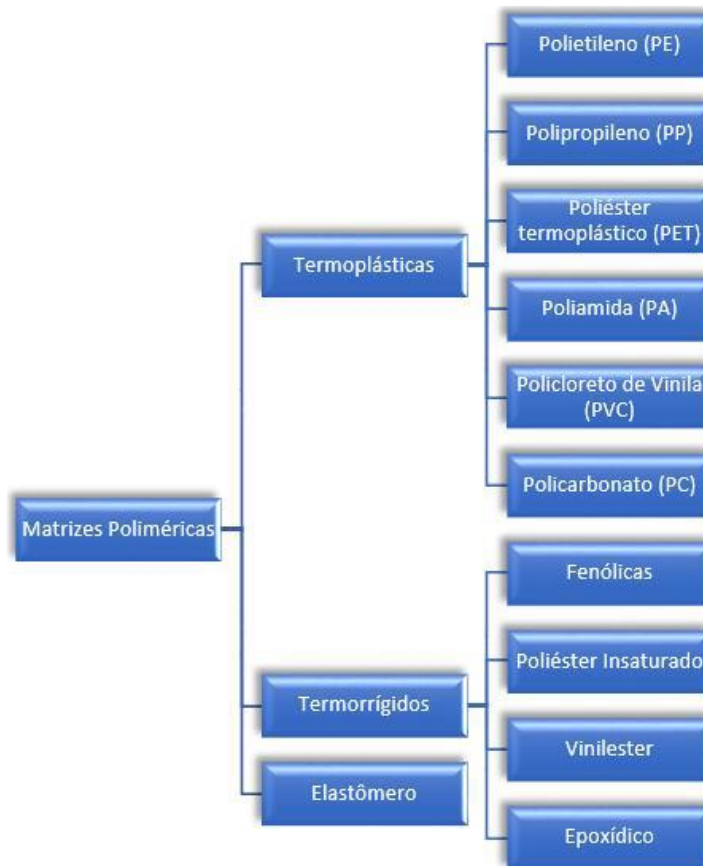


Figura 3 - Classificação de matrizes poliméricas [2].

Entre as matrizes poliméricas, tem-se os elastômeros que são polímeros altamente elásticos e flexíveis, capazes de retornar à forma original após aplicação de cargas de tração. Exemplos incluem borracha natural e silicone [1], [3].

Não obstante, os polímeros mais utilizados como fase matriz em compósitos são os termoplásticos e termorrígidos. As termorrígidas apresentam alta resistência mecânica, resistência à fluência, e resistência térmica e dimensional [2], [3], [4]. Algumas características desses dois tipos de matrizes poliméricas podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características de materiais poliméricos termoplásticos e termorrígidos [4].

Termoplásticos	Termorrígidos
Reciclável mecanicamente	Não reciclável mecanicamente
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Alta viscosidade quando Fundido	Baixa Viscosidade durante o Processamento
Baixa resistência à Fluência	Alta resistência à fluência
Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional

2.1.2.1. RESINA *GREENPOXY*

A resina *GreenPox*y é uma formulação de resina epóxi desenvolvida pela empresa francesa Sicomin, projetada para oferecer uma alternativa sustentável às resinas epóxi convencionais. Esta resina é formulada utilizando matérias-primas renováveis e processos de fabricação de baixo impacto ambiental, visando reduzir a pegada de carbono e promover a sustentabilidade na indústria de compósitos.

A resina *GreenPox*y 56 + *Hardener SD Surf Clear* é um epóxi laminado transparente e à prova d'água, possui como características:

- Propriedades mecânicas elevadas;
- Aspecto transparente;
- Produzido com até 41% de teor de carbono de origem vegetal.

A importância ambiental da resina *GreenPox*y reside em sua capacidade de substituir as resinas epóxi convencionais derivadas de recursos não renováveis, como o petróleo, por fontes renováveis, como os óleos vegetais. Isso contribui para a redução da dependência de recursos finitos e não sustentáveis, além de minimizar a emissão de gases de efeito estufa associados à produção de resinas à base de petróleo. Além disso, os processos de fabricação da *GreenPox*y, geralmente, consomem menos energia e geram menos resíduos em comparação com resinas

epóxi tradicionais e, conseqüentemente, geram uma menor pegada ambiental. A esquematização da rota de produção da resina *GreenPoxy* comparada com a resina epóxi convencional pode ser observada na Figura 4.

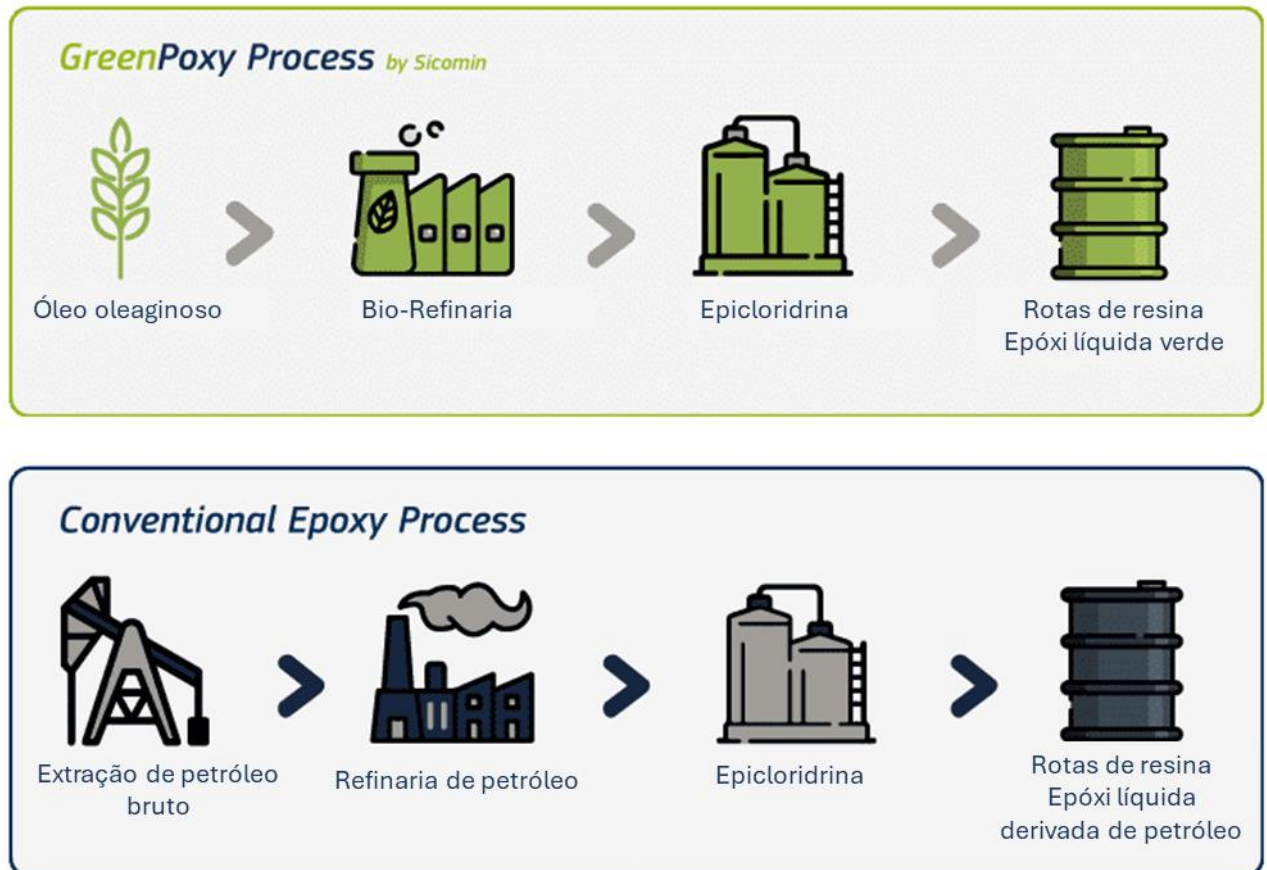


Figura 4 – Rota produtiva da resina *GreenPoxy* comparada ao epóxi convencional. Adaptado de [5].

Em termos de desempenho, estudos indicam que resinas verdes podem oferecer propriedades mecânicas comparáveis às de polímeros sintéticos convencionais em algumas aplicações [6], [7]. Embora cada formulação de resina apresente características específicas, as resinas verdes têm sido reconhecidas pela sua resistência, durabilidade e adesão a uma variedade de materiais de reforço, como fibras de vidro, fibras de carbono e fibras naturais [8]. Algumas propriedades mecânicas da resina *GreenPoxy* podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da resina *GreenPoxy*. Traduzido e adaptado de [9].

Ciclo de cura		SR GreenPoxy 56 / SD Surf Clear		
		7 dias à 23°C	24h à 23°C + 24h à 40°C	24h à 23°C + 24h à 40°C + 16h à 60°C
Tração				
Módulo de Elasticidade	N/mm ²	3200	3300	3300
Resistência máxima	N/mm ²	50	49	51
Resistência na ruptura	N/mm ²	49	48	51
Alongamento à tração máxima	%	1.6	1.6	1.7
Alongamento na ruptura	%	1.6	1.6	1.7
Flexão				
Módulo de Elasticidade	N/mm ²	3300	3400	3300
Resistência máxima	N/mm ²	114	114	123
Alongamento à tração máxima	%	4.5	4.2	5.5
Alongamento na ruptura	%	4.7	5.5	6.4

Em resumo, a resina *GreenPoxy* representa um avanço significativo na busca por materiais mais sustentáveis na indústria de compósitos. Sua capacidade de combinar desempenho mecânico, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica a torna uma escolha atraente para uma variedade de aplicações, desde componentes estruturais, até peças de engenharia de precisão. À medida que a conscientização ambiental cresce e as regulamentações se tornam mais rigorosas, espera-se que a demanda por resinas sustentáveis, como a *GreenPoxy*, continue a aumentar, impulsionando ainda mais a inovação e o desenvolvimento nessa área.

2.1.3. FASE REFORÇO EM FIBRAS

Esta fase é responsável por aferir resistência mecânica ao compósito, principalmente, sob tensões de tração. Reforços de fibra são muito utilizados por apresentarem elevados parâmetros de resistência e módulo de elasticidade e empregam materiais de baixo peso específico.

Além das propriedades da fibra, as propriedades finais desse tipo de compósito dependem da orientação, dimensões e distribuição dessa fibra. Existe um fator que é o comprimento

crítico de fibra l_c , responsável por aferir de forma eficiente resistência e rigidez do material. Este fator depende do diâmetro d da fibra, do limite de resistência à tração da fibra σ_f^* e da resistência da ligação fibra-matriz (ou da tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz, o que for menor) τ_c [1].

$$l_c = \frac{\sigma_f^* \cdot d}{2 \cdot \tau_c} \quad (1)$$

Além disso, a ligação matriz-fibra é responsável pela transmissão de carga e quando aplicada uma tensão de tração, essa ligação cessa nas extremidades da fibra, o que produz um padrão de deformação na matriz exemplificado na Figura 5 [1].

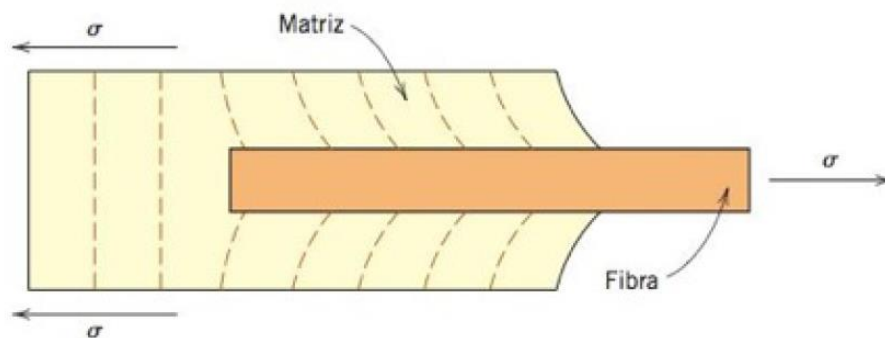


Figura 5 - Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra sob tração [1].

2.1.3.1. FIBRAS DE COCO

Atualmente, as fibras naturais possuem uma significativa relevância na indústria de compósitos devido às suas propriedades e ao seu potencial, como alternativa sustentável às fibras sintéticas convencionais. Enquanto as fibras sintéticas, como as de vidro e carbono, têm sido amplamente utilizadas devido à sua alta resistência e rigidez, as fibras naturais oferecem vantagens em termos de disponibilidade, biodegradabilidade e menor impacto ambiental.

Na Figura 6 é possível observar o ciclo de vida de compósitos reforçados por fibras naturais, onde é demonstrado a sustentabilidade do material, pois pode ser reciclado ou formar resíduos biológicos, que, posteriormente, se tornam novamente matéria-prima.

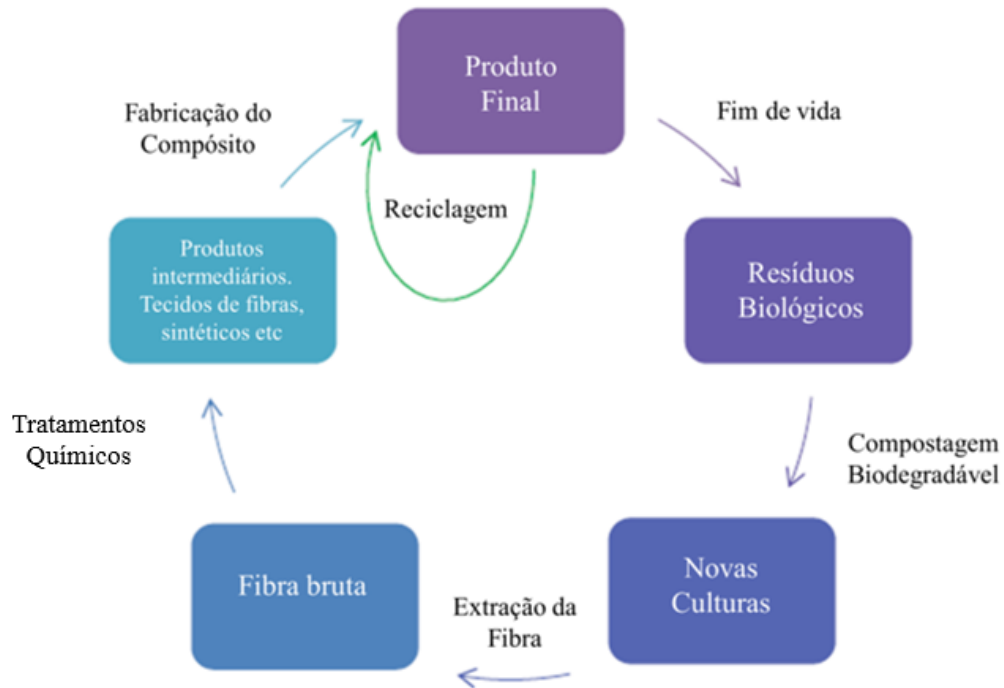


Figura 6 - O ciclo de vida dos compósitos à base de fibras naturais. Traduzido de Goyat *et al.* 2022 [10].

O estudo de Goyat *et al.* 2022 [10] apresenta uma revisão abrangente das propriedades mecânicas dos compósitos à base de fibras de coco, destacando seu desempenho em comparação com os compósitos convencionais. Os autores ressaltam que, embora as fibras naturais possam apresentar uma resistência mecânica inferior às fibras sintéticas, elas representam uma alternativa para diversas aplicações industriais de baixa a média resistência mecânica e uma série de benefícios ambientais, como a redução da pegada de carbono e a utilização de matérias-primas renováveis.

Na Tabela 3 pode-se observar as propriedades de algumas das fibras naturais em comparação com algumas fibras sintéticas.

Tabela 3 - Algumas propriedades mecânicas importantes de fibras naturais, assim como de fibras sintéticas. Adaptado de Dugvekar *et al.* 2022 [11].

Fibra	Massa Específica (g/cm ³)	Alongamento na Ruptura (%)	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Resistência a Tração (MPa)
Linho	1.5	2.7–3.2	27.6	345–1100
Kenaf	–	1.6	53	930
Ramie	1.5	1.2–3.8	61.4–128.0	400–938
Cânhamo	–	1.6	30–60	690
Fibra de coco	1.1	15.0–40	4.0–6.0	131–175
Aramida	1.4	3.3–3.7	63.0–67.0	3000–3150
Vidro E	2.5	2.5	70	2000–3500
Carbono	1.7	1.4–1.8	230–240	4000

No contexto específico das fibras de coco, o estudo de Corradini *et al.* 2009 [12] examinou a composição química e as propriedades mecânicas de diversas fibras de coco verde. Os resultados destacaram a presença predominante de celulose, hemicelulose e lignina nas fibras de coco, bem como, variações significativas na composição entre as fibras. Esses achados indicam a diversidade das fibras de coco e a importância de considerar a variabilidade na seleção e aplicação das fibras. Na Figura 7 pode-se observar a composição química típica de fibras de coco maduro não tratadas.

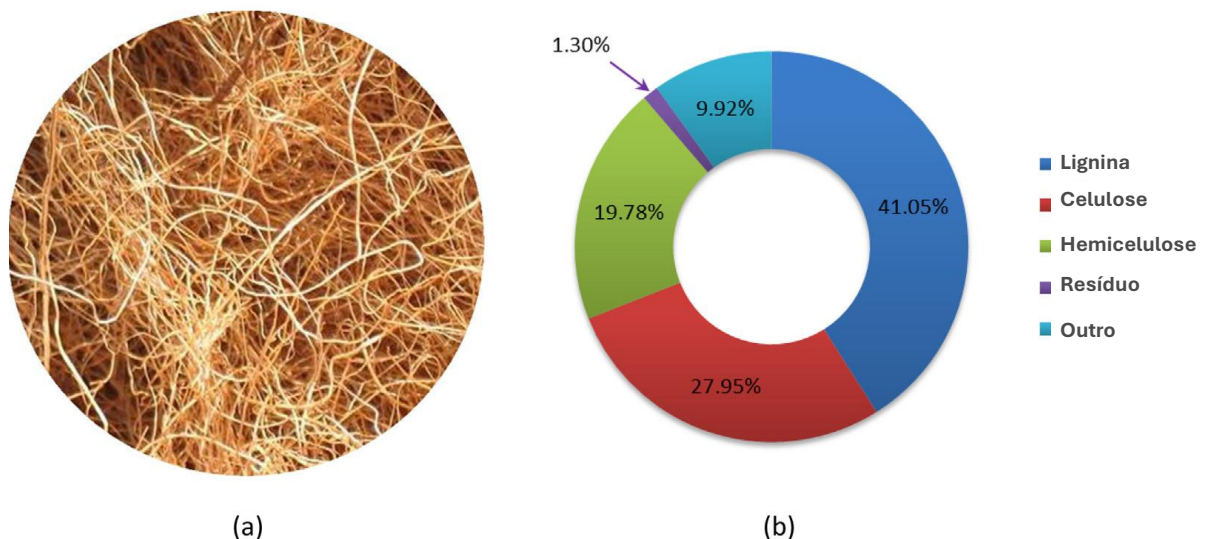


Figura 7 - (a) Fibras de coco maduro e (b) Composição química de fibras de coco maduro não tratado.

Traduzido de Goyat *et al.* 2022 [10].

Além disso, o estudo de Silva *et al.* 2000 [13] proporcionou uma análise detalhada das propriedades mecânicas e térmicas das fibras de coco brasileiras. Os resultados revelaram que as fibras de coco exibem uma resistência à tração e rigidez consideráveis, além de uma boa resistência ao calor. Essas propriedades tornam as fibras de coco adequadas para uma variedade de aplicações.

Além das características naturais das fibras de coco, é importante comentar sobre a influência e a importância do tratamento químico das fibras para melhorar a adesão com a matriz polimérica em compósitos. As fibras naturais, por serem caracteristicamente hidrofílicas e a resina hidrofóbica, a adesão entre reforço e matriz acaba sendo enfraquecida comprometendo as propriedades do material. Portanto, o tratamento químico das fibras representa uma etapa importante para a fabricação de compósitos poliméricos reforçado com fibras naturais, pois promove a modificação da superfície das fibras, aumentando a sua adesão com a matriz polimérica e, por consequência, melhora as propriedades finais do compósito resultante.

Estudos apontam que as fibras de coco que passam pelo tratamento químico superficial de mercerização em solução de NaOH demonstram uma melhoria significativa na adesão com a matriz polimérica. O tratamento químico das fibras, geralmente, envolve a remoção de impurezas, ceras e lignina da superfície das fibras, seguida pela introdução de grupos funcionais que promovem a adesão com a matriz polimérica [10], [11], [13], [14], [15].

Os procedimentos de tratamento alcalino removem pectina, ceras e outras impurezas, criando uma superfície de fibra mais áspera para uma melhor adesão entre a fibra e a matriz. No entanto, como a lignina também é solúvel em solução alcalina, o efeito da mercerização na composição química (especificamente na lignina) precisa ser abordado. Além disso, como a lignina proporciona rigidez à fibra natural, é importante destacar o efeito da remoção de lignina nas propriedades mecânicas das fibras naturais [16].

Portanto, as fibras de coco surgem como uma alternativa, em potencial, para desenvolver materiais compósitos sustentáveis. Apesar de possuírem algumas limitações em relação às fibras sintéticas em termos de resistência mecânica, as fibras de coco trazem uma série de benefícios ambientais e podem ser otimizadas por meio de técnicas de processamento e tratamentos adequados.

2.2. FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO

A fabricação de compósitos reforçados com fibras descontínuas e aleatórias é um processo complexo que envolve uma variedade de técnicas e processos. É importante avaliar o tipo de material pretendido, fatores como a quantidade, custo, disponibilidade de material, tempo, temperatura de cura e as características dos materiais envolvidos para realizar a escolha adequada do método de fabricação.

Abaixo, são discutidos alguns dos principais métodos de fabricação, destacando suas características e influências no compósito.

2.2.1. LAMINAÇÃO MANUAL EM MOLDE ABERTO

Neste método, as camadas de fibras e resina são manualmente sobrepostas em um molde aberto e compactadas, um rolo é comumente utilizado para pressionar e impregnar a resina nas fibras. Este é um método de baixo custo e é utilizado para produzir protótipos e peças de pequenas produções. A habilidade do operador do processo e uniformidade da laminação afetam diretamente na qualidade do compósito e suas propriedades.

Na Figura 8 pode-se observar um esquema de fabricação por laminação manual.

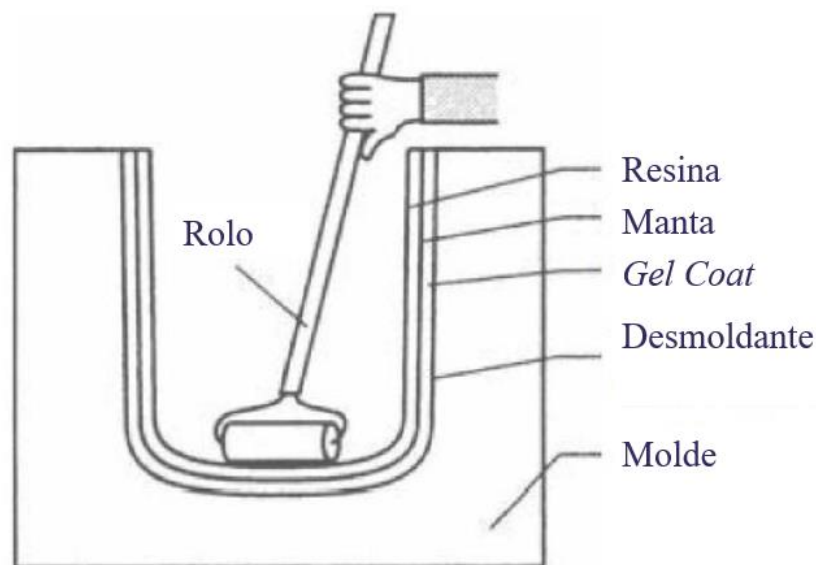


Figura 8 – Laminação manual de camadas em molde aberto [17].

2.2.2. PRÉ-IMPREGNAÇÃO POR FUSÃO A QUENTE

Neste método, as fibras são impregnadas com resina em um processo de fusão a quente, resultando em pré-impregnados que são posteriormente moldados.

Essa forma de fabricação elimina boa parte da mão de obra necessária na laminação manual, uma vez que fibras e matriz estão preparadas nas proporções exatas. Durante a preparação do componente o operador precisa apenas posicionar as fitas pré-impregnadas de acordo com as especificações do projeto e curar em alta pressão e temperatura [17].

Dessa forma, este método de fabricação apresenta um bom controle na precisão da distribuição da resina e impregnação das fibras, alta qualidade superficial e conseqüentemente propriedades mecânicas e estéticas superiores. Contudo, este processo exige uso de equipamentos especializados e precisão no controle de temperatura e pressão.

Na Figura 9 é possível visualizar o processo de pré-impregnação a quente.

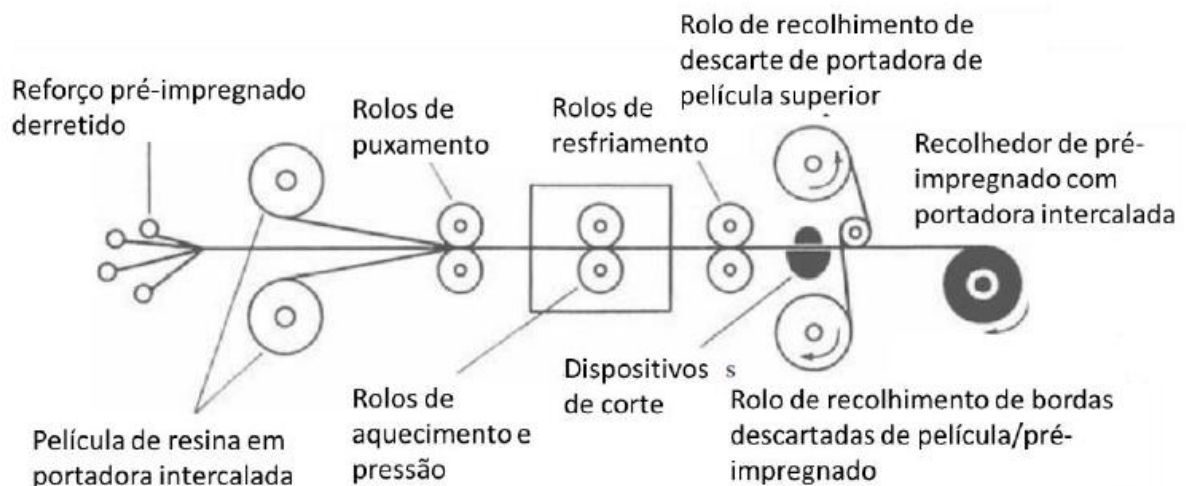


Figura 9 - Processo de pré-impregnação por fusão a quente. Traduzido de Gibson 2016 [18].

2.2.3. PROCESSO DE LAMINAÇÃO A VÁCUO NO AUTOCLAVE

Neste método, as camadas de fibras e resina são sobrepostas em um molde fechado e curadas sob pressão e temperatura controladas em uma autoclave, o molde é colocado sob vácuo para remover bolhas de ar e garantir uma impregnação uniforme.

Este processo exemplificado pela Figura 10 gera materiais com alta qualidade superficial e reduz a quantidade de bolhas inerentes à fabricação da resina e impregnação nas fibras, conseqüentemente, gerando melhores resultados nos ensaios mecânicos do compósito [18].

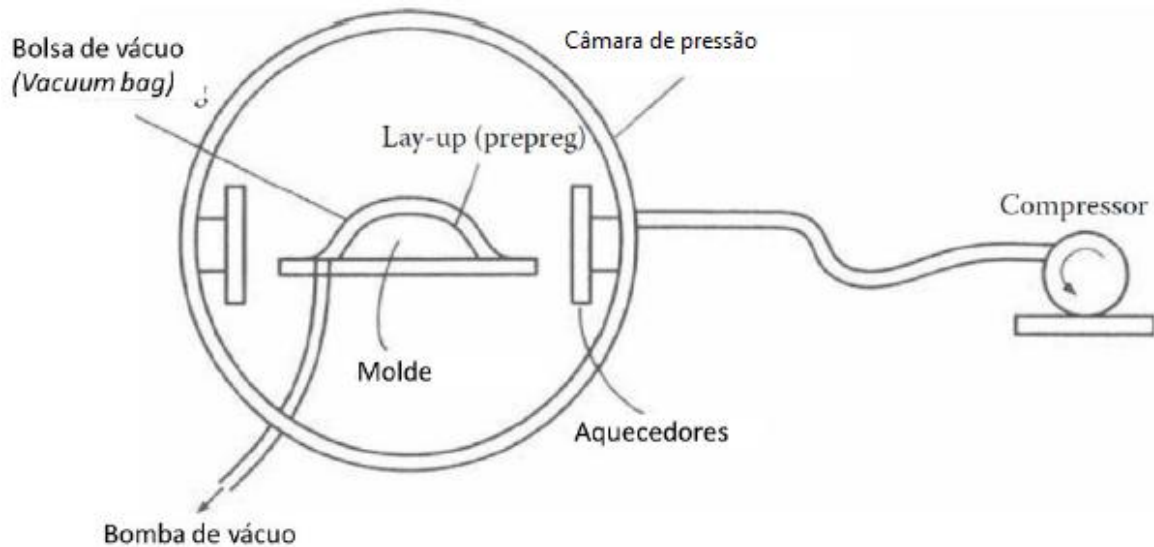


Figura 10 - Laminação a vácuo na autoclave. Traduzido de Gibson 2016 [18].

2.3. DENSIDADE DE FIBRAS NATURAIS

A determinação da densidade das fibras utilizadas no compósito é de fundamental importância para se determinar a fração volumétrica de fibra no compósito. Este dado por sua vez é um dos parâmetros que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do material. A expressão utilizada para determinação da fração volumétrica de fibras no compósito está na Equação 2, segundo norma ASTM D3171 [19].

$$V_f = \frac{W_f/\rho_f}{W_c/\rho_c} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

V_f – fração volumétrica de fibra;

W_f – massa de fibra;

W_c – massa do compósito;

ρ_f - densidade da fibra;

ρ_c – densidade do compósito.

A seleção do método para se determinar a densidade de um material é de fundamental importância e depende de fatores como as propriedades do material, disponibilidade de equipamentos e recursos consumíveis, custo, tempo, qualidade e fiabilidade requerida, entre outros.

Abaixo, são discutidos alguns dos principais métodos para determinar a densidade de um material, destacando suas características, restrições e fiabilidade. Na Figura 11 pode-se observar que, entre os métodos mais utilizados, o que apresenta maior qualidade e precisão é o de picnometria com hélio.

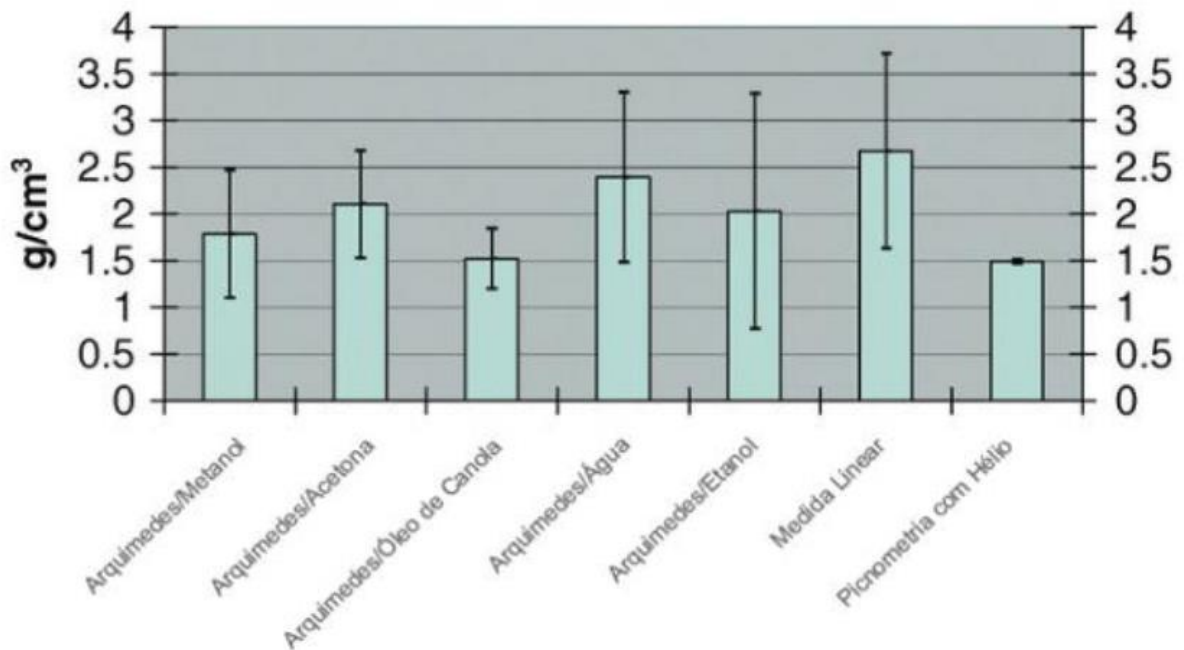


Figura 11 - Densidade média e desvio padrão para diferentes métodos de medição de uma mesma amostra [20].

Além disso, é importante ressaltar que os métodos de Picnometria e Arquimedes, com água, são métodos mais simples e de recursos mais facilmente encontrados para realização prática do procedimento, no entanto, o método de Arquimedes requer a montagem de um aparato específico para realização do procedimento para o material requerido e o método de picnometria com água tem a limitação de que a amostra a ser medida tenha densidade superior à do líquido em questão [20], [21].

2.3.1. MÉTODO DA DENSIDADE LINEAR E DIÂMETRO

Este método consiste em realizar medidas do diâmetro e do comprimento de amostras de fibras para calcular seu volume, então com base na massa dessa amostra é possível calcular sua densidade pela Equação 3, segundo as normas ASTM D1577 [22] e ASTM D2130 [23].

$$\rho_f = \frac{M}{\frac{\pi d^2}{4} l} \quad (3)$$

Onde:

M – massa da amostra de fibra;

d – diâmetro médio;

l – comprimento da fibra.

2.3.2. MÉTODO DE ARQUIMEDES (EMPUXO)

O método de Arquimedes usa o princípio da força de empuxo e equilíbrio estático para determinar, experimentalmente, a densidade de um corpo. O corpo a ser medido é pesado no ar e depois pesado em um líquido de densidade conhecida e que tenha densidade menor, a diferença de peso entre as duas pesagens é a força de empuxo. Então essa força é convertida em volume dividindo a mesma pela densidade do líquido. A massa do corpo no ar dividido pelo volume do corpo é igual à densidade do corpo [21]. O procedimento é descrito na norma ASTM D3800 [24] e um exemplo de montagem do equipamento usado para fazer o procedimento é demonstrado na Figura 12.

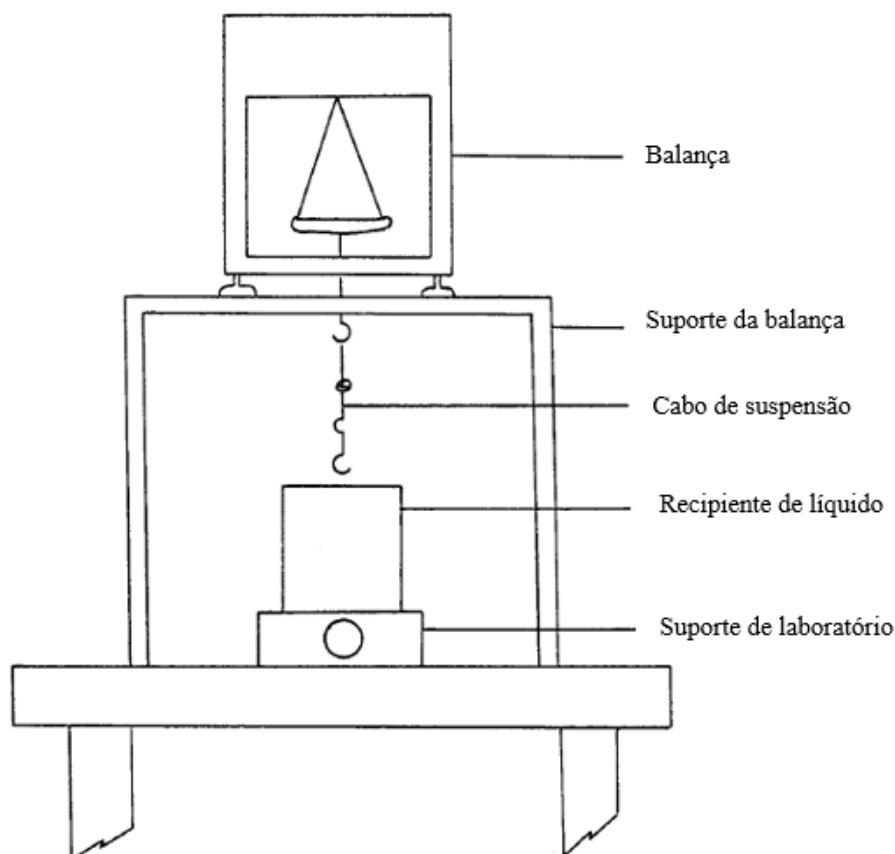


Figura 12 – Aparato para método de Arquimedes [24].

2.3.3. MÉTODO DA COLUNA DE GRADIENTE

O método de Coluna de Gradiente é, geralmente, utilizado adotando uma técnica descrita na norma ASTM D1505 [25]. Neste método, a medição da densidade é realizada utilizando uma coluna de líquidos com diferentes densidades. Um gradiente de densidade é estabelecido em uma faixa de densidade pré-selecionada por escolha de líquidos miscíveis e apropriados de diferentes densidades, misturados em proporções continuamente variáveis ao longo do comprimento de uma coluna [20].

Na execução do teste, a amostra, que consiste em um conjunto de fibras, é submersa na coluna de líquidos. A densidade da amostra deve ser, aproximadamente, igual à densidade do líquido na posição onde ela se estabiliza. O método depende da flutuação da amostra na coluna até que sua densidade seja equivalente à densidade do líquido circundante.

É importante destacar que este método não possibilita a medição direta do peso ou volume da amostra de fibra. Neste método, a densidade é determinada indiretamente com base na posição em que a amostra se estabiliza na coluna. Pode-se afirmar que a precisão deste método não é totalmente confiável, uma vez que depende da escolha do líquido e da calibração dos instrumentos, como o vidro flutuador calibrado mais próximo [21].

Além disso, este método apresenta dificuldade para remoção de bolhas da amostra e é suscetível a contaminação da coluna, a implementação deste método também requer equipamentos específicos desenvolvidos especialmente para o tipo de amostras a serem testadas. Devido a essas considerações, o método de Coluna de Gradiente deve ser escolhido em casos específicos onde esses apresentem alguma vantagem em relação aos demais, em termos de qualidade, disponibilidade e custo.

2.3.4. MÉTODO DE PICNOMETRIA COM HÉLIO

O método de Picnometria com hélio é uma técnica utilizada para determinar a densidade de materiais, incluindo fibras, utilizando gás hélio como meio de medição. Neste método, as amostras do material a serem testadas são inseridas em um recipiente fechado conhecido como picnômetro de hélio. Um desenho esquemático deste método é representado na Figura 13.

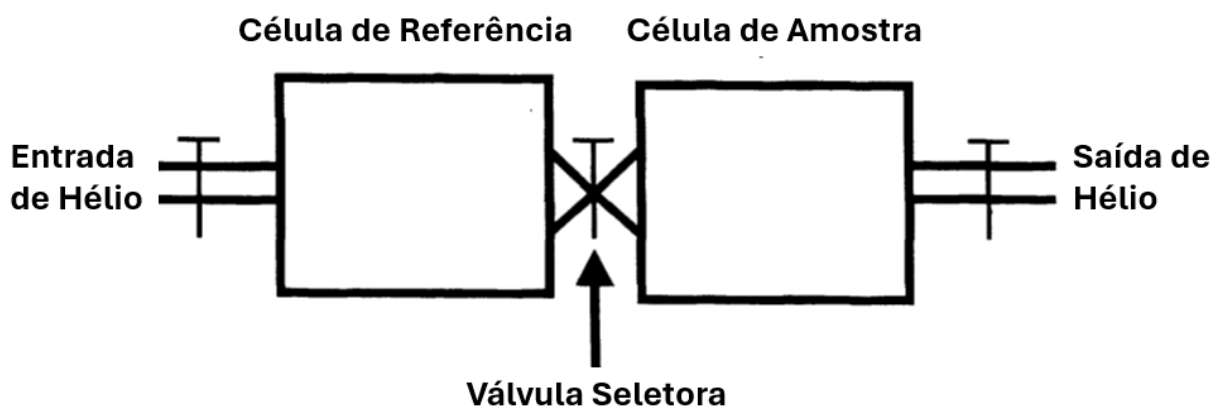


Figura 13 – Desenho esquemático da picnometria com hélio [26].

Para começar o teste, uma quantidade volumétrica conhecida de gás hélio é colocada na célula de referência do picnômetro. Em seguida, o gás hélio é liberado lentamente da célula

de referência para a célula de amostra, onde as fibras estão posicionadas. É medida a pressão do gás hélio restante na célula de referência após a transferência [21].

A massa das amostras é medida em uma balança de precisão, e a densidade das fibras é determinada dividindo a massa pelo volume. O volume das amostras é calculado com base na pressão do gás hélio restante na célula de referência, utilizando a lei dos gases ideais ou outras equações termodinâmicas.

É importante ressaltar que este método oferece uma maneira precisa de determinar a densidade das fibras, uma vez que evita as limitações associadas aos métodos de imersão em líquidos, como a absorção de líquidos pelas amostras. Além disso, o uso de hélio como gás de medição proporciona uma medida precisa, pois é um gás inerte e não reage com as amostras.

No entanto, o método de Picnometria com hélio pode exigir equipamentos específicos e custosos, como picnômetros de hélio e balanças de precisão, e pode não ser adequado para todos os tipos de amostras ou aplicações devido às suas limitações de tamanho e forma da amostra.

2.3.5. MÉTODO DE PICNOMETRIA COM LÍQUIDOS

O método de Picnometria com líquidos é semelhante aos métodos de Arquimedes e Picnometria com hélio, sendo utilizado para determinar a densidade de materiais, como fibras, por meio da medição do volume ocupado pelas amostras em um picnômetro contendo líquido.

Para este método experimental, as amostras são pesadas e então colocadas em um picnômetro com um líquido de densidade conhecida escolhido pelo executor do teste. O volume da amostra é determinado pela quantidade de líquido deslocado no picnômetro depois que a amostra está totalmente submersa. Esse método garante a medição direta do volume da amostra, visto que o líquido deslocado fornece a indicação do volume ocupado pela amostra no picnômetro. A densidade das fibras é então calculada dividindo a massa da amostra pelo volume do líquido deslocado no picnômetro. É importante ressaltar que este método é eficaz apenas para materiais cuja densidade seja superior à do líquido utilizado no picnômetro [21].

Um padrão para esse tipo de medição pode ser consultado na norma ASTM D792 [27]. No entanto, é importante notar que a escolha dos líquidos de teste é limitada pela densidade das

fibras em questão. Além disso, este método pode não ser apropriado para todas as aplicações, pois depende das características das amostras, disponibilidade de equipamentos, líquido selecionado e das exigências do estudo em questão.

2.4. ENSAIOS MECÂNICOS

2.4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio mecânico de tração consiste na fixação de um corpo de prova padronizado que é submetido a uma carga de tração gradual e uniaxial alongando o material até a sua ruptura. A montagem do corpo de prova na máquina de ensaio é esquematizada na Figura 14.

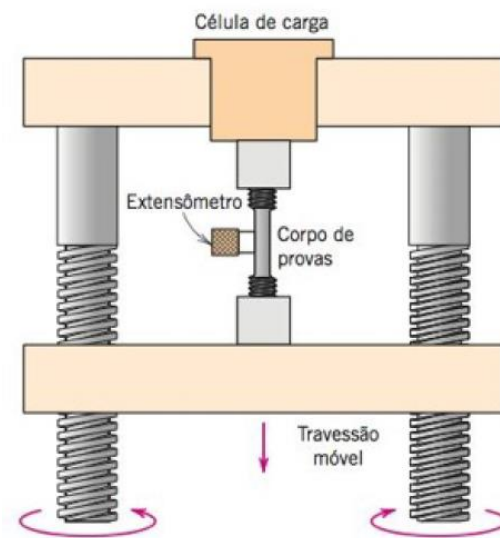


Figura 14 – Representação esquemática do dispositivo usado para a condução de ensaios de tração [1].

O ensaio fornece então a variação de força em função do deslocamento do material, a partir desses dados pode-se determinar com base nas dimensões do corpo de prova as tensões e deformações e representá-las em gráficos como exemplificado na Figura 15. Por meio dessas informações é possível determinar as principais propriedades mecânicas do material referente à tração, como: módulo de elasticidade, limite de escoamento em tração, limite de resistência, tensão de ruptura, a ductilidade e a tenacidade, de forma aproximada pela área do gráfico, bem como a definição das regiões elástica e plástica.

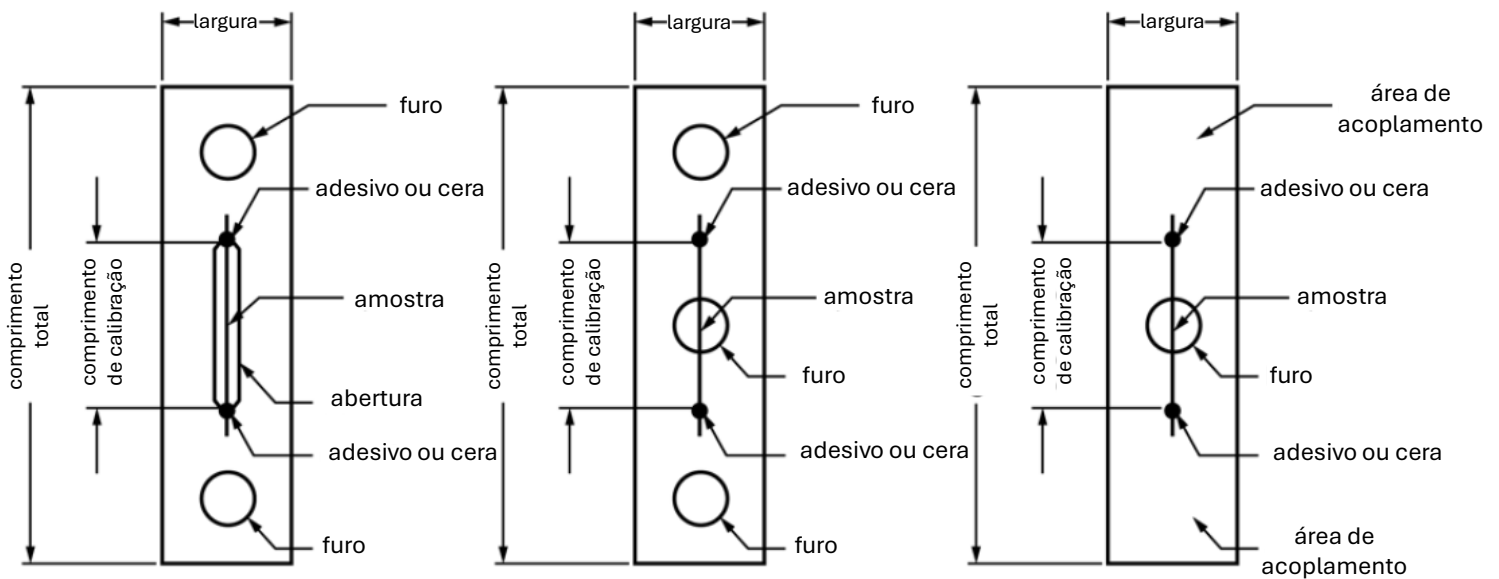


Figura 17 – Exemplos de montagem de suportes segundo ASTM C1557 [30].

2.4.2. ENSAIO DE FLEXÃO

Este tipo de ensaio mecânico consiste no dobramento de corpo de prova retilíneo apoiado a partir de uma carga de flexão conforme esquematizado na Figura 18, o afastamento entre os suportes e seus respectivos raios são especificados por norma e dependem das dimensões dos provetes. Este ensaio fornece informações quanto à ductilidade do material para diferentes seções. A máquina é configurada para realizar o esforço de flexão no provete até o corpo adquirir um ângulo especificado ou falhar por ruptura [31].

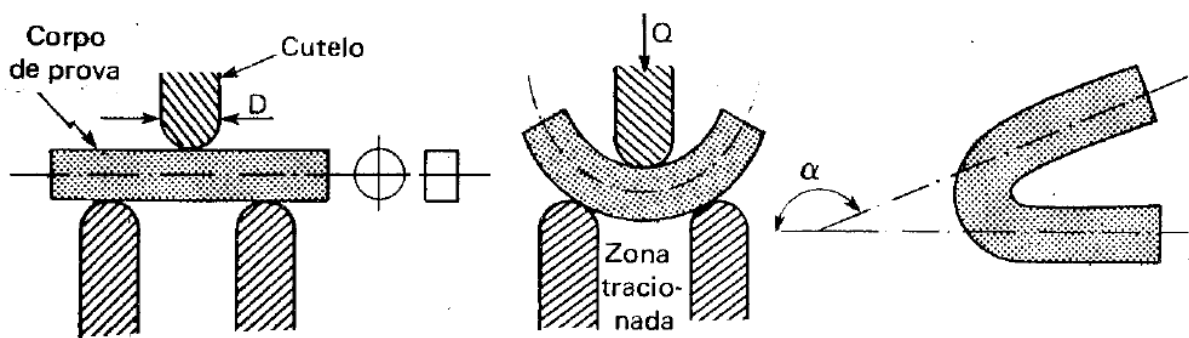


Figura 18 - Esquema de ensaio de flexão [31].

Há dois métodos mais comuns para realizar ensaios de flexão, conhecidos como ensaio de flexão de três pontos e ensaio de flexão de quatro pontos, sendo o primeiro o mais

comumente utilizado na prática. Os dois tipos de ensaios para flexão podem ser observados esquematicamente na Figura 19 e Figura 20. No que diz respeito à padronização, as normas mais amplamente empregadas na literatura são a ISO 178 [32], ISO 14125 [33] e a ASTM D 790 [34], [35].

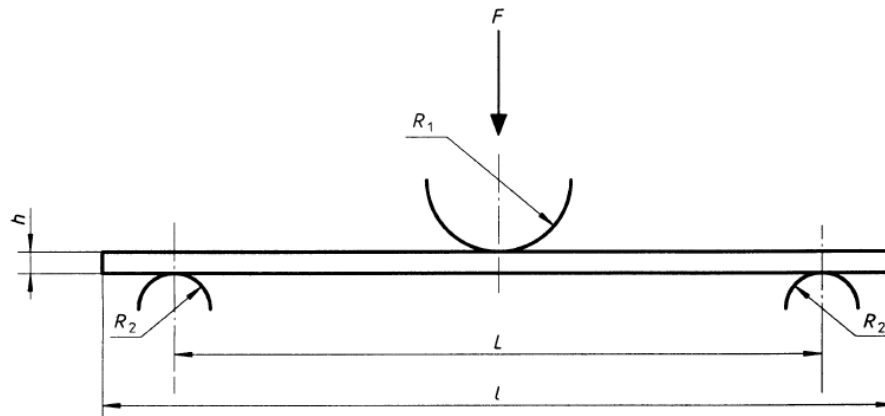


Figura 19 – Arranjo de ensaio de flexão de três pontos [33].

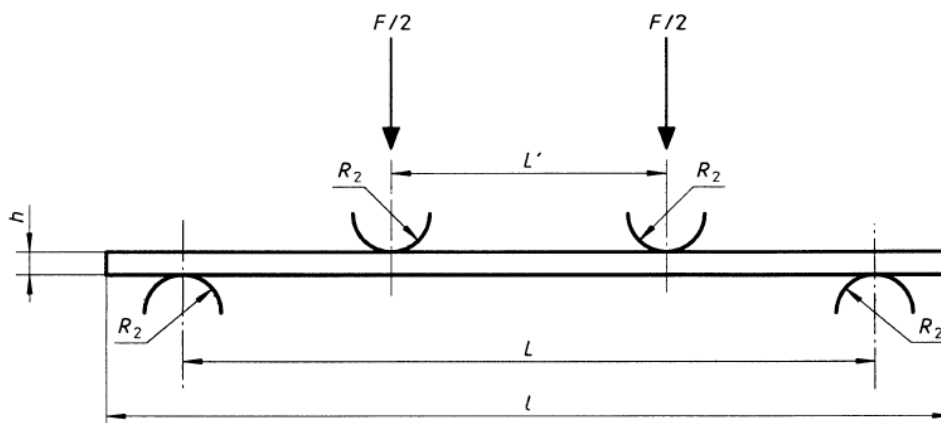


Figura 20 - Arranjo de ensaio de flexão de quatro pontos [33].

Com base nos dados obtidos no ensaio para força e deflexão, e tendo as demais informações dimensionais do corpo de prova normalizado, é possível obter a tensão e deformação para cada instante conforme a Equação 4 e Equação 5, para ensaios de três pontos.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2.bh^2} \quad (4)$$

Onde:

σ_f – Tensão de flexão em MPa;

F – Carga aplicada ao corpo em N;

L – Distância entre apoios em mm;

h – Espessura do corpo de prova em mm;

b – Largura do corpo de prova em mm.

$$\varepsilon = \frac{6sh}{L^2} \quad (5)$$

Onde:

ε – Deformação em mm/mm;

s – Deflexão em mm;

L – Distância entre apoios em mm;

h – Espessura do corpo de prova em mm;

2.5. MÉTODO DE TAGUCHI

A metodologia de Taguchi, desenvolvida por Genichi Taguchi, é uma abordagem estatística com objetivo de otimizar a qualidade dos produtos e processos industriais. Taguchi dedicou sua carreira ao estudo e implementação de técnicas de melhoria da qualidade, destacando-se por sua contribuição significativa nesse campo [36].

Este método se baseia na metodologia conhecida como Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*), que tem por objetivo a otimização de uma ou mais características de um produto ou processo de acordo com as exigências do estudo [37].

Para aplicação do método de Taguchi, é necessário avaliar quais são as variáveis de entrada relevantes para o estudo e os níveis que serão analisados. Para que, desta forma, seja possível selecionar o arranjo ortogonal e analisar como essas variáveis influenciam no resultado da propriedade/característica desejada [37].

O arranjo ortogonal de Taguchi é construído no modelo L_n , onde “n” representa o número de experimentos para serem realizados. Uma das grandes vantagens da utilização deste

método é a redução do número de experimentos necessários e a capacidade de avaliar fatores de forma simultânea, gerando economia de tempo e recursos.

A Tabela 4 indica quais são os arranjos ortogonais possíveis para um estudo em função do número de parâmetros e níveis escolhidos [37].

Tabela 4 – Seleção do arranjo ortogonal de Taguchi. Adaptado de R. de Lacerda 2021 [37].

		Número de Parâmetros								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Número de Níveis	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27
	4	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50

O método de Taguchi baseia-se na ideia de que a qualidade está relacionada com o nível de variação em torno de um alvo específico. Ele utiliza medidas estatísticas, como a razão sinal-ruído (S/N), para avaliar a qualidade do produto e identificar os parâmetros de controle que maximizam ou minimizam a variação em relação ao alvo desejado [38].

Existem 3 tipos de razão sinal-ruído (S/N) para o parâmetro desejado:

- Nominal é melhor;

$$S/N_t = 10 \times \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (6)$$

- Maior é melhor;

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (7)$$

- Menor é melhor.

$$S/N_S = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (8)$$

Onde:

\bar{y} é a média dos dados observados;

s_y^2 é a variância de y ;

n é o número de observações;

y_i é o dado observado.

A razão sinal-ruído (S/N) poderá ser analisada para avaliar quais combinações de níveis e parâmetros apresentam os melhores resultados e, posteriormente, é utilizada na análise de variância (ANOVA) [39].

A análise de variância (ANOVA) é utilizada no método de Taguchi para comparar dois ou mais níveis de uma ou mais variáveis de controle e determinar o grau de influência dessas variáveis no desempenho de uma característica selecionada. Ela é baseada na comparação das variâncias, que medem o quão distantes os dados de uma população estão em relação a sua média [37].

Para aplicação da ANOVA, é necessário calcular uma série de estatísticas como a soma de quadrados, os graus de liberdade, a soma média dos quadrados e a razão F. A soma de quadrados mede a variação para os diferentes componentes do modelo, enquanto os graus de liberdade representam a quantidade de informações totais no modelo. Os quadrados médios são a razão da soma dos quadrados pelo grau de liberdade e indicam a variação entre as médias amostrais. A razão F é a estatística de teste utilizada para determinar se um fator de controle do modelo está associado com a resposta e o quanto de influência ele exerce sobre esta resposta [37].

A aplicação da ANOVA em um experimento Taguchi permite identificar quais fatores são significativos para o aumento do valor da razão sinal-ruído (S/N) e, conseqüentemente, para a redução da razão [37].

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo contém a descrição dos materiais utilizados para fabricação e caracterização do material proposto e dos processos de preparação desenvolvidos para o estudo.

3.1. APLICAÇÃO PRÉVIA DO MÉTODO DE TAGUCHI

Com base na revisão bibliográfica apresentada na seção anterior, observa-se que diversos parâmetros de fabricação geram significativa influência nas propriedades finais do compósito. Assim, as características mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais são notavelmente impactadas pela fração volumétrica de fibras e pelo seu tratamento superficial. Considerando esses fatores, optou-se por utilizá-los como variáveis de controle. Os detalhes dessas variáveis e seus respectivos níveis podem ser encontrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis de controle do compósito.

Símbolo	Parâmetro	Nível 1	Nível 2
A	Tratamento superficial da fibra	Tratamento em NaOH	Sem tratamento
B	Fração volumétrica de fibra	3%	6%

Com base nas variáveis de controle e seus respectivos níveis, é possível criar o arranjo ortogonal de Taguchi L4 demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Arranjo ortogonal de Taguchi L4.

Número do teste	A	B
	Tratamento superficial da fibra	Fração volumétrica de fibra
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

3.2. METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE COCO

As fibras de coco foram disponibilizadas pelo professor orientador do IPB e são oriundas do Brasil. Parte das fibras foram submetidas ao tratamento químico superficial de mercerização em NaOH para avaliar a sua influência na adesão do compósito e suas propriedades finais. Além disso, houve o esforço para determinação da densidade das fibras através do método do picnômetro.

3.2.1. TRATAMENTO DE MERCERIZAÇÃO

Cerca de 60g de fibras foram submersas em solução de 3% de NaOH durante 24h em temperatura ambiente. Após tratamento, as fibras foram lavadas com ácido acético em concentração de 0,1 mol e enxaguadas com água destilada até neutralizar o pH o mantendo entre 6 e 7. Em seguida, as fibras foram submetidas a secagem por 22 horas a 50°C. Na Figura 21 é possível observar as fibras antes e depois do tratamento superficial.

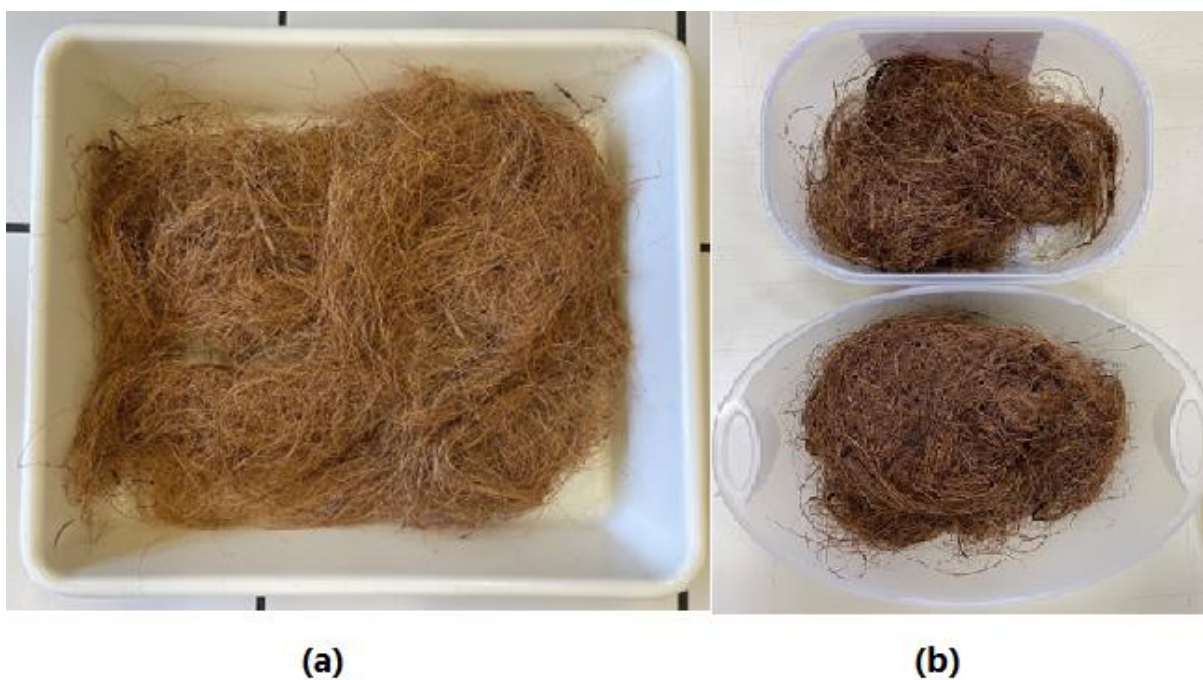


Figura 21 – (a) fibras não tratadas. (b) fibras pós-tratamento.

3.2.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DAS FIBRAS DE COCO

De acordo com a disponibilidade de materiais, foi escolhido o método de picnometria com água para a determinação da densidade das fibras. Para isto, foi utilizado o laboratório de Química Analítica do campus da ESTiG no IPB, onde se disponibilizou um picnômetro de sólidos de 50ml (Figura 22), uma estufa Scientific Series 9000 (Figura 23) e uma balança analítica com precisão digital de 0,0002g modelo ADA 210/C da Algen Scale (Figura 24).



Figura 22 – Picnômetro de sólidos 50ml.



Figura 23 – Estufa Series 9000.

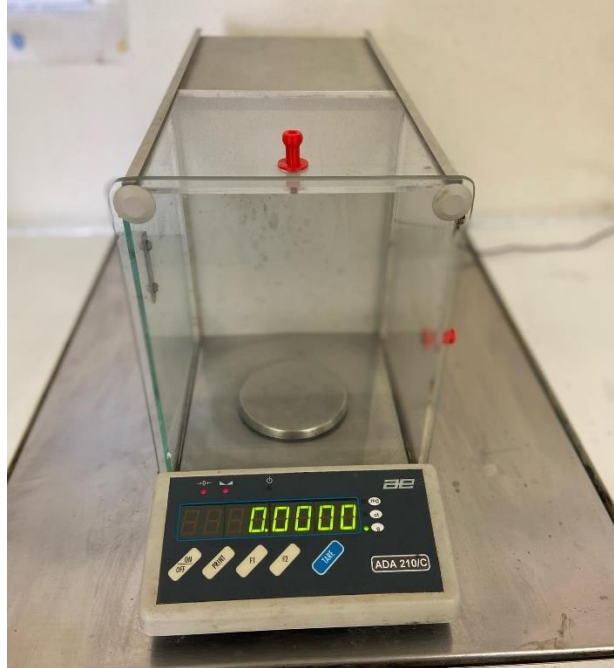


Figura 24 – Balança digital ADA 210/C.

Duas amostras (uma com fibras não tratadas e outra com fibras tratadas) foram pesadas e depois colocadas para secagem em estufa a 105°C por 24h. Depois de secas, foram novamente pesadas e com base nas massas da amostra inicial e da amostra seca, foi determinado o fator de correção das massas e o teor de humidade a partir da Equação 9 e Equação 10, respectivamente.

$$F_c = \frac{(amostra\ inicial/amostra\ seca)}{amostra\ seca} \times 100 \quad (9)$$

$$T_h = \frac{(amostra\ inicial - amostra\ seca)}{amostra\ seca} \times 100 \quad (10)$$

Para a determinação da densidade das fibras, utilizou-se a Equação 11 [20] e, para isso, foram feitas as medidas das respectivas massas 5 vezes para 4 amostras retiradas de cada amostra maior, para as fibras tratadas e não tratadas. Após cada pesagem a amostra foi levada à estufa para secagem a 105°C por 24 horas. A densidade da água destilada foi estabelecida para cada pesagem de acordo com a temperatura medida, utilizando como auxílio a Tabela 7.

$$\rho_{fibra} = \frac{m_1}{\frac{(m_3 - m_2) - (m_4 - m_2 - m_1)}{\rho_{H_2O}}} \quad (11)$$

Onde:

m_1 é a massa da amostra seca (g);

m_2 é a média de massa do picnômetro limpo e seco (g);

m_3 é a média de massa do picnômetro com água destilada (g);

m_4 é a massa do picnômetro com água destilada e amostra seca (g);

ρ_{H_2O} é a densidade da água destilada (g/cm³).

Tabela 7 – Densidade da água destilada de acordo com a temperatura [20].

Temperatura (°C)	Densidade (g/cm ³)
15	0.9991
16	0.9989
17	0.9988
18	0.9986
19	0.9984
20	0.9982
21	0.9980
22	0.9978
23	0.9975
24	0.9973
25	0.9970

Portanto, foi feita a calibração do picnômetro para determinar a massa do mesmo vazio e cheio com água destilada. Para este procedimento, foram feitas 5 pesagens e tirado a média entre elas para cada uma das configurações citadas. É importante ressaltar que o picnômetro foi limpo e passou por secagem na estufa a 105°C por 24 horas antes da pesagem.

Para a determinação da massa do picnômetro com amostra e água, foi pesado a amostra seca e depois colocado toda a massa dentro do picnômetro de sólidos, em seguida, o picnômetro foi preenchido com água destilada e tapado, depois disso foi preenchido com água até chegar à marcação do picnômetro e depois pesado 5 vezes na balança digital. Este procedimento foi feito em 5 dias diferentes para fazer a secagem das amostras antes de pesá-las.

3.2.3. PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA

Para o preparo de corpos de prova para ensaio de tração em monofilamentos como as fibras de coco, foi utilizado como base a norma ASTM C1557 [30]. Para este procedimento

foram retiradas 5 fibras, aleatoriamente, para cada amostra de fibras de coco, tratadas e não tratadas, e depois foi medido com o auxílio de um micrômetro o diâmetro da fibra em 4 pontos distintos e feito a média desses valores. Em seguida, as fibras foram fixadas em suportes de papel como demonstrado na Figura 25.



Figura 25 – Corpos de prova de fibras de coco.

Porém, as fibras apresentaram escorregamento no interior do suporte no ponto de fixação, pois o diâmetro das fibras era menor que a espessura do papel e, portanto, as garras da máquina não as fixavam. Como tal, o suporte de papel foi substituído por uma lixa cortada que fez a fixação entre as garras pneumáticas e o filamento de fibra como demonstrado na Figura 26, o *gauge length* configurado foi de 50 mm.



Figura 26 – Fixação de provetes com lixas.

3.2.4. ENSAIO DE TRAÇÃO EM FIBRAS DE COCO

O ensaio de tração para fibras foi realizado com base na norma ASTM C1557 [30], utilizando uma máquina de ensaio universal modelo Shimadzu Autograph AGS-X 10KN, conforme observado na Figura 27, no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ES-TiG no IPB. A velocidade de ensaio foi de 5 mm/min com uma pré-carga de 10 N, utilizando como referência os parâmetros utilizados nos estudos de Gomes 2020 [20] e Aguirar *et al.* 2023 [40].



Figura 27 - Shimadzu Autograph AGS-X 10KN.

3.3. METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA RESINA *GREENPOXY*

A resina verde foi disponibilizada pelo professor orientador do IPB e é composta por dois produtos, o SR *GreenPoxy* 56 e o endurecedor SD *Surf Clear*, ambos da fabricante Sicommin. Algumas das propriedades desses produtos podem ser observadas individualmente nas Tabela 8 e Tabela 9, dados retirados da documentação técnica do fabricante.

Tabela 8 – Propriedades SR *GreenPoxy* 56. Adaptado de [9].

Aspecto / cor	Líquido transparente
Armazenamento:	2 anos, livre de cristalização
Viscosidade (mPa.s + 20 %)	
@ 15 °C	2500
@ 20 °C	1400
@ 25 °C	800
@ 30 °C	500
@ 40 °C	250
% de carbono de origem biológica	50 - 58
Cor (<i>Gardner</i>)	2 max
Densidade @ 20 °C ± 0.005	1.198
Índice de refração @ 25 °C 0.50%	1.535

Tabela 9 – Propriedades SD *Surf Clear*. Adaptado de [9].

Aspecto / cor	Líquido transparente
Reatividade típica	Padrão
Viscosidade (mPa.s + 20 %)	
@ 15 °C	80
@ 20 °C	60
@ 25 °C	40
@ 30 °C	30
% de carbono de origem biológica	0
Cor (<i>Gardner</i>)	1 max
Densidade @ 20 °C ± 0.005	0.958

3.3.1. PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova para ensaios de tração e flexão para a resina foram fabricados segundo as normas ASTM D638 [29] e ISO 178 [32], respectivamente, com as dimensões sugeridas para o tipo I na norma do ensaio de tração e classe I (ensaio de 3 pontos) na norma de ensaio de flexão, ambos com espessura de 4 mm.

Para a fabricação dos provetes foram maquinados moldes em alumínio nas dimensões especificadas na Figura 28 e Figura 29.

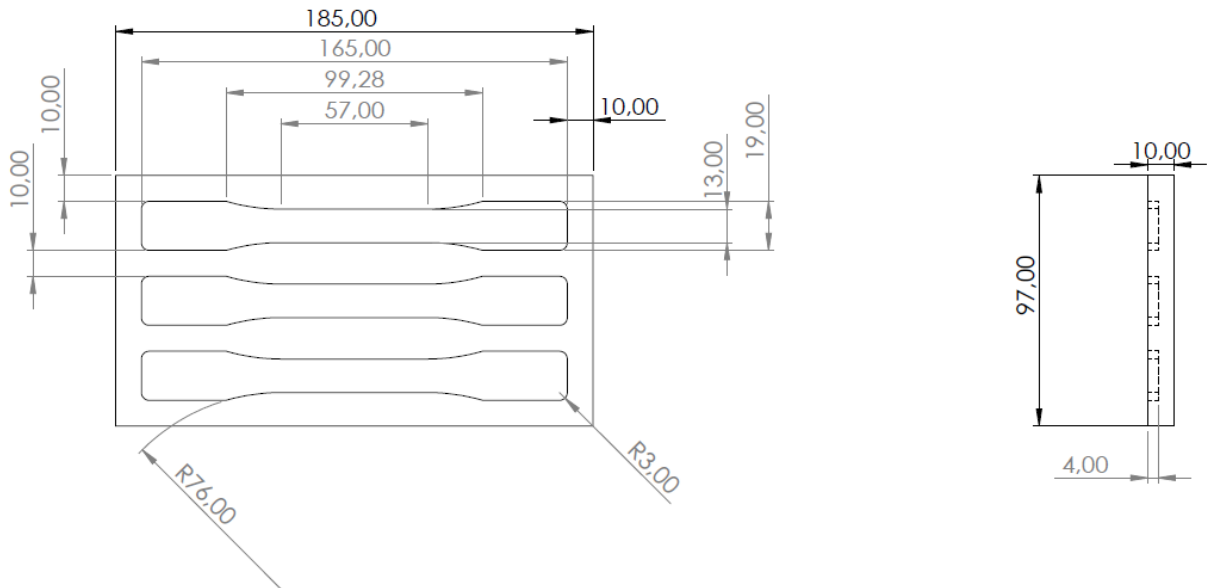


Figura 28 – Molde para ensaio de tração segundo norma ASTM D638.14 [29] com dimensões em mm.

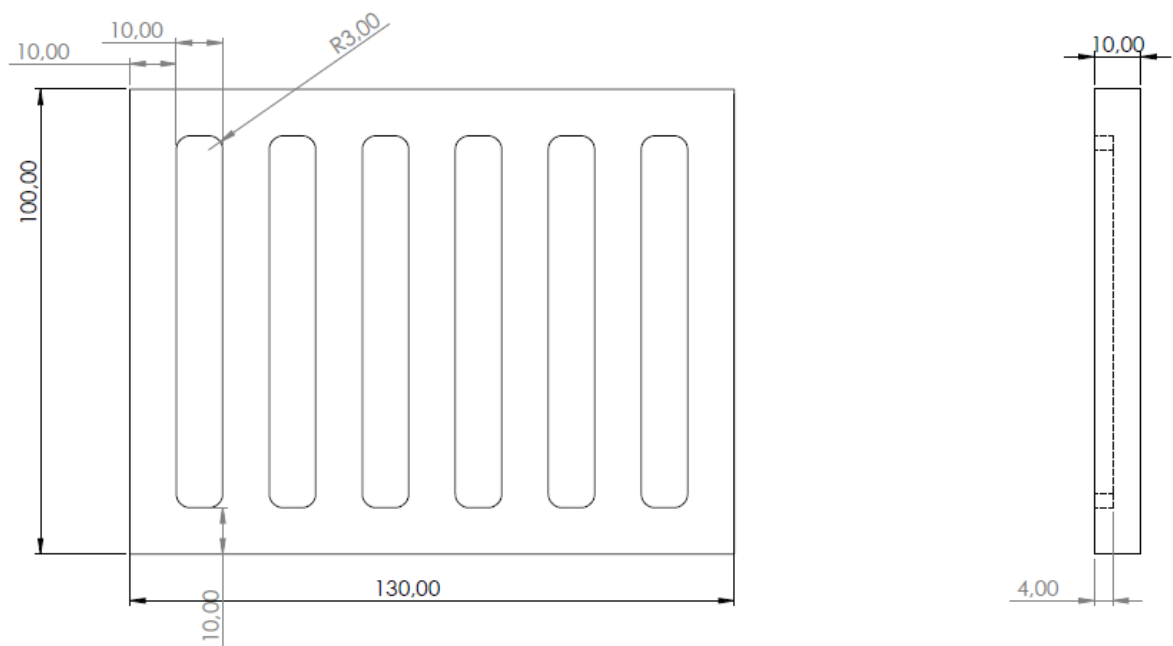


Figura 29 – Molde para ensaio de flexão segundo norma ISO 178 [32] com dimensões em mm.

Para a fabricação dos moldes, foram utilizadas chapas de alumínio com espessura de 10 mm disponíveis no Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTiG no IPB, onde, também, foram realizados os cortes da chapa e, em seguida, a maquinagem dos moldes na fresadora CNC (modelo DMC 63V da fabricante Deckel Maho), como pode ser observado na Figura 30 e Figura 31.



Figura 30 – Corte de chapa de alumínio.



Figura 31 – Usinagem dos moldes.

Depois de construídos os dois moldes, um para tração e outro para flexão, se deu prosseguimento à fabricação dos corpos de prova de resina em molde aberto. Foi utilizado a proporção de 100/45 na relação da mistura de resina e endurecedor para garantir a cura do material no ciclo de cura sugerido na documentação técnica do fabricante [9] de 24h a 23°C + 24h a

40°C + 16h a 60°C. Para curar a resina nas temperaturas indicadas foi utilizado a estufa WTC Binder do Laboratório de Geotecnia da ESTiG no IPB observado na Figura 32.



Figura 32 – Estufa WTC Binder.

Entretanto, diversos tipos de desmoldante tiveram que ser testados devido à dificuldade encontrada para desmoldar os corpos de prova do molde depois de curado. Por fim, o desmoldante que apresentou melhor resultado para o desmolde dos corpos de prova de resina foi o spray 82-2405 da fabricante ACMOS e a cera *Paste Wiz* da fabricante AXEL *Plastics Research Laboratories*, ambos utilizando 5 camadas de desmoldante com intervalo de 10 minutos entre cada aplicação e polimento da superfície no final. Não obstante, para auxiliar na desmoldagem, foram utilizados suportes de fita cola com superfície plástica para puxar os corpos de prova do molde, como pode ser observado na Figura 33.

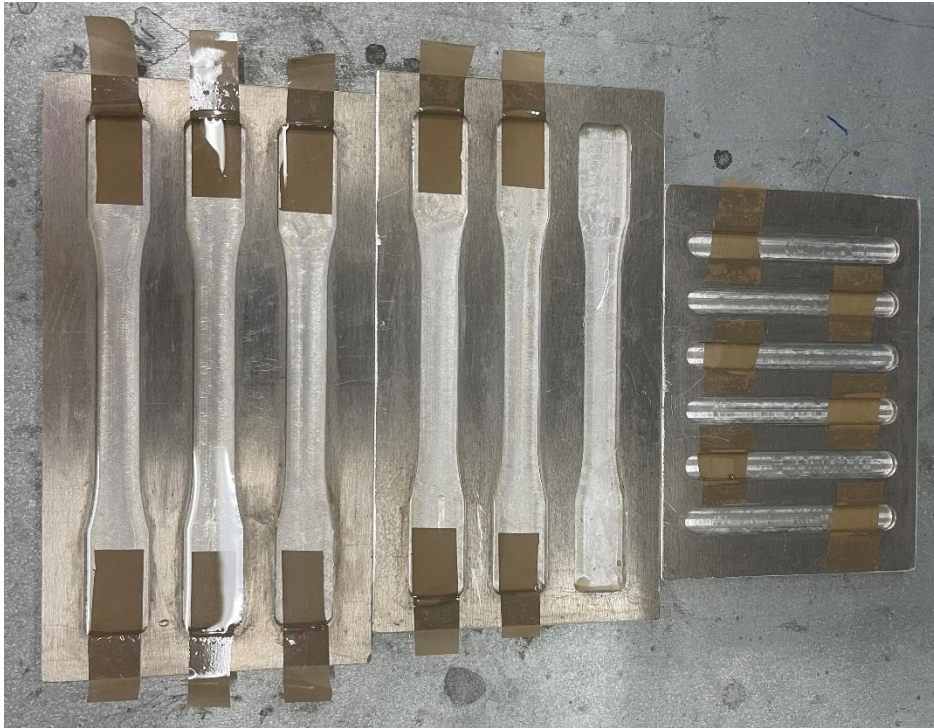


Figura 33 – Configuração final de moldes para fabricação de resina.

Durante a fabricação dos corpos de prova, foi evidenciada a dificuldade para desmoldar os corpos de prova de flexão do molde, devido às menores dimensões, dificuldade de aplicação do desmoldante e área de fixação disponível para os suportes em fita cola serem mais reduzidos. Visto isso, optou-se pela fabricação de um molde feito de silicone para que fosse possível a fabricação e desmolde dos provetes de resina. O molde pode ser observado na Figura 34.



Figura 34 – Molde para ensaios de flexão de resina feito em silicone.

3.3.2. ENSAIO DE TRAÇÃO PARA RESINA *GREENPOXY*

Para este ensaio mecânico foram utilizados 6 corpos de prova, ensaiados sob as mesmas condições de temperatura e humidade ambiente, na máquina de ensaio universal modelo Shimadzu Autograph AGS-X 10kN, no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTiG do IPB. Ensaio feito em conformidade com a norma ASTM D638 [29].

Os corpos de prova foram, previamente, medidos em espessura e largura na seção estreita dos mesmos e a montagem no equipamento pode ser observada na Figura 35, com atenção ao alinhamento do eixo longo do corpo de prova com a fixação nas garras da máquina.

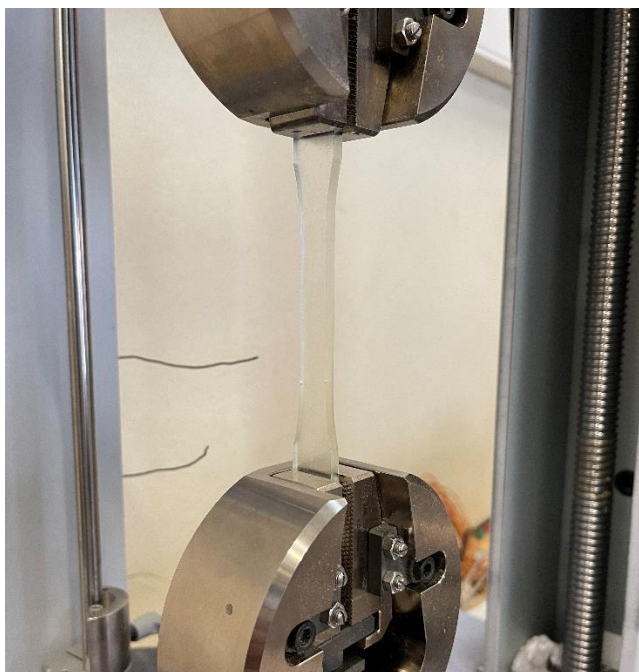


Figura 35 – Montagem do corpo de prova de resina na máquina de ensaio de tração.

Com base na norma, foi definida a velocidade de ensaio de 5 mm/min e que a ruptura ocorresse dentro de um intervalo de 5 minutos. O padrão de fratura ideal nos corpos de prova de ensaio de tração é que este ocorra na seção estreita do mesmo como demonstrado na Figura 36.



Figura 36 – Fratura de corpo de prova sob ensaio de tração.

Com base nos dados fornecidos do ensaio para força e deslocamento, foi possível calcular a média e desvio padrão das principais propriedades mecânicas obtidas por esse tipo de ensaio.

3.3.3. ENSAIO DE FLEXÃO PARA RESINA *GREENPOXY*

Para este ensaio, foram, também, utilizados 6 corpos de prova, ensaiados sob as mesmas condições de temperatura e humidade ambiente, na máquina de ensaio universal modelo Shimadzu Autograph AGS-X 10kN, no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTiG do IPB. Ensaio feito em conformidade com a norma ISO 178 [32].

Os corpos de prova foram previamente medidos, em espessura e largura, na região central dos mesmos e a montagem no equipamento podem ser observados na Figura 37, com atenção ao posicionamento correto ao distanciamento entre apoios de 64 mm, conforme norma.

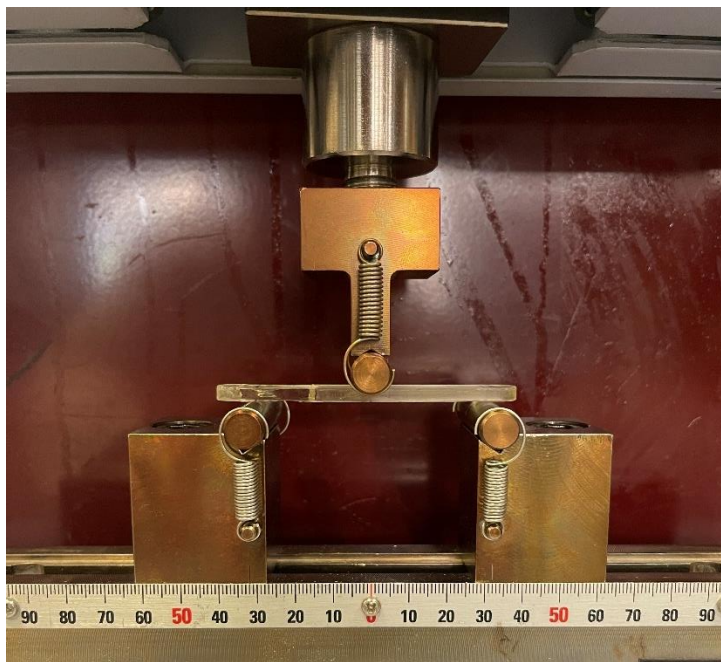


Figura 37 – Montagem do corpo de prova de resina na máquina de ensaio de flexão.

Com base na norma, foi definido a velocidade de ensaio de 2 mm/min e, baseado nos dados fornecidos do ensaio para força e deflexão, foi possível calcular a média e desvio padrão das principais propriedades mecânicas obtidas por esse tipo de ensaio.

3.4. METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

O compósito foi desenvolvido levando em consideração as variáveis de controle abordadas no início desta seção, portanto, foram fabricados 4 tipos de corpos de prova para cada ensaio mecânico. Consequentemente, foram feitos compósitos com e sem tratamento de mercerização nas fibras e com a variação da fração volumétrica com, aproximadamente, 3% e 6%, conforme Tabela 5 e Tabela 6.

Essas frações volumétricas foram escolhidas considerando as tentativas de fabricação com 5%, 10% e 15%. Os compósitos fabricados com 10% de fração volumétrica de fibras e acima disso resultaram em placas com qualidade superficial comprometida com muitas falhas e inconsistências, se apresentando uma alternativa mais difícil de se trabalhar e obter placas de compósitos adequados para o estudo com o tempo e recursos disponíveis.

3.4.1. COMPRIMENTO CRÍTICO DE FIBRA

Para o cálculo do comprimento crítico a partir da Equação 1, foi necessário utilizar a resistência à tração obtida pela caracterização da fibra, o diâmetro médio da fibra e a partir da caracterização da resina é possível extrair a tensão de escoamento ao cisalhamento a partir da equação derivada do critério de Von Mises demonstrado na Equação 12 [41], aplicado para materiais dúcteis, usando a tensão de escoamento calculado com os dados de ensaio de tração. Para isso, foi adotado o método convencional de criar uma reta paralela à região elástica do gráfico de tensão x deformação em 0,2% de deformação e então adotando a interseção das curvas como a tensão de escoamento do material como pode-se observar na Figura 38.

$$\tau_c = 0.577 \times S_y \quad (12)$$

Onde:

τ_c é a tensão de escoamento ao cisalhamento da resina;

S_y é a tensão normal de escoamento obtida do ensaio de tração da resina.

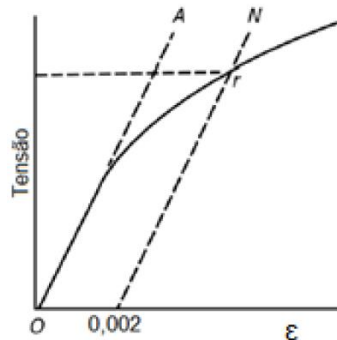


Figura 38 - Tensão limite de escoamento [42].

3.4.2. FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRA

Para determinar a fração volumétrica de fibras contidas no compósito, foi calculado utilizando a Equação 2, segundo norma ASTM D3171 [19]. Para isso, foi necessário utilizar a densidade da fibra de coco descrita na seção 3.2.2, a densidade da resina calculada a partir da lei das misturas para a proporção de resina e endurecedor utilizada na fabricação e suas

respectivas densidades relatadas na documentação técnica do fabricante [9], a massa de fibras contidas no compósito e, por fim, a massa final do compósito.

A partir de alguns testes, foi possível determinar a massa de fibras que proporciona as frações volumétricas desejadas.

3.4.3. PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA

O método de fabricação escolhido foi o de laminação manual em molde aberto, método este mais utilizado para o caso de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras descontínuas e orientação aleatória utilizando material disponível no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica da ESTiG no IPB, conforme se observa na Figura 39.

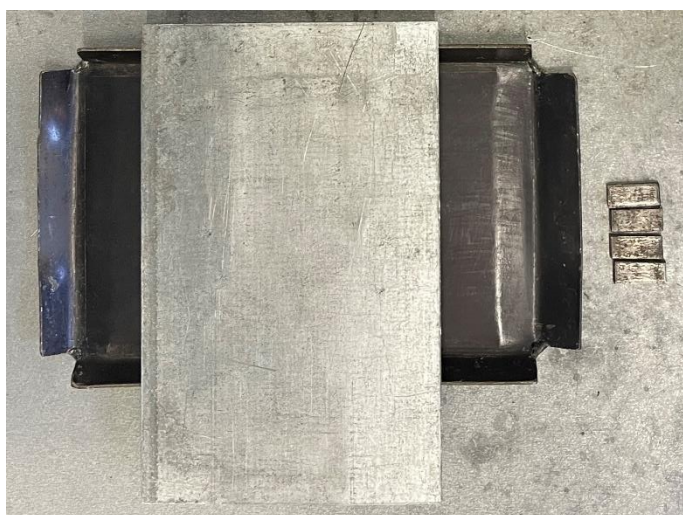


Figura 39 – Molde utilizado para fabricação do compósito.

O molde possui dimensões úteis de 133 x 210 mm e a espessura da placa de compósito foi limitada por 4 chapas de 24 x 10 mm com 4 mm de espessura.

A fabricação se iniciou com a medida prévia da massa das fibras em uma balança de precisão modelo HCB602H de 600g x 0.01g da fabricante Adam Highland, conforme Figura 40. Foram utilizados 3g de fibras para os compósitos de 3% de fração volumétrica e 6g de fibras para os compósitos com 6%, com verificação da fração volumétrica após a fabricação das placas.

As fibras foram cortadas em comprimentos acima do comprimento crítico analisado na seção 3.4.1 com resultados na seção 4.3.1, tendo assim, comprimentos variando entre 30 e 50 mm.



Figura 40 – Balança de precisão HCB602H da Adam Highland.

De seguida, com o molde previamente limpo e com aplicação de 5 camadas de desmoldante em cera, com 10 minutos entre cada aplicação, as fibras foram distribuídas aleatoriamente e uniformemente no molde, impregnadas com a resina *GreenPoxy* em duas camadas, uma no fundo e outra cobrindo as fibras, utilizando um rolo para auxiliar na impregnação de resina nas fibras, observado na Figura 41.



Figura 41 – Fabricação do compósito.

Posteriormente, sobre o molde foi colocado uma chapa e colocado sob pressão com o auxílio de um macaco hidráulico, tal como demonstrado na Figura 42. Depois de cerca de 30 minutos sob pressão, o molde foi retirado e a pressão substituída por pesos para manter uma

carga mínima de pressão. Finalmente, o molde é colocado na estufa, Figura 32, para cura a 24h a 23°C + 24h a 40°C + 16h a 60°C.

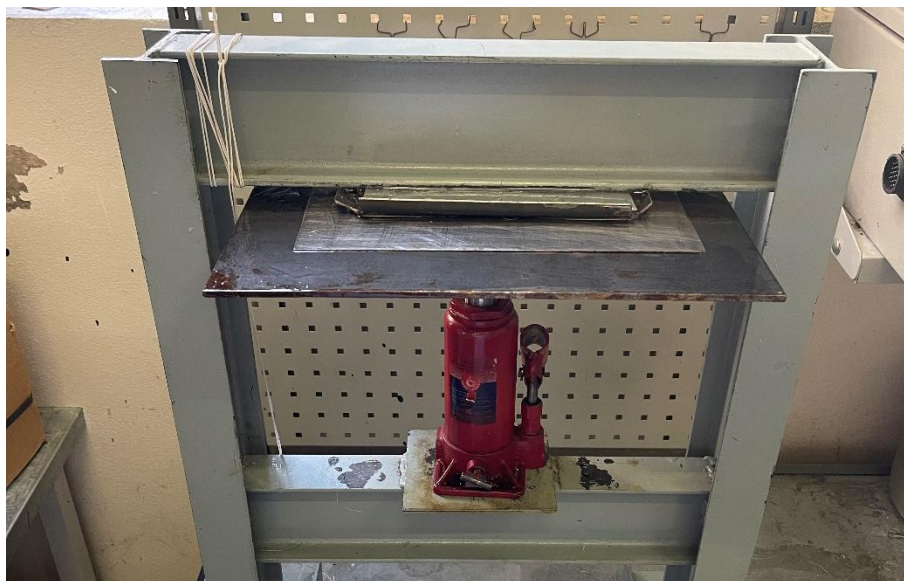


Figura 42 – Montagem do molde de compósito sob pressão no macaco hidráulico.

Na Figura 43 pode-se observar o estado final das placas fabricadas por esse método.



Figura 43 – Estado final de placas de compósito fabricadas.

Depois de fabricadas as placas de compósitos com diferentes tipos de tratamento de fibras e fração volumétrica, estas foram cortadas na fresadora CNC modelo *STEEL PRO 2515* da fabricante *OUPLAN* como pode ser observado na Figura 44, disponibilizado pelo laboratório FABLAB da ESTiG no IPB.

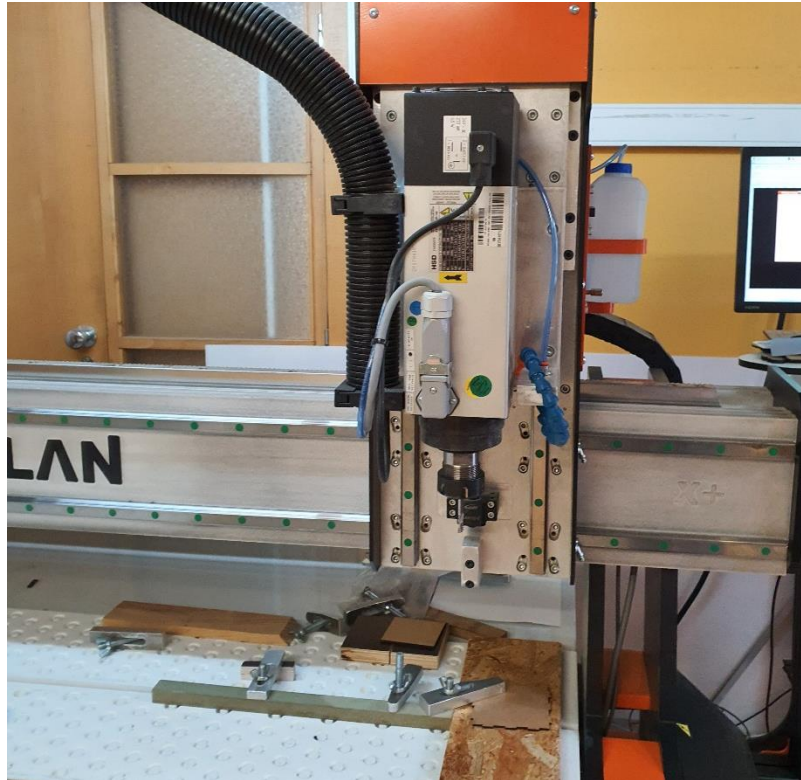


Figura 44 – Fresadora CNC *STEEL PRO 2515* da *OUPLAN*.

O código para a maquinagem foi gerado no *software* MasterCAM® para cada corpo de prova de tração e flexão, individualmente, seguindo as dimensões especificadas nas normas ASTM D638 [29] e [32] 14125 [33], respectivamente. O código foi feito desta forma para que pudessem ser aproveitadas as melhores partes de cada placa de compósito fabricada, levando em consideração a qualidade superficial resultante de cada processo de fabricação.

O processo de corte compreende a fixação das placas de compósito fabricadas no sistema de fixação disponível, marcação do centro dos corpos de prova a serem maquinados e o posicionamento do ponto inicial do corte em cada um desses pontos. O processo de corte para cada um dos tipos de corpos de prova pode ser observado na Figura 45.

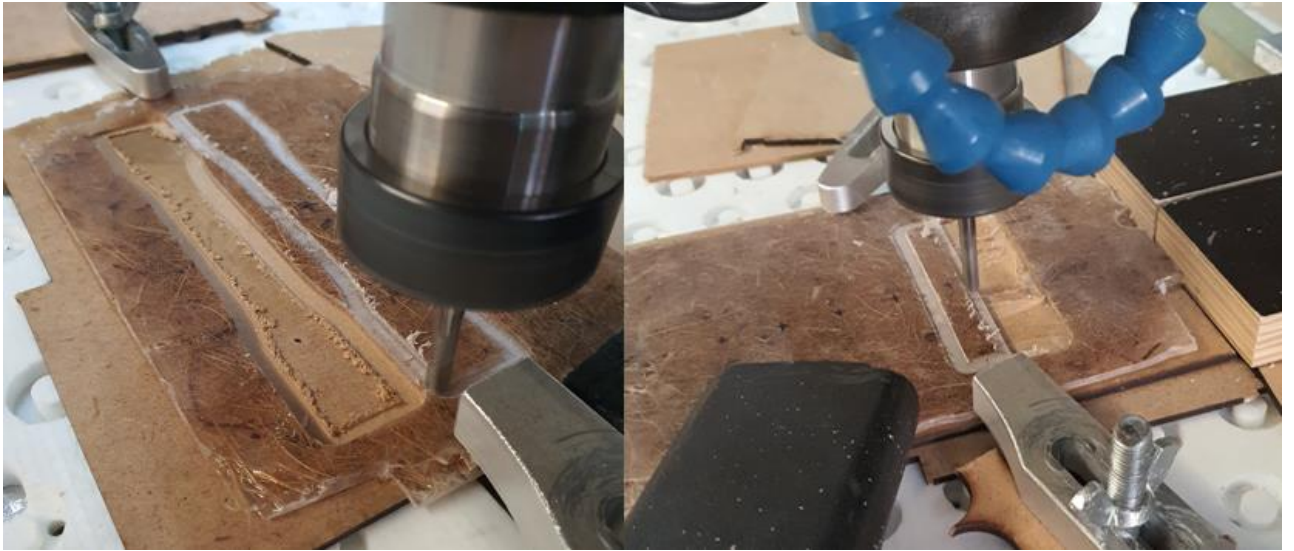


Figura 45 – Corpos de prova de tração e flexão, respectivamente, em processo de usinagem.

Depois de cortados, os corpos de prova em seu estado final se encontram como exemplificado na Figura 46.

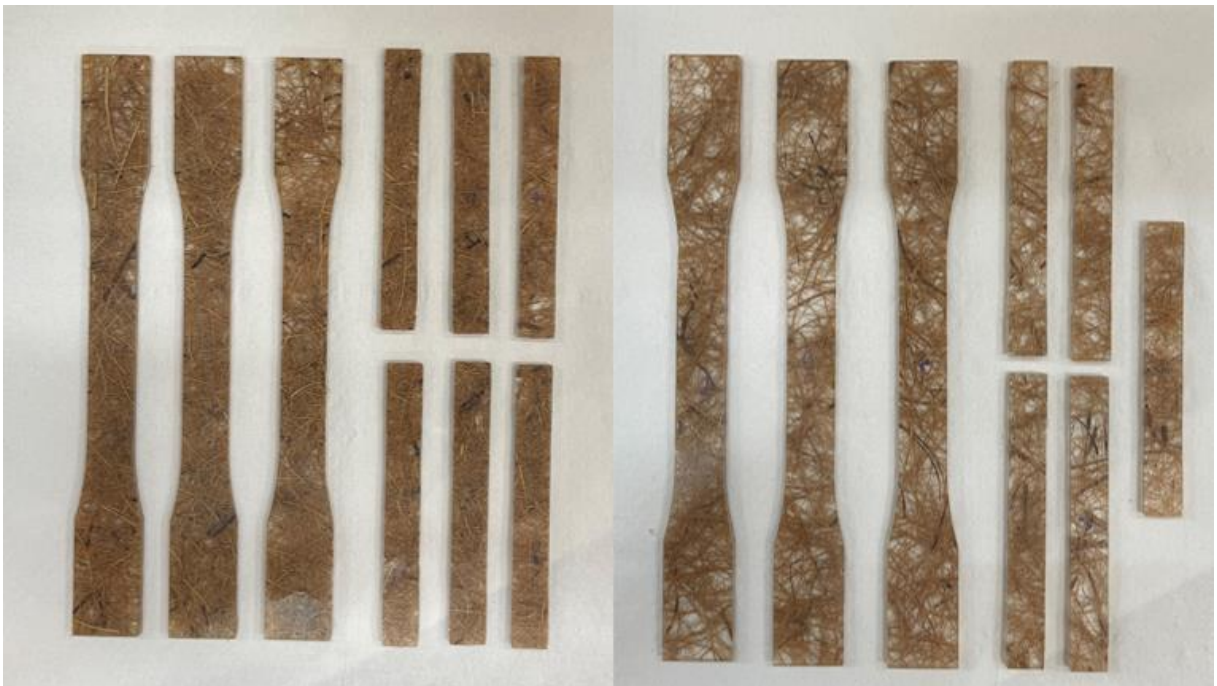


Figura 46 – Corpos de prova do compósito usinados contendo respectivamente 6% e 3% de fração volumétrica de fibras.

3.4.4. ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O COMPÓSITO

Para este ensaio mecânico foram utilizados os mesmos parâmetros e configuração do ensaio de tração da resina descrita na seção 3.3.2, segundo norma ASTM D638 [29]. Portanto, foram fabricados 3 corpos de prova para cada variável de controle conforme a Tabela 6 e foram ensaiados sob as mesmas condições de temperatura e humidade ambiente, na máquina de ensaio universal modelo Shimadzu Autograph AGS-X 10kN, no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTiG do IPB. O número de corpos de prova foi reduzido devido à disponibilidade e limitação de materiais, tempo e recursos utilizados dos laboratórios para fabricação.

Os corpos de prova foram previamente medidos em espessura e largura na seção estreita dos mesmos e a montagem no equipamento pode ser observada na Figura 47, com atenção ao alinhamento do eixo longo do corpo de prova com a fixação nas garras da máquina.



Figura 47 – Montagem do corpo de prova de compósito na máquina de ensaio de tração.

Com base na norma, foi definido a velocidade de ensaio de 5 mm/min e que a ruptura ocorresse dentro de um intervalo de 5 minutos.

Com base nos dados fornecidos do ensaio para força e deslocamento, foi possível calcular a média e desvio de padrão das principais propriedades mecânicas obtidas por esse tipo de ensaio.

3.4.5. ENSAIO DE FLEXÃO PARA O COMPÓSITO

Para este ensaio, foram utilizados os mesmos parâmetros e configuração do ensaio de flexão da resina descrita na seção 3.3.3, todavia, seguindo a norma ISO 14125 [33]. Neste caso, foram utilizados 5 corpos de prova, ensaiados sob as mesmas condições de temperatura e humidade ambiente, na máquina de ensaio universal modelo Shimadzu Autograph AGS-X 10kN, no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTiG do IPB.

Os corpos de prova foram, previamente, medidos em espessura e largura na sua região central e a montagem no equipamento pode ser observada na Figura 48, com atenção ao posicionamento correto e ao distanciamento entre apoios de 64 mm, conforme indicação da norma.

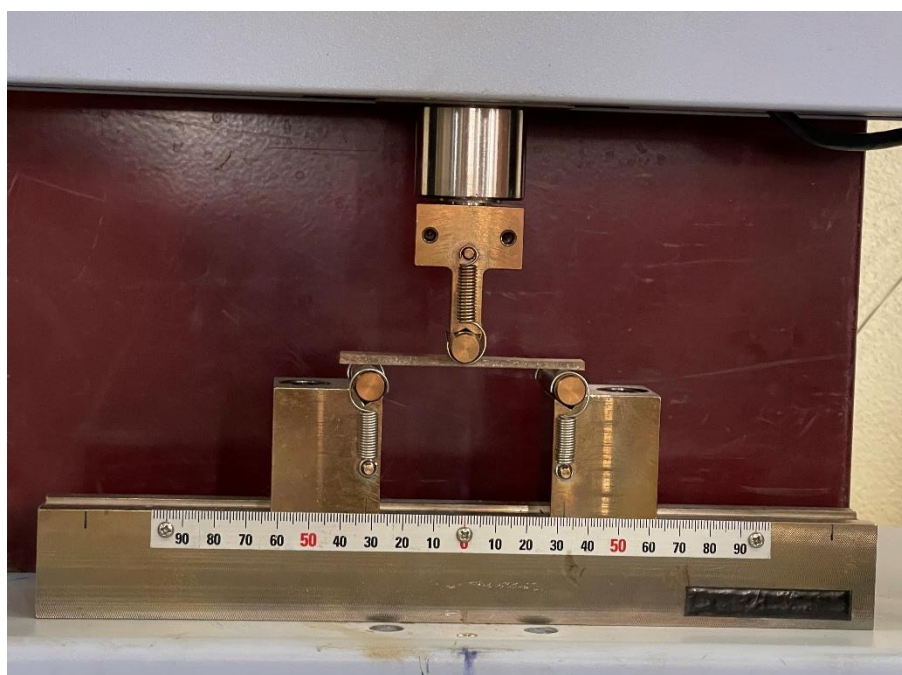


Figura 48 – Montagem do corpo de prova de compósito na máquina de ensaio de flexão.

Com base na norma, foi definido a velocidade de ensaio de 2 mm/min e baseado nos dados fornecidos do ensaio para força e deflexão, foi possível calcular a média e desvio de padrão das principais propriedades mecânicas obtidas por esse tipo de ensaio.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SUA ANÁLISE

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos cálculos efetuados e procedimentos experimentais realizados no estudo, assim como, uma breve análise dos resultados comparando com valores encontrados na literatura e estudos prévios para o caso da caracterização da resina e das fibras. No caso do compósito serão discutidos os resultados obtidos e a análise feita através do método de Taguchi e ANOVA.

4.1. RESULTADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE COCO

4.1.1. RESULTADO PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DAS FIBRAS DE COCO

Conforme discutido na seção 3.2.2, foi escolhido o método de picnometria com água, seguindo as orientações da norma ASTM D792 [27].

Com base na pesagem das amostras iniciais e depois da secagem, foi possível calcular o fator de correção e teor de humidade das amostras conforme a Equação 9 e Equação 10. O resultado pode ser observado na Tabela 10, onde T representa a amostra de fibras tratadas e NT representa a amostra de fibras não tratadas.

Tabela 10 – Resultado obtido para o fator de correção e teor de humidade.

Amostra	Massa amostra inicial (g)	Massa amostra seca (g)
T	151.8706	151.7137
NT	136.6923	136.4886
Amostra	Fator de Correção	Teor de humidade
T	65.98%	10.34%
NT	73.38%	14.92%

Em seguida, foram feitas as pesagens dos picnômetros limpos e secos e depois cheio com água destilada até a marcação como pode se observar na Tabela 11.

Tabela 11 – Massa dos picnômetros utilizados, vazio e cheio com água destilada.

PIC 90 (NT)			PIC 72 (T)		
Pesagem	m2 (g)	m3 (g)	Pesagem	m2 (g)	m3 (g)
1	27.9271	79.0317	1	29.8891	80.7831
2	27.9257	79.0314	2	29.8892	80.7825
3	27.9254	79.0312	3	29.8893	80.7822
4	27.9246	79.0303	4	29.8894	80.7818
5	27.9243	79.0297	5	29.8896	80.7813
Média	27.9254	79.0309	Média	29.8893	80.7822
DP*	0.0011	0.0008	DP*	0.0002	0.0007

Nota *: Desvio padrão.

Onde:

m2 é a massa do picnômetro limpo e seco (g);

m3 é a massa do picnômetro com água destilada (g).

Em seguida foram feitas as medidas em 4 dias diferentes, da massa de amostras retiradas entre as fibras tratadas e não tratadas, no estado seco e depois dentro do picnômetro com água destilada até a marcação. Com base nas medidas anteriores e, nestas últimas, foi possível obter os resultados representados na Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12 – Densidade das fibras não tratadas.

I		II		III		IV	
m1	0.0499	m1	0.0455	m1	0.0656	m1	0.0628
m4i		m4i		m4i		m4i	
1	79.1033	1	78.9955	1	78.9964	1	79.0214
2	79.1019	2	78.9946	2	78.9957	2	79.0211
3	79.1004	3	78.9943	3	78.9951	3	79.0207
4	79.0990	4	78.9939	4	78.9948	4	79.0206
5	79.0988	5	78.9934	5	78.9943	5	79.0196
média m4	79.1007	média m4	78.9943	média m4	78.9953	média m4	79.0207
Tagua (°C)	21.9	Tagua (°C)	23.7	Tagua (°C)	22.9	Tagua (°C)	19.8
ρ_{H2O}	0.9978	ρ_{H2O}	0.9974	ρ_{H2O}	0.9975	ρ_{H2O}	0.9982
ρ_{fibra}	-2.4996	ρ_{fibra}	0.5533	ρ_{fibra}	0.6466	ρ_{fibra}	0.8590

Tabela 13 – Densidade das fibras tratadas.

I		II		III		IV	
m1	0.0617	m1	0.0653	m1	0.0687	m1	0.0981
m4i		m4i		m4i		m4i	
1	80.7612	1	80.7631	1	80.7677	1	80.8123
2	80.7608	2	80.7625	2	80.7674	2	80.8121
3	80.7603	3	80.7622	3	80.7670	3	80.2119
4	80.7594	4	80.7619	4	80.7666	4	80.8111
5	80.7590	5	80.7613	5	80.7663	5	80.8110
média m4	80.7601	média m4	80.7622	média m4	80.7670	média m4	80.6917
Tagua (°C)	23.4	Tagua (°C)	23.7	Tagua (°C)	23.3	Tagua (°C)	20.2
ρ_{H2O}	0.9974	ρ_{H2O}	0.9974	ρ_{H2O}	0.9974	ρ_{H2O}	0.9982
ρ_{fibra}	0.7349	ρ_{fibra}	0.7637	ρ_{fibra}	0.8169	ρ_{fibra}	0.5192

Onde:

m1 é a massa da amostra seca (g);

m4 é a massa do picnômetro com água destilada e amostra seca (g).

É possível notar que os resultados encontrados para a densidade das fibras foram inconsistentes e incoerentes, visto que para que este método seja aplicado um dos requisitos era de que a densidade da amostra fosse maior que a densidade do líquido.

Pode-se concluir que o método experimental utilizado para medir a densidade das fibras não foi adequado, isso pode estar relacionado com o fato de que a densidade das fibras, conforme literatura, é muito próxima da densidade da água. Como as fibras naturais, no geral, apresentam grande variabilidade em suas amostras em termos de comprimento, espessura e propriedades, pode-se dizer que este método dificilmente apresentaria grande eficácia na avaliação da densidade para o caso das fibras de coco.

Não obstante, devido à falta de materiais e aparatos disponíveis na instituição para utilizar outro método experimental foi optado por adotar o valor médio de 3 estudos encontrados onde foram determinados, experimentalmente, o valor da densidade de fibras de coco, como pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores de densidade de fibras de coco obtidas experimentalmente.

Referência	Densidade (g/cm ³)
Silva <i>et al.</i> 2000 [13]	1.15
Panwar <i>et al.</i> 2022 [16]	1.13
Dugvekar <i>et al.</i> 2022 [11]	1.10
Média	1.13

4.1.2. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Foram ensaiados 5 corpos de prova para fibras tratadas e 5 para fibras não tratadas. Antes do ensaio foram medidos 4 vezes o diâmetro da amostra em 4 pontos diferentes com auxílio de um micrômetro e calculado a média entre as medidas para determinação da área de seção transversal de cada amostra, considerando uma seção circular. As medidas podem ser observadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Diâmetro de corpos de prova de fibras de coco para ensaio de tração.

FIBRAS TRATADAS	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D médio (mm)
T_1	0.260	0.325	0.370	0.330	0.321
T_2	0.330	0.350	0.330	0.330	0.335
T_3	0.140	0.170	0.200	0.190	0.175
T_4	0.250	0.260	0.260	0.290	0.265
T_5	0.220	0.220	0.210	0.220	0.218
FIBRAS NÃO TRATADAS	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D médio (mm)
NT_1	0.270	0.300	0.300	0.260	0.283
NT_2	0.300	0.310	0.270	0.270	0.288
NT_3	0.270	0.280	0.270	0.250	0.268
NT_4	0.250	0.260	0.260	0.240	0.253
NT_5	0.270	0.260	0.270	0.270	0.268

Com base nos dados reportados pelo ensaio de tração, foi possível calcular e gerar o gráfico de tensão x deformação observado na Figura 49 e Figura 50, e o relatório com tensões e deformações máximas na Tabela 16.

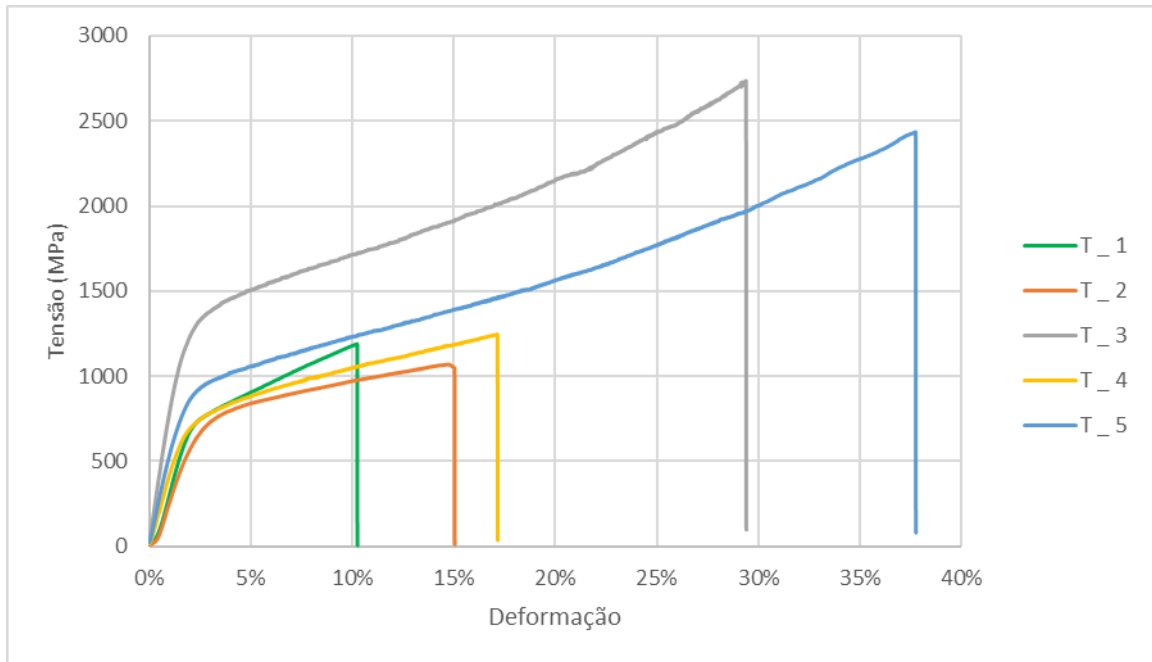


Figura 49 – Gráfico tensão x deformação de fibras tratadas.

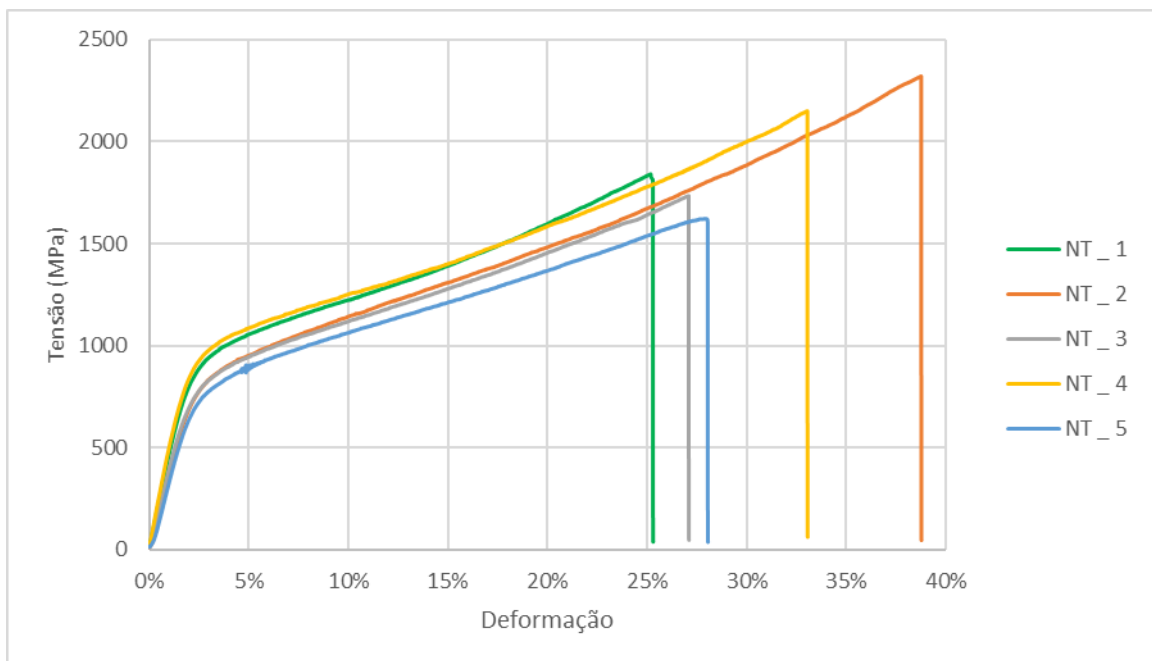


Figura 50 – Gráfico tensão x deformação de fibras não tratadas.

Tabela 16 – Resistência à tração e deformação máxima obtidas no ensaio de tração para fibras de coco tratadas e não tratadas.

Amostra	Resistência à Tração (MPa)	Deformação máxima (%)
T_1	1189.12	10.26%
T_2	1069.85	15.06%
T_3	2736.12	29.41%
T_4	1245.58	17.17%
T_5	2434.61	37.76%
Média	1735.06	21.93%
DP*	786.07	11.32%
NT_1	1841.55	25.30%
NT_2	2321.41	38.77%
NT_3	1734.82	27.10%
NT_4	2150.75	33.06%
NT_5	1622.80	28.06%
Média	1934.27	30.46%
DP*	292.46	5.47%

Nota *: Desvio padrão.

Com base nos dados apresentados é possível observar que, entre as amostras de fibras tratadas, houve uma maior discrepância de valores para tensões e deformações, visível pelo desvio padrão dos resultados de tensões e deformações máximas.

Não obstante, a média obtida para tensão e deformação máxima de ensaio verifica que as fibras não tratadas obtiveram resultados superiores em relação às duas variáveis. Conforme a literatura, o tratamento superficial nas fibras retira lignina e parte de constituintes da superfície da fibra, ou seja, apesar de ter uma melhoria superficial para adesão à matriz, pode diminuir algumas propriedades mecânicas dessas fibras.

Além disso, é possível notar que os valores de tensão estão superiores em uma escala de 10 vezes maior que os encontrados em literatura, apesar dos níveis de deformação e todos os outros aspectos serem coerentes comparando com os estudos de Silva *et al.* 2000 [13], Goyat *et al.* 2022 [10] e Rao *et al.* 2007 [43]. Foram testados outros corpos de prova com outros tipos de fixação e geraram resultados na mesma escala, portanto, os resultados apresentados foram mantidos para o estudo.

4.2. RESULTADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA RESINA *GREENPOXY*

4.2.1. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Foram ensaiados 6 corpos de prova com resultados válidos e, antes do ensaio, foram medidos a largura e 4 vezes a espessura de cada corpo de prova devido à sua variação em diferentes pontos do material. Devido ao fraco controle da pressão dos moldes durante o processo de fabrico, essa variação da espessura é uma característica típica de corpos fabricados em molde aberto. Com base nas medições efetuadas, foi calculado a média entre as medidas para determinação da área de seção transversal de cada amostra, considerando uma seção retangular. As medidas podem ser observadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Medidas de corpos de prova de resina para tração.

Amostra	Wc (mm)	T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T4 (mm)	Tmed (mm)	Área (mm ²)
CP1	13.00	4.24	4.26	4.22	4.26	4.25	55.185
CP2	13.00	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	61.100
CP3	13.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	52.000
CP4	13.00	4.50	4.46	4.50	4.50	4.49	58.370
CP5	13.00	4.10	4.22	4.20	4.10	4.16	54.015
CP6	13.00	4.06	4.10	4.10	4.00	4.07	52.845

Onde:

Wc é a largura do corpo de prova na seção estreita;

T representa a medida da espessura do corpo de prova.

A partir dos dados reportados pelo ensaio de tração, foi possível calcular e gerar o gráfico de tensão x deformação observado na Figura 51, e o relatório com tensões e deformações máximas na Tabela 18.

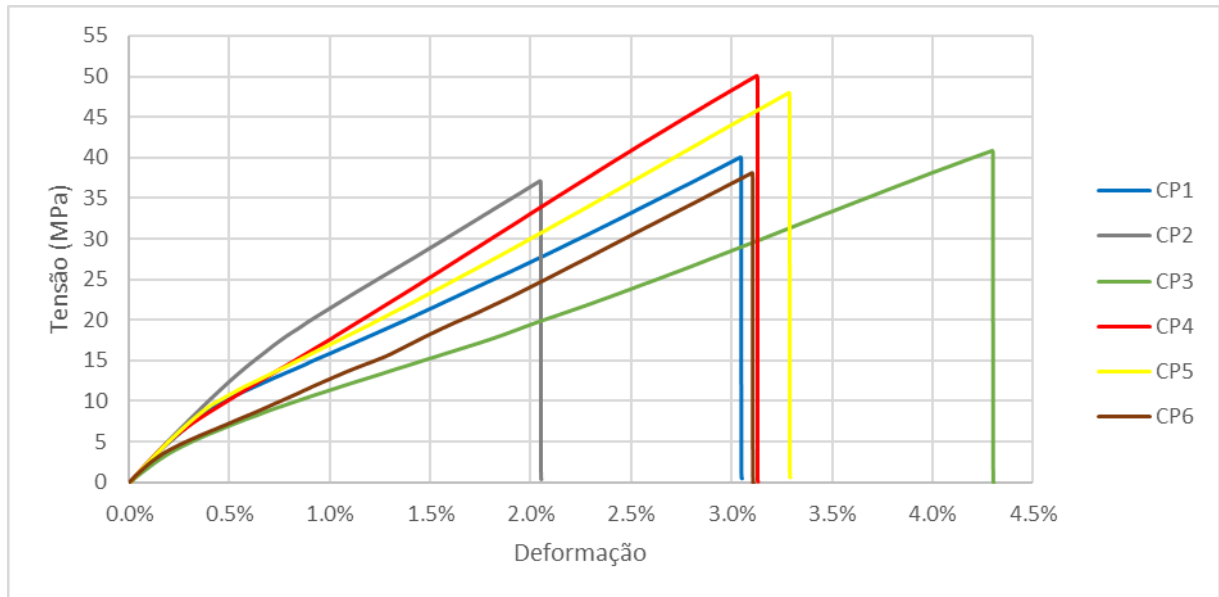


Figura 51 – Gráfico tensão x deformação para tração da resina *Greenpoxy*.

Tabela 18 – Resistência à tração e deformação máxima obtidas no ensaio de tração da resina *Greenpoxy*.

Amostra	Resistência à Tração (MPa)	Deformação máxima (%)
CP1	40.05	3.05%
CP2	37.12	2.05%
CP3	40.86	4.31%
CP4	50.08	3.13%
CP5	47.98	3.29%
CP6	38.12	3.11%
Média	42.37	3.16%
DP*	5.37	0.72%

Nota *: Desvio padrão.

Tendo em conta os dados apresentados, é possível observar que os valores encontrados para resistência à tração variam, aproximadamente, entre 37 e 50 MPa, com média de 42.37 MPa, valores condizentes com o que é informado na documentação técnica do fabricante [9], que indica valores entre 49 e 51 MPa. Contudo, os valores encontrados experimentalmente para a deformação máxima que foram, em média, 3.2%, superam o que é informado pelo fabricante, que é cerca de 1.6%, portanto, cerca de duas vezes maior que o valor de referência. Essa diferença é pequena e pode ser justificada pela diferença em condições, parâmetros e normas dos ensaios realizados.

4.2.2. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE FLEXÃO

Foram ensaiados 6 corpos de prova com resultados válidos e antes do ensaio foram medidos a largura e a espessura de cada corpo de prova. As medidas podem ser observadas na Tabela 19, onde h representa a espessura, b representa a largura e L representa a distância entre apoios.

Tabela 19 – Medidas de corpos de prova de resina para flexão.

Amostra	h (mm)	b (mm)	L (mm)
CP1	4.18	9.72	64.00
CP2	4.46	9.83	64.00
CP3	3.85	9.79	64.00
CP4	4.76	9.74	64.00
CP5	3.75	9.60	64.00
CP6	3.83	9.74	64.00

Com base nos dados reportados pelo ensaio de flexão, foi possível calcular e gerar o gráfico de tensão x deformação observado na Figura 52, e o relatório com tensões e deformações máximas na Tabela 20.

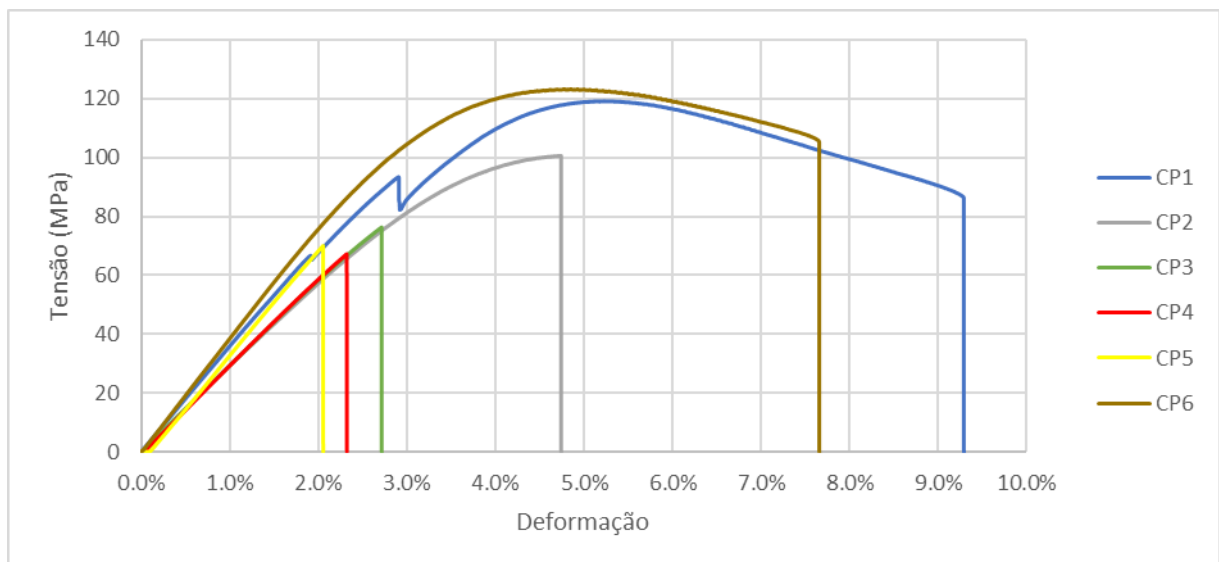


Figura 52 – Gráfico tensão x deformação para flexão da resina *Greenpoxy*.

Tabela 20 - Resistência à flexão e deformação máxima obtidas no ensaio de flexão da resina *Greenpoxy*

Amostra	Resistência a flexão (MPa)	Deformação máxima (%)
CP1	119.17	9.29%
CP2	100.60	4.74%
CP3	76.31	2.72%
CP4	67.21	2.32%
CP5	70.01	2.06%
CP6	123.30	7.66%
Média	92.77	4.80%
DP*	25.03	3.04%

Nota *: Desvio padrão.

Com base nos dados apresentados é possível observar que os valores encontrados para resistência à flexão variam, aproximadamente, entre 67 e 123 MPa, com média de 92.77 MPa, valores na mesma escala comparado ao que é informado na documentação técnica do fabricante [9], que informa valores entre 114 e 123 MPa. Além disso, os valores encontrados experimentalmente para a deformação máxima, que foi, em média, 4.8% também é condizente com o que é informado pelo fabricante, entre 4.5% e 5.5%, no entanto, o desvio padrão de 3% indica grande variação entre os resultados das amostras ensaiadas.

4.3. RESULTADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para cálculo de comprimento crítico de fibra utilizada para fabricação dos compósitos e os resultados e análises dos ensaios mecânicos realizados a partir dos corpos de prova fabricados. Não obstante, também é apresentado a análise feita a partir do método de Taguchi, utilizando a razão sinal-ruído e ANOVA.

Para padronizar a nomenclatura e sequenciamento dos corpos de prova produzidos, foi utilizado o padrão demonstrado na Figura 53.

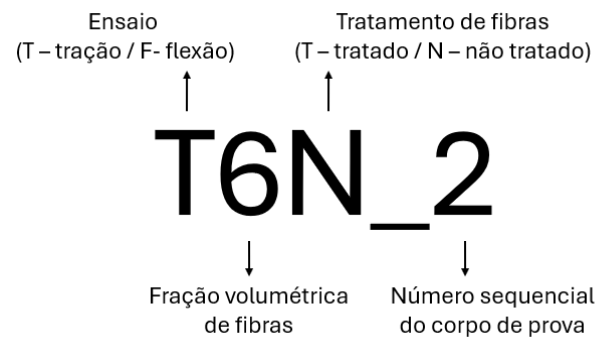


Figura 53 – Padrão de nomeação de corpos de prova.

4.3.1. CÁLCULO DE COMPRIMENTO CRÍTICO DE FIBRAS

Com base nos valores encontrados para as propriedades mecânicas nos ensaios de tração das fibras de coco e da resina *Greenpoxy*, foi possível determinar a partir da Equação 1 o comprimento crítico para as fibras como reforço no compósito. Os valores são demonstrados na Tabela 21.

Tabela 21 – Propriedades obtidas experimentalmente utilizadas para calcular o comprimento crítico.

d (mm)	σ_f (MPa)	τ_c (MPa)	S_{yr} (MPa)	L_c (mm)
0.27	1834.66	7.50	12.99	32.68

Onde:

L_c – comprimento crítico;

d – diâmetro médio da fibra;

σ_f – média do limite de resistência a tração da fibra;

τ_c - tensão de escoamento ao cisalhamento da resina;

S_{yr} - tensão de escoamento em tração da resina.

Com base no resultado apresentado, é possível concluir que o comprimento mínimo de fibra necessário para que o reforço seja eficiente no compósito é de cerca de 32 mm. Portanto, na fabricação do compósito as fibras foram cortadas em comprimentos superiores a este valor, na faixa de 30 a 50 mm.

Não obstante, vale ressaltar que o valor do comprimento crítico encontrado pode ser superior em comparação a outros estudos devido à discrepância encontrada entre os valores de resistência à tração da fibra obtidas experimentalmente e os valores de referência de outros estudos, como comentado na seção 4.1.2.

4.3.2. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Foram ensaiados 3 corpos de prova com resultados válidos para cada combinação de parâmetros e níveis descritos na Tabela 5 e Tabela 6 e, antes do ensaio, foram medidos a largura e a espessura de cada corpo de prova e então, com base nos dados reportados pelo ensaio de tração, foi possível calcular e gerar o gráfico de tensão x deformação observado na Figura 54, e o relatório com tensões e deformações máximas na Tabela 22.

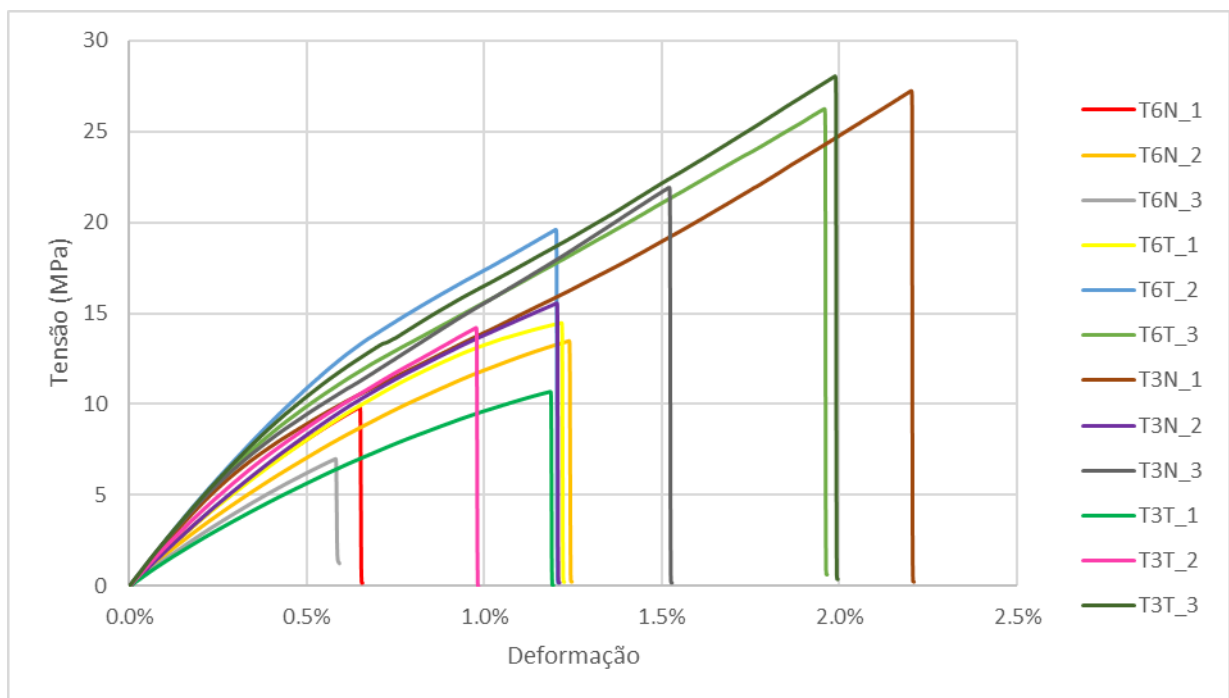


Figura 54 – Gráfico tensão x deformação para tração do compósito.

Tabela 22 – Resistência à tração e deformação máxima obtidas no ensaio de tração dos compósitos.

Amostra	Resistência à Tração (MPa)	Deformação máxima (%)
T6N_1	9.84	0.66%
T6N_2	13.48	1.25%
T6N_3	6.99	0.59%
Média	10.10	0.83%
DP*	3.25	0.36%
T6T_1	14.47	1.23%
T6T_2	19.61	1.21%
T6T_3	26.25	1.96%
Média	20.11	1.47%
DP*	5.91	0.43%
T3N_1	27.24	2.21%
T3N_2	15.56	1.21%
T3N_3	21.92	1.53%
Média	21.57	1.65%
DP*	5.85	0.51%
T3T_1	10.68	1.19%
T3T_2	14.20	0.98%
T3T_3	28.05	2.00%
Média	17.64	1.39%
DP*	9.18	0.53%

Nota *: Desvio padrão.

Com base nos dados apresentados é possível observar que os valores encontrados para resistência à tração variam, em média, entre, aproximadamente, 10 e 22 MPa, com máximo de 28.08 MPa, observado no terceiro corpo de prova do compósito formado por 3% de fração volumétrica de fibras tratadas. Todavia, é notável que para este lote houve o maior valor de desvio padrão, mostrando grande variação entre os resultados, o que pode ser justificado pela dificuldade de fabricar placas de compósitos com qualidade uniforme em toda a sua superfície, gerando corpos de prova com características distintas.

Os valores encontrados para deformação máxima variam em média entre 0.83% e 1.65%, onde todos os lotes demonstram proximidade entre os resultados exceto pelo lote de compósito formado por 6% de fração volumétrica de fibras não tratados, que apresentou em média o menor valor para esta propriedade.

4.3.3. RESULTADO E ANÁLISE DO ENSAIO DE FLEXÃO

Foram ensaiados 5 corpos de prova com resultados válidos para cada combinação de parâmetros e níveis descritos na Tabela 5 e Tabela 6 e, antes do ensaio, foram medidos a largura e a espessura de cada corpo de prova e, então, com base nos dados reportados pelo ensaio de flexão, foi possível calcular e gerar o gráfico de tensão x deformação observado na Figura 55, e o relatório com tensões e deformações máximas na Tabela 23.

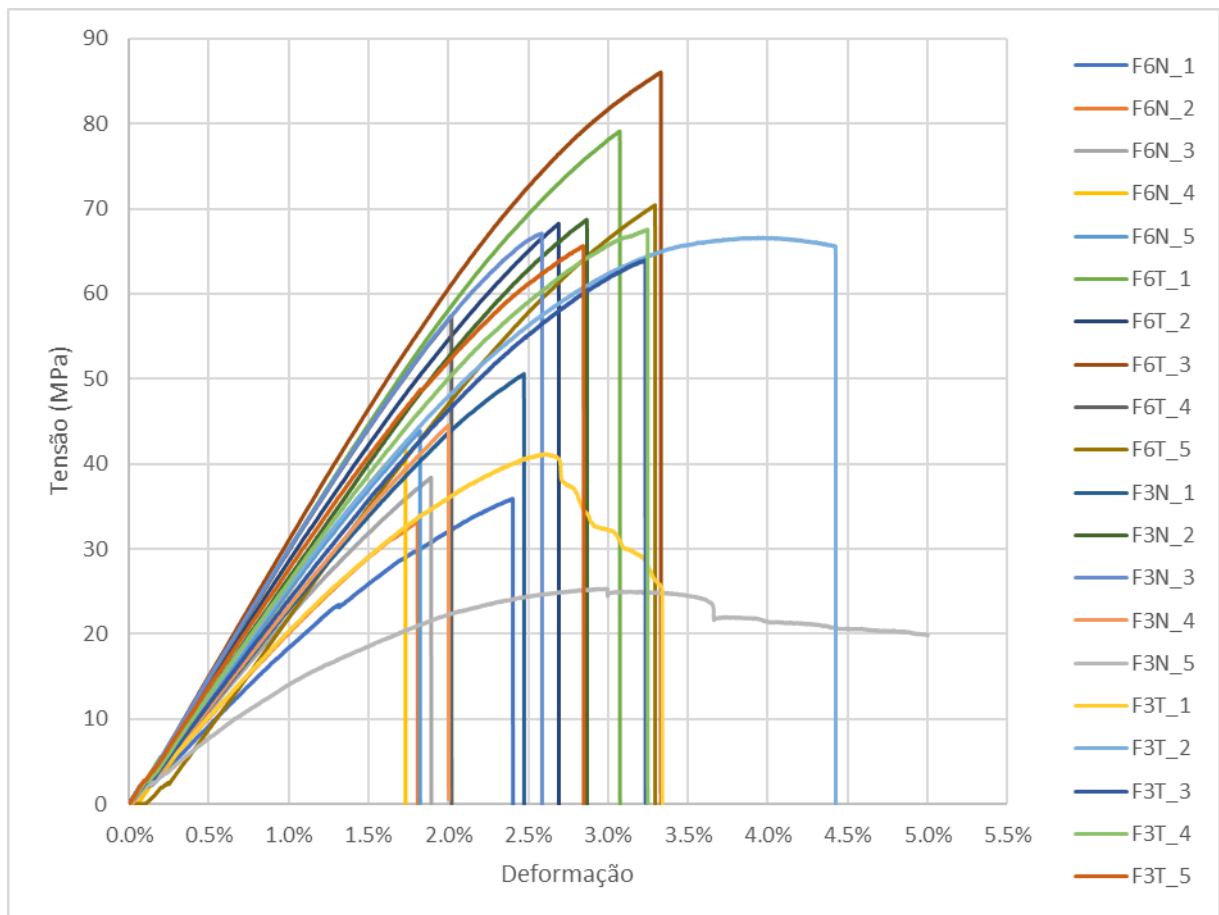


Figura 55 – Gráfico tensão x deformação para flexão do compósito.

Tabela 23 – Resistência à tração e deformação máxima obtidas no ensaio de flexão dos compósitos.

Amostra	Resistência a Flexão (MPa)	Deformação máxima (%)
F6N_1	35.92	2.40%
F6N_2	33.26	1.81%
F6N_3	38.41	1.89%
F6N_4	42.46	1.73%
F6N_5	43.89	1.82%
Média	38.79	1.93%
DP*	4.43	0.27%
F6T_1	79.13	3.07%
F6T_2	68.28	2.69%
F6T_3	86.08	3.33%
F6T_4	57.39	2.02%
F6T_5	70.45	3.30%
Média	72.27	2.88%
DP*	10.94	0.55%
F3N_1	50.59	2.47%
F3N_2	68.75	2.87%
F3N_3	67.12	2.59%
F3N_4	44.54	2.00%
F3N_5	25.33	5.00%
Média	51.27	2.99%
DP*	17.85	1.17%
F3T_1	41.16	3.34%
F3T_2	66.64	4.43%
F3T_3	63.97	3.23%
F3T_4	67.57	3.25%
F3T_5	65.65	2.85%
Média	61.00	3.42%
DP*	11.17	0.59%

Nota *: Desvio padrão.

Com base nos dados apresentados é possível observar que os valores encontrados para a resistência à flexão variam, em média, entre, aproximadamente, 38 e 72 MPa, com máximo de 86.08 MPa observado no terceiro corpo de prova do compósito formado por 6% de fração volumétrica de fibras tratadas, lote este que apresentou a melhor média entre os demais, apesar da grande variação de resultados observados pelo desvio padrão.

Os valores encontrados para deformação máxima variam, em média, entre 1.93% e 3.42%, apresentando melhores resultados no lote de compósito formado por 3% de fração volumétrica de fibras tratadas.

4.3.4. ANÁLISE DE DADOS UTILIZANDO O MÉTODO DE TAGUCHI

4.3.4.1. RAZÃO S/N

Em aplicações que exigem resistência de um material, é interessante que na análise da caracterização do material seja maximizado esta propriedade mecânica. Portanto, para o material estudado foi utilizado a razão sinal-ruído do tipo “maior melhor” formulado conforme Equação 7 para maximizar a resistência à tração e à flexão. Os resultados da razão S/N calculados com os dados dos ensaios de tração podem ser observados na Tabela 24 e para flexão na Tabela 25.

Tabela 24 – Valores de S/N para ensaio de tração.

Amostra	Ensaio (MPa)			S/N (dB)
	1	2	3	
3T	10.68	14.20	28.05	23.01
6T	14.47	19.61	26.25	25.31
3N	27.24	15.56	21.92	25.99
6N	9.84	13.48	6.99	19.17

Tabela 25 – Valores de S/N para ensaio de flexão.

Amostra	Ensaio (MPa)					S/N (dB)
	1	2	3	4	5	
3T	41.16	66.64	63.97	67.57	65.65	35.20
6T	79.13	68.28	86.08	57.39	70.45	36.93
3N	50.59	68.75	67.12	44.54	25.33	32.39
6N	35.92	33.26	38.41	42.46	43.89	31.64

É possível observar na Tabela 24 que para tração, a combinação com maior S/N foi a 3N, do compósito com 3% de fração volumétrica de fibras não tratadas. No entanto, pode-se observar que o S/N desta combinação está muito próximo ao S/N da combinação 6T, com diferença de apenas 0.68 dB. Além disso, é notável que os valores encontrados para a combinação

6N disparam muito dos resultados das demais combinações, demonstrando que esta placa de compósito fabricada possivelmente não possui um nível de qualidade adequado. Contudo, a limitação existente na fabricação sobre o número de corpos de prova produzidos pode ter justificado esta disparidade entre os dados.

Já pela Tabela 25, para o ensaio de flexão, observa-se que a combinação com maior valor de S/N foi a 6T, do compósito com 6% de fração volumétrica de fibras tratadas. Além disso, a segunda melhor combinação foi a 3T, indicando que as combinações de compósitos com fibras tratadas resultaram em melhoras na resistência à flexão do material.

Na Figura 56 pode-se observar os valores das médias de resistência a tração e flexão obtidas nos ensaios, assim como, o desvio padrão.

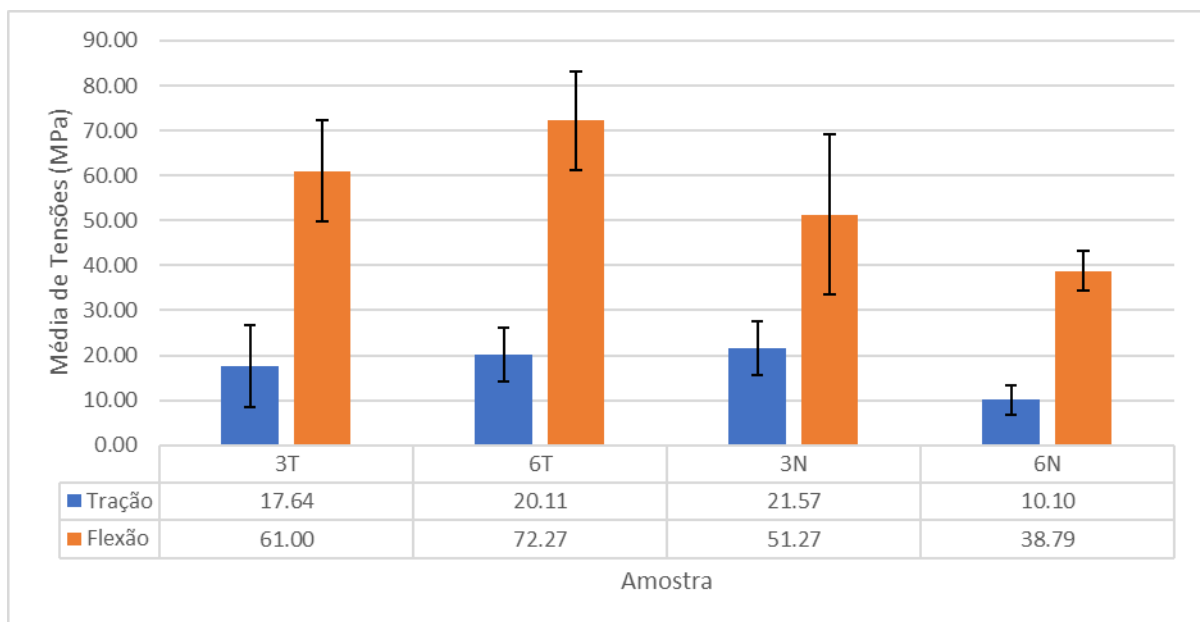


Figura 56 – Médias de resistência a tração e flexão com respectivo desvio padrão.

Por este gráfico e pelas tabelas de S/N, é possível notar que para as combinações com fibras não tratadas houve uma deterioração dos resultados com o aumento da fração volumétrica para ambos os tipos de ensaio. Já para as combinações com fibras tratadas, houve melhoria dos resultados com o aumento da fração volumétrica em ambos os ensaios. Portanto, isso indica que para um nível baixo de fração volumétrica, o tratamento das fibras não afeta, de forma significativa, as propriedades do material. Não obstante, para níveis maiores de fração volumétrica, o compósito composto por fibras não tratadas demonstra degradação em suas propriedades mecânicas comparadas ao compósito constituído por fibras tratadas.

Para analisar a combinação ideal em cada tipo de ensaio, pode-se analisar a média de S/N relacionados com os níveis de cada parâmetro analisados, gerando o gráfico da Figura 57 para tração e a Figura 58 para flexão.

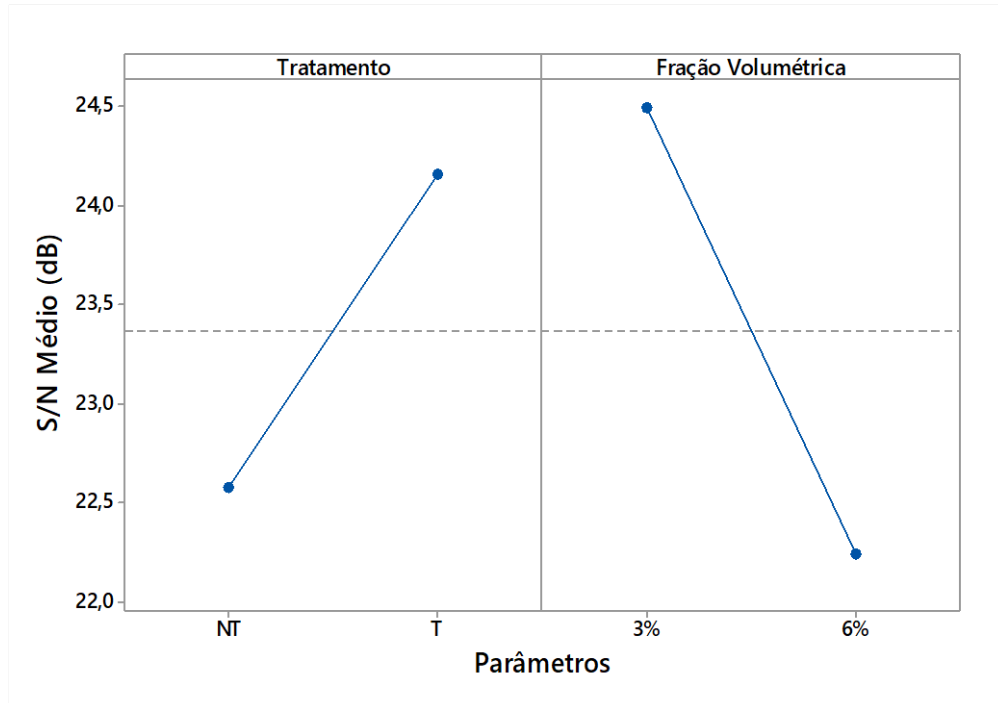


Figura 57 – Média de S/N para ensaio de tração.

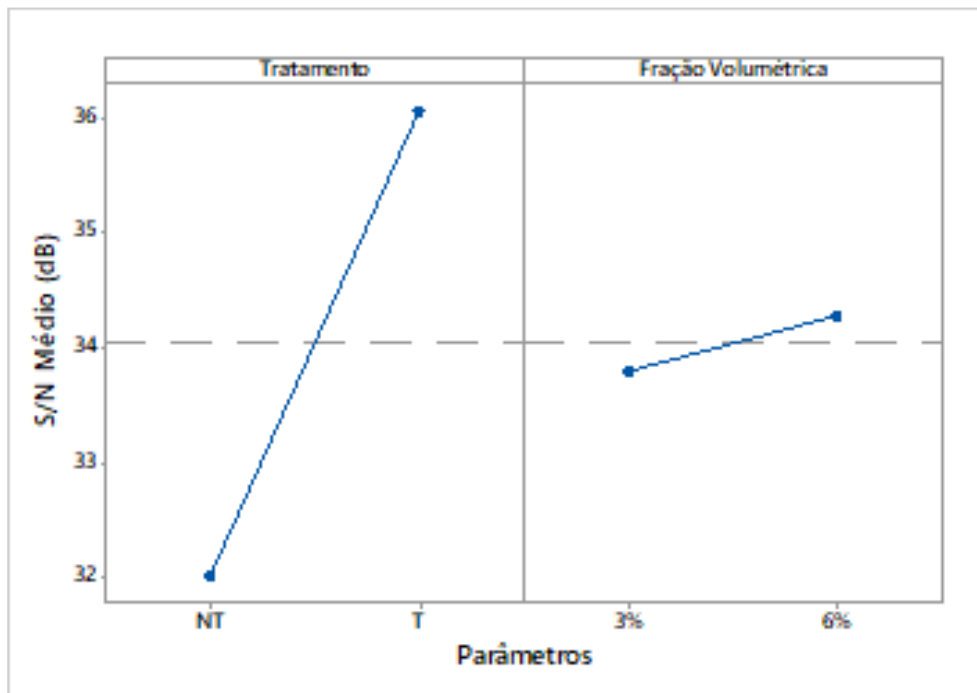


Figura 58 – Média de S/N para ensaio de flexão.

Para o ensaio de tração, a Figura 57 aponta a combinação ideal para o compósito formado por 3% de fração volumétrica de fibras tratadas. No entanto, observando a Tabela 24 é possível verificar que os resultados dos ensaios para a combinação 6N apresentam valores muito abaixo das demais combinações, o que, teoricamente, não seria o esperado mas que influencia negativamente a média de S/N das combinações com 6% de fração volumétrica representado na Figura 57, refletindo uma média muito baixa para os compósitos com 6% e indicando a melhor combinação com a fração volumétrica de 3%.

Já para o ensaio de flexão, a combinação ideal apontada pela Figura 58 é o compósito formado por 6% de fração volumétrica de fibras tratadas, o que condiz com o resultado esperado da análise teórica e condiz com a combinação de maior S/N mostrada na Tabela 25.

Portanto, a análise dos gráficos da Figura 57 e Figura 58 indicam que, para ambos os ensaios, uma combinação com fibras tratadas se mostra ideal, colaborando com os estudos que indicam a melhoria de aderência entre a fase reforço e matriz do compósito composto por fibras naturais e, conseqüentemente, ocasionando a melhoria de suas propriedades.

4.3.4.2. ANOVA

A análise de variância permite verificar a influência de cada parâmetro sobre a propriedade analisada, no caso, a resistência à tração e à flexão. Os dados de entrada utilizados estão na Tabela 24 e Tabela 25, de onde são utilizados os valores de S/N considerando as tensões máximas de cada ensaio.

A análise foi feita a partir do *software* estatístico Minitab 17 e os resultados encontrados são representados na Tabela 26 para ensaio de tração e na Tabela 27 para ensaio de flexão.

Tabela 26 – ANOVA para ensaio de tração.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor-F	Valor-P	% de influência
Tratamento	1	2.50	2.50	0.12	0.79	8.83%
Fração Volumétrica	1	5.09	5.09	0.25	0.71	17.94%
Erro	1	20.77	20.77			73.23%
Total	3	28.37				100.00%

Tabela 27 – ANOVA para ensaio de flexão.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor-F	Valor-P	% de influência
Tratamento	1	16.42	16.42	10.67	0.19	90.23%
Fração Volumétrica	1	0.24	0.24	0.16	0.76	1.32%
Erro	1	1.54	1.54			8.45%
Total	3	18.19				100.00%

Onde:

GL – Graus de liberdade;

SQ – Soma dos quadrados;

QM – Média dos quadrados (calculado pela divisão do "SQ" pelo "GL");

Valor-F e Valor P – Ferramentas estatísticas utilizadas para determinar quais parâmetros têm maior influência na característica de qualidade estudada.

Pela Tabela 26, para ANOVA do ensaio de tração, pode-se observar que o parâmetro de maior influência foi a fração volumétrica seguido do tratamento das fibras, sendo de, aproximadamente, 18% e 9%, respectivamente. É importante observar também que a influência do erro residual no resultado foi de, aproximadamente, 73%, este erro representa a variabilidade que permanece no modelo após a identificação de todos os efeitos principais [37].

Portanto, este erro aponta que grande parte dos resultados da análise de variância não são explicados no modelo devido à variabilidade presente nos resultados. Isso pode ser justificado ao verificar que houve grande disparidade entre os resultados encontrados para o ensaio de tração como pode ser observado na Tabela 24, principalmente, ao analisar os resultados encontrados para a combinação 6N, que possuem valores mais baixos em relação à média dos demais, como já foi analisado anteriormente.

Já pela Tabela 27, para ANOVA do ensaio de flexão, é possível notar que o tratamento nas fibras teve a maior influência sobre a resistência do material, representando cerca de 90% de influência. Nesta análise, o erro representa cerca de 8% de influência nos resultados e a fração volumétrica cerca de 1% de influência, indicando que a fração volumétrica nos níveis estudados não apresenta uma significativa influência para aumento de resistência sob flexão. No entanto, o tratamento nas fibras demonstrou ser de grande influência, apontando que, de fato, o tratamento melhorou a adesão das fibras com a matriz polimérica e, conseqüentemente, gerou uma melhoria nas propriedades mecânicas do material.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÃO

Este estudo teve por objetivo a fabricação de um material compósito sustentável e a análise de suas propriedades mecânicas sob tração e flexão. Além disso, avaliou-se a influência de tratamento químico superficial nas fibras sobre a adesão entre fibra e matriz e a influência da fração volumétrica de fibras sobre as propriedades finais.

A caracterização das fibras de coco apresentou valores divergentes da literatura, impactando o cálculo do comprimento crítico. Mesmo assim, esses valores já foram utilizados em outros estudos com diferentes matrizes poliméricas. Apesar de diversas condições de teste, os resultados foram consistentemente superiores aos observados em outros estudos. A falta de informações sobre a origem das fibras impediu a determinação de sua condição inicial. Além disso, as fibras de coco não tratadas mostraram maior tensão e deformação máxima em comparação com as tratadas, com valor médio de 1934.27 MPa e 30.46% para as fibras não tratadas e 1735.06 MPa e 21.93% para as fibras tratadas, indicando que o tratamento de mercerização reduziu ligeiramente suas propriedades mecânicas.

Durante a caracterização da resina *Greenpoxy*, foi encontrado grande dificuldade com o desmolde dos corpos de prova e no ciclo de cura. Foram necessários muitos testes para encontrar desmoldante, aplicação eficaz, ciclo de cura e proporção de resina/endurecedor adequados, além do uso de fitas para auxiliar na desmoldação. No entanto, os ensaios de tração e flexão foram satisfatórios e compatíveis com a documentação técnica, sendo usados para calcular o comprimento crítico das fibras no compósito.

Para a fabricação e caracterização do compósito, foram calculados o comprimento crítico e fração volumétrica utilizando os dados das etapas anteriores do estudo. Foram feitos testes para verificar quais frações volumétricas seriam adequadas ao estudo e para valores acima de 10% de fração volumétrica mostraram-se difíceis de manipular no molde e de impregnar

eficientemente com resina, resultando em placas de compósito com acabamento superficial deficiente e diversas falhas.

Os resultados dos ensaios de tração mostraram grande variação, especialmente na combinação 6N (6% de fração volumétrica de fibras não tratadas), que mostram valores muito abaixo dos demais, com média de 10.10 MPa de resistência à tração. Estes resultados mostram que a placa de compósito da combinação 6N possivelmente continha alguma falha ou concentrador de tensões como trincas internas ou outro defeito não visível. Portanto, uma maior quantidade de corpos de prova e a realização de maior número de ensaios poderiam ter garantido maior confiabilidade e resultados melhores, especialmente considerando a variabilidade das fibras naturais em termos de suas dimensões, composição e propriedades. No entanto, a limitação do método de fabricação, que permitia a produção de apenas uma placa de cada vez em um ciclo de três dias de cura, juntamente com o tempo e recursos limitados, impôs a necessidade de utilizar uma quantidade reduzida de corpos de prova.

Os ensaios de flexão para o compósito mostraram também grande variação entre os resultados, o que é esperado pela variabilidade das propriedades de fibras naturais. Apesar disso, o ensaio foi conclusivo para demonstrar a influência do tratamento das fibras e a fração volumétrica na resistência do material. Os resultados apontaram que os compósitos com fibras tratadas possuem maior resistência, com médias de 72.27 MPa e 61.00 MPa comparadas à 38.79 MPa e 51.27 MPa das combinações com fibras não tratadas e que entre esses casos, a combinação com maior fração volumétrica de fibras supera a combinação com 3%.

Pelo método de Taguchi, avaliando os valores encontrados para a razão S/N, foi possível concluir que em ambos os tipos de ensaio, o compósito formado por fibras tratadas se mostrou como apropriado. Todavia, quanto à fração volumétrica mais adequada, os resultados apontam 3% para tração e 6% para flexão.

Avaliando a média de resistência à tração e flexão obtidas em ambos os ensaios e as relacionando entre si, foi possível perceber que, para níveis baixos de fração volumétrica, o efeito do tratamento de mercerização não mostra efeitos significativos, com variações de aproximadamente 18% para tração e 19% para flexão entre as combinações com 3% de fração volumétrica, enquanto as combinações com 6% de fração volumétrica variam em aproximadamente 99% para tração e 86% para flexão em função do tratamento químico. Isso pode estar relacionado com o espaçamento maior que existe entre as fibras e sua disposição na matriz, ou

seja, mesmo que as fibras não tratadas possuam menor aderência com a matriz, sob baixos níveis de fração volumétrica, o espaçamento e disposição disponíveis não afeta a ligação da interface fibra/matriz a ponto de influenciar as propriedades mecânicas do material. Porém, para fração volumétrica de 6%, foi possível observar que os compósitos compostos por fibras não tratadas apresentaram pior desempenho em ambos os ensaios, concluindo então que para este nível de fração volumétrica, o tratamento das fibras resultou em uma melhoria nas suas propriedades mecânicas, sugerindo uma melhoria na adesão entre fibra e matriz ocasionado pelo tratamento de mercerização.

A análise de variância (ANOVA) mostrou que, para o ensaio de tração, o alto valor de erro presente na análise reflete a grande variabilidade presente nos resultados. Já para o ensaio de flexão, é possível concluir que o tratamento de mercerização nas fibras representa maior influência sobre a resistência do material comparado ao outro parâmetro estudado, na grandeza de cerca de 90%.

Em resumo, este estudo demonstrou que o tratamento de mercerização melhora significativamente a aderência entre as fibras e a matriz, especialmente em frações volumétricas mais altas, resultando em melhores propriedades mecânicas. Estes resultados são essenciais para o desenvolvimento de materiais compósitos sustentáveis reforçados por fibras naturais.

5.2. LINHAS DE INVESTIGAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a garantir melhorias no tema abordado e aumento de confiabilidade no presente estudo, sugerem-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Para determinação da densidade de fibras de coco, é recomendado a utilização do método de picnometria com hélio, que é um método com maior sensibilidade e mais compatível com a gama de densidades da fibra;
- Para a fabricação de corpos de prova de resina, recomenda-se um método de fabricação com maior facilidade para o desmolde, evitando utilizar as fitas, pois estas, ocasionalmente, se partem durante a desmoldação, podem se imiscuir na resina e geram superfície com acabamento rugoso;
- Sugere-se melhorias no método de fabricação do compósito: o macaco hidráulico utilizado para gerar pressão no molde não possui nenhuma sensibilidade e

não é possível verificar a grandeza de pressão aplicada. O correto seria que a pressão aplicada fosse constante, para isso, seria necessário um equipamento onde fosse possível controlar a pressão e a temperatura, pois, dessa forma, o processo de cura do material ocorreria de forma mais controlada. Recomenda-se a utilização de materiais mais resistentes no molde e na chapa superior, para que esta não sofra deformações com a pressão aplicada, gerando uma superfície mais uniforme e sem variações de espessura ao longo da placa fabricada;

- Devido à grande variação de dimensões, composição e propriedades das fibras naturais, é importante que haja uma amostragem maior de corpos de prova a serem ensaiados para que esta variabilidade seja diluída pela média de ensaios compostos pela amostragem, gerando resultados de maior confiabilidade;
- Por fim, é recomendado o estudo com mais níveis de fração volumétrica para verificar e avaliar de forma mais detalhada a influência desse parâmetro nas propriedades do compósito e sua relação com o tratamento das fibras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. D. Callister e D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8.^a ed. John Wiley and Sons, 2009.
- [2] I. Chaffin Nunes Rangel Gomes e T. da Costa Gonçalves, «Análise dos Esforços no Ensaio de Flexão do Material Compósito Inteligente Uniaxial Reforçado com Fibras de Vidro Contínuas e Fio de SMA em Matriz Epoxídica», Projeto Final de Bacharelado, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2018.
- [3] L. B. Neves, I. S. Afonso, G. Nobrega, L. G. Barbosa, R. A. Lima, e J. E. Ribeiro, «A Review of Methods to Modify the PDMS Surface Wettability and Their Applications», *Micromachines (Basel)*, vol. 15, n. 6, p. 670, Mai. 2024, doi: 10.3390/mi15060670.
- [4] M. D. Banea, «Disciplina de compósitos e adesivos», *CEFET/RJ*. 2021.
- [5] GreenPoxy by Sicomin, «Eco Profil», <https://greenpoxy.org/ecoprofil/>.
- [6] S. Luo e A. N. Netravali, «Mechanical and thermal properties of environment-friendly “green” composites made from pineapple leaf fibers and poly(hydroxybutyrate-co-valerate) resin», *Polym Compos*, vol. 20, n. 3, pp. 367–378, Jun. 1999, doi: 10.1002/pc.10363.
- [7] S. Luo e A. N. Netravali, «Interfacial and mechanical properties of environment-friendly “green” composites made from pineapple fibers and poly(hydroxybutyrate-co-valerate) resin», *J Mater Sci*, vol. 34, n. 15, pp. 3709–3719, 1999, doi: 10.1023/A:1004659507231.
- [8] D. Zindani, K. Kumar, e J. Paulo Davim, «Mechanical Behavior of Epoxy-Based Green Composites», 2019, pp. 81–90. doi: 10.1007/978-981-13-6019-0_6.
- [9] «Technical Datasheet SR Greenpoxy 56», *ED 1372.4*. Sicomin, 2015.
- [10] V. Goyat, G. Ghangas, S. Sirohi, A. Kumar, e J. Nain, «A review on mechanical properties of coir based composites», *Mater Today Proc*, vol. 62, pp. 1738–1745, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.252.

- [11] M. Dugvekar e S. Dixit, «Chemical Treatments for Modification of the Surface Morphology of Coir Fiber: A Review», *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, n. 15. Taylor and Francis Ltd., pp. 11940–11961, 2022. doi: 10.1080/15440478.2022.2048938.
- [12] E. Corradini, M. De Freitas Rosa, B. Pereira De Macedo, P. Danielle Paladin, e H. C. Mattoso, «Composição Química, Propriedades Mecânicas e Térmicas da Fibra de Frutos de Cultivares de Coco Verde», 2009.
- [13] G. G. Silva, D. A. De Souza, J. C. Machado, e D. J. Hourston, «Mechanical and Thermal Characterization of Native Brazilian Coir Fiber», *J Appl Polym Sci*, vol. 76, n. 7, pp. 1197–1206, Mai. 2000, doi: 10.1002/(SICI)1097-4628(20000516)76:7<1197::AID-APP23>3.0.CO;2-G.
- [14] K. Goda e Y. Cao, «Research and Development of Fully Green Composites Reinforced with Natural Fibers», *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, vol. 1, n. 9, pp. 1073–1084, 2007, doi: 10.1299/jmmp.1.1073.
- [15] W. G. Santos, L. H. H. Guerreiro, e G. A. Borges, «Influência do Tratamento Químico na Fibra de Coco para Utilização em Compósito Polimérico», Editora Edgard Blucher, Ltda., Set. 2018, pp. 4356–4359. doi: 10.5151/cobeq2018-co.072.
- [16] A. Panwar e S. Neelakrishnan, «An Experimental Study on the Effect of Mercerization Parameters on the Variation in the Chemical Composition and Mechanical Properties of Natural Fibers: Coir», *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, n. 15, pp. 10383–10393, 2022, doi: 10.1080/15440478.2021.1993505.
- [17] G. Ayres Adão, «Análise das Propriedades Mecânicas e Elétricas de Compósitos Reforçados por Fibras Naturais Dopados com Nanotubos de Carbono», Projeto Final de Bacharelado, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2022.
- [18] R. F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*. McGraw-Hill, 2016.
- [19] ASTM D3171, «Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials», *American Society for Testing and Materials*. 2022.
- [20] H. D. R. Gomes, «Estudo do comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de cânhamo», Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020.

- [21] M. Truong, W. Zhong, S. Boyko, e M. Alcock, «A comparative study on natural fibre density measurement», *Journal of the Textile Institute*, vol. 100, n. 6, pp. 525–529, Ago. 2009, doi: 10.1080/00405000801997595.
- [22] ASTM D1577, «Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers», *American Society for Testing and Materials*. 2007.
- [23] ASTM D2130, «Standard Test Method for Diameter of Wool and Other Animal Fibers by Microprojection», *American Society for Testing and Materials*. 2022.
- [24] ASTM D3800, «Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers», *American Society for Testing and Materials*. 1999.
- [25] ASTM D1505, «Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique», *American Society for Testing and Materials*. 2018.
- [26] T. J. Rude, L. H. Strait, e L. A. Ruhala, «Measurement of Fiber Density by Helium Pycnometry», *J Compos Mater*, vol. 34, n. 22, pp. 1948–1958, Nov. 2000, doi: 10.1106/NUYP-PARA-RA5R-7NUE.
- [27] ASTM D792, «Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement», *American Society for Testing and Materials*. 2020.
- [28] R. C. Hibbeler, *Resistência dos materiais*, 7.^a ed. Pearson Education, 2010.
- [29] ASTM D638, «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics», *American Society for Testing and Materials*. 2014.
- [30] ASTM C1557, «Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers», *American Society for Testing and Materials*. 2003.
- [31] S. A. de Souza, *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos*, 5.^a ed. 1982.
- [32] ISO 178, «Plastics - Determination of flexural properties», *International Organization for Standardization*, 2003.
- [33] ISO 14125, «Fibre-reinforced plastic composites — Determination of flexural properties», *International Organization for Standardization*. 1998.
- [34] ASTM D790, «Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials», *American Society for Testing and Materials*. 2017.

- [35] C. P. da S. Santos e J. R. R. Bichara, «Estudo Experimental das Propriedades Mecânicas para Compósito em Fibra de Carbono e Matriz Epóxi Pipefix (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer)», Projeto Final de Bacharelado, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2015.
- [36] A. S. Blanca, «Optimization of Milling Parameters to Improve the Surface Roughness Using the Taguchi Methodology», Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2015.
- [37] C. R. de Lacerda, «Otimização de Parâmetros de Soldadura Gmaw Utilizando o Método Taguchi com a Análise Relacional de Grey», Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2021.
- [38] P. J. Ross, *Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade*. Makron Books, 1991.
- [39] A. C. O. Lopes, «Otimização dos parâmetros de furação utilizando o método de Taguchi», Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2017.
- [40] J. Aguirar, J. Rocha, L. Queijo, e J. E. Ribeiro, «Coir and Hop Fibres: Tensile Characterization and Comparison Between Fibres from Distinct Climates», 2023, pp. 17–27. doi: 10.1007/978-3-031-18130-6_2.
- [41] F. P. Beer, E. R. Johnston Jr, J. T. Dewolf, e D. F. Mazurek, *Mecânica dos Materiais*, 5.^a ed. The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [42] C. Oliveira, «Caracterização de Peças Fabricadas com Impressão 3D e Análise da Resolução de Duas Impressoras», Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020.
- [43] K. M. M. Rao e K. M. Rao, «Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo», *Compos Struct*, vol. 77, n. 3, pp. 288–295, Fev. 2007, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.07.023.