



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE  
CAMPUS SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

MEIRE NORIKO HOSOKAWA

COMPÓSITOS DE ACRILONITRILA-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS) RECICLADO  
REFORÇADOS COM TECIDOS DE FIBRAS VEGETAIS E TECIDOS DE FIBRAS DE  
CARBONO RECICLADOS

Sorocaba  
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE  
CAMPUS SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

MEIRE NORIKO HOSOKAWA

COMPÓSITOS DE ACRILONITRILA-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS) RECICLADO  
REFORÇADOS COM TECIDOS DE FIBRAS VEGETAIS E TECIDOS DE FIBRAS DE  
CARBONO RECICLADOS

Defesa apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Ciência dos Materiais, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Doutor em Ciência dos  
Materiais.

Orientação: Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de  
Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Sorocaba

2024

Hosokawa, Meire Noriko

Compósitos de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) reciclado reforçados com tecidos de fibras vegetais e tecidos de fibras de carbono reciclados / Meire Noriko Hosokawa -- 2024.  
112f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Jane Maria Faulstich de Paiva

Banca Examinadora: Elisabete Frollini, Andréa Oliveira Nunes, Maria Lúcia Pereira Antunes Silva, Aparecido Junior de Menezes

Bibliografia

1. Acrilonitrila-butadieno-estireno. 2. Fibras de carbono.
3. Fibras de juta. I. Hosokawa, Meire Noriko. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade  
Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Meire Noriko Hosokawa, realizada em 18/10/2024.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva (UFSCar)

Profa. Dra. Elisabete Frollini (USP)

Profa. Dra. Andréa Oliveira Nunes (UFRN)

Profa. Dra. Maria Lúcia Pereira Antunes Silva (UNESP)

Prof. Dr. Aparecido Junior de Menezes (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais.

## ***AGRADECIMENTOS***

Com imensa felicidade, finalizo mais uma etapa da minha vida com a conclusão deste trabalho e gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma maneira, contribuíram durante esses anos de estudo e pesquisa. Ao longo dessa trajetória de doutorado, tive a oportunidade de conhecer pessoas incríveis que me ofereceram amizade, sabedoria e experiências de vida, tornando esse período ainda mais especial.

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e por me conceder saúde, força e determinação para vencer todos os desafios encontrados ao longo desta trajetória.

Agradeço à minha orientadora, Profa Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva, por ter aceito me orientar. Agradeço por sua disposição em compartilhar seus conhecimentos e por compreender meus limites, estando ao meu lado nos momentos mais desafiadores. Todo o aprendizado envolvido foi fundamental para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço a minha família por sempre estarem ao meu lado me dando todo apoio que necessito e por me incentivarem a buscar conhecimento.

Agradeço, também, ao meu marido Renato pelo suporte e compreensão durante minha ausência enquanto me dedicava à realização deste trabalho.

Agradeço ao meu amado filho Daniel, por ter me escolhido como mãe.

Agradeço aos meus colegas de laboratório.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e professores.

E agência de fomento: CAPES (88882.427093/2019-01)

## RESUMO

Ao longo dos anos, os crescentes avanços na tecnologia têm aumentado a preocupação em relação à quantidade e ao gerenciamento adequado de resíduos gerados em diferentes setores da indústria. Polímeros como o acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e as fibras de carbono são exemplos de materiais muito utilizados em diversos setores das indústrias de eletroeletrônicos, automotiva e aeronáutica. Esses materiais apresentam também a possibilidade de serem reciclados e reutilizados na fabricação de novos produtos promovendo a economia circular. As fibras vegetais como, por exemplo, as fibras de juta, pertencem à uma classe de materiais que vem sendo utilizada como alternativa para substituir as fibras sintéticas e podem ser combinadas com polímeros reciclados como o ABS. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver compósitos híbridos utilizando ABS reciclado como matriz e tecidos contendo fibras vegetais e tecidos de fibras de carbono reciclados como fase dispersa de reforço. Primeiramente, foi realizado um estudo das propriedades de tração de três tipos de tecidos bidirecionais de fibras vegetais: um tecido de fibras de juta (trama simples,  $365\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) (T1), um tecido de fibras de juta (trama dupla,  $445\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) (T2) e um tecido de fibras de juta e algodão (trama simples,  $360\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) (T3). Para obter os tecidos de fibras de carbono reciclados foram utilizados pré-impregnados contendo resina epóxi polimerizada, que foram submetidos à tratamentos térmicos em diferentes temperaturas ( $450^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  e  $600^{\circ}\text{C}$ ) para estabelecer a melhor condição para degradar a resina epóxi e recuperar tecidos com propriedades adequadas para serem utilizados. Os compósitos foram moldados pelo método de compressão a quente e foram avaliados por ensaios mecânicos (tração, flexão e impacto), termogravimetria, absorção de água, espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados demonstraram que os tecidos T2 e T3 apresentaram maiores valores de resistência à tração e, quando utilizados como reforço em compósitos promoveram acréscimos de cerca de 21% na resistência à tração, 78% no módulo de elasticidade e 19% na resistência à flexão em comparação com o ABS reciclado. Em relação aos tecidos de fibras de carbono a melhor condição para a sua recuperação foi o tratamento a  $500^{\circ}\text{C}$  por 2 horas, obtendo fibras livres de resina epóxi e sem degradações aparentes. Quando utilizadas como fase de reforço, os tecidos de fibras de carbono promoveram aumento de 13% na resistência à flexão e 20% na resistência à tração dos compósitos em relação ao ABS reciclado. A hibridização promoveu aumento de até 16% na resistência à flexão, 6% na resistência à tração e 43% na resistência ao impacto dos compósitos híbridos em comparação com o ABS reciclado. Portanto, a reutilização deste tipo de pré-impregnado contendo fibras de carbono, proveniente de resíduos industriais, é uma alternativa viável para recuperar materiais de alto valor agregado e reinseri-los na cadeia produtiva, desenvolvendo produtos mais sustentáveis.

**Palavras-chave:** ABS reciclado, Fibras de carbono recicladas, Fibras de juta, Reciclagem, Propriedades.

## ABSTRACT

Over the years, increasing technological advances have raised concerns about the quantity and proper management of waste generated in different industry sectors. Polymers such as acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) and carbon fibers are materials widely used in various electronics, automotive, and aeronautics sectors. These materials can also be recycled and reused in the manufacture of new products, promoting the circular economy. Natural fibers, such as jute fibers, belong to a class of materials used as an alternative to replace synthetic fibers and can be combined with recycled polymers such as ABS. In this context, this work aimed to develop hybrid composites using recycled ABS as the matrix and fabrics containing plant fibers and recycled carbon fiber fabrics as the dispersed reinforcing phase. Firstly, a study was carried out on the tensile properties of three types of bidirectional natural fiber fabrics: a jute fiber fabric (single weave, 365 g.cm<sup>-2</sup>) (T1), a jute fiber fabric (double weave, 445 g.cm<sup>-2</sup>) (T2) and a jute and cotton fiber fabric (single weave, 360 g.cm<sup>-2</sup>) (T3). To obtain the recycled carbon fiber fabrics, preregs containing polymerized epoxy resin were used, which were subjected to heat treatments at different temperatures (450°C, 500°C and 600°C) to establish the best condition to degrade the epoxy resin and recover fabrics with properties suitable for use. The composites were molded using the hot compression method. They were evaluated by mechanical tests (tensile, flexural, and impact), thermogravimetry, water absorption, Fourier transform infrared absorption spectroscopy and scanning electron microscopy. The results showed that T2 and T3 fabrics presented higher tensile strength values and when used as reinforcement in composites, promoted an increase of 21% in tensile strength, 78% in modulus of elasticity, and 19% in flexural strength compared to recycled ABS. Regarding carbon fiber fabrics, the best condition for their recovery was treatment at 500°C for 2 hours, obtaining fibers free of epoxy resin and without apparent degradation. When used as a reinforcement phase, carbon fiber fabrics promoted an increase of 13% in flexural strength and 20% in tensile strength of the composites compared to recycled ABS. Hybridization promoted an increase of up to 16% in flexural strength, 6% in tensile strength, and 43% in impact strength of hybrid composites compared to recycled ABS. Therefore, reusing this type of prepreg containing carbon fibers from industrial waste is a viable alternative to recover high-value materials and reinsert them into the production chain, developing more sustainable products.

Keywords: Recycled ABS, Recycled carbon fibers, Jute fibers, Recycling, Properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de classificação dos compósitos de acordo com o tipo de fase dispersa-----	7
Figura 2 - Esquema da arquitetura de alguns tipos de tecidos têxteis: a) plano; (b) sarja; (c) cetim. (I) vista superior do tecido; (II) seção transversal das fibras na direção do urdume -----	8
Figura 3 - Representação esquemática da estrutura de uma célula vegetal -----	9
Figura 4 - Estrutura química da celulose-----	10
Figura 5 - Representação esquemática das unidades estruturais da lignina-----	10
Figura 6 - Estrutura típica das hemiceluloses -----	11
Figura 7 - (a) planta de juta; (b) juta crua; (c) fibras de juta unidirecional; (d) tecido de fibras de juta	12
Figura 8 - Fotografia dos tecidos de fibras de juta. (a) T1; (b) T2; (c) T3 -----	15
Figura 9 - Fotografia do cordão de fibras de juta preso na garra do equipamento de ensaio de tração-	16
Figura 10 - Fotografias: (a) de um corpo de prova do tecido T1; (b) corpo de prova no equipamento para a realização do ensaio de tração -----	17
Figura 11 - Espectros de infravermelho das fibras de juta do tecido T1, T 2 e T3 e fibras de algodão do tecido T3 -----	18
Figura 12 - Curvas Tensão versus Deformação do ensaio de tração realizado nos cordões de fibras de juta do tecido: (a) T1; (b) T2; (c) T3. As diferentes cores nas curvas representam o número de cordões testados -----	20
Figura 13 - Curvas tensão versus deformação do ensaio de tração do tecido: (a) T1; (b) T2; (c) T3. As diferentes cores nas curvas representam o número de cordões testados -----	22
Figura 14 - Fotografias do: (a) tecido antes do ensaio de tração, e (b) após o ensaio de tração -----	23
Figura 15 - Estrutura química do terpolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) -----	29
Figura 16 - Terpolímero de ABS reciclado-----	32
Figura 17 - Fotografias dos tecidos utilizados: (a) T1, (b) T2 e (c) T3-----	32
Figura 18 - Fotografias dos moldes metálicos para a moldagem de placas para confecção de corpos de prova de: (a) tração; (b) flexão -----	33
Figura 19 - Esquema de preparação dos compósitos de rABS reforçado com: (a) T1; (b) T2; (c) T3 -	33
Figura 20 - Estrutura química dos monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno -----	34
Figura 21 - Fotografias dos corpos de prova do rABS e compósitos confeccionados para o ensaio de absorção de água-----	35
Figura 22 - Fotografias de corpos de prova: (a) imersos em água destilada; (b) exemplo de amostras retiradas após imersão-----	35
Figura 23 - Fotografias dos: (a) corpos de prova; (b) corpo de prova no equipamento para ensaio de tração -----	36
Figura 24 - Fotografias dos: (a) corpos de prova; (b) corpo de prova no dispositivo de ensaio de flexão -----	37
Figura 25 - Fotografias de (a) corpos de prova após entalhe; (b) corpo de prova no dispositivo de ensaio de impacto na configuração Izod -----	37
Figura 26 - Espectro FTIR de pellets de ABS reciclado (rABS). -----	38
Figura 27 - Curvas TG e DTG do rABS (pellets)-----	40
Figura 28 - Absorção de água (%) em função do tempo (dias) do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2 e rABS/1T3-----	41
Figura 29 - Gráficos de: (a) resistência à tração (b) deformação máxima; (c) módulo de elasticidade do rABS e dos compósitos rABS/T1, rABS/T2 e rABS/T3 -----	43
Figura 30 - Fotografia dos corpos de prova após o ensaio de tração. (a) rABS; (b) rABS/T1; (c) rABS/T2; (d) rABS/T3-----	45

Figura 31 - Gráficos dos resultados de flexão do rABS e dos compósitos -----	46
Figura 32 - Fotografias dos corpos de prova após o ensaio de flexão -----	48
Figura 33 - Gráfico da (a) absorção de energia (%); (b) resistencia ao impacto (J/m) do rABS, rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3-----	49
Figura 34 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do rABS Aumento de 400x -----	50
Figura 35 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do rABS/1T1. Aumento de 400x-----	51
Figura 36 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do rABS/1T2. Aumento de 400x-----	51
Figura 37 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração dos compósitos rABS/1T3. Aumento de 400x -----	51
Figura 38 - Esquema resumido do processo de fabricação das fibras de carbono utilizando a PAN como precursor. -----	56
Figura 39 - Pré-impregnado de resina epóxi curada reforçado com tecido de fibras de carbono -----	61
Figura 40 - Fotografia de uma amostra de pré-impregnado antes do tratamento térmico -----	61
Figura 41 - Esquema de preparação dos compósitos de rABS contendo uma e duas camadas de tecidos de fibras de carbono reciclado -----	63
Figura 42 - Fotografia dos corpos de prova para o ensaio de flexão-----	64
Figura 43 – Fotografia dos corpos de prova para o ensaio de tração -----	65
Figura 44 - Curvas TG e DTG do NT sob atmosfera de nitrogênio, razão de aquecimento de 10°C.min- 1 e fluxo de 50 mL.min-1 -----	66
Figura 45 - Curvas (a) TG; (b) DTG de FC-450, FC-500 e FC-600 em atmosfera de ar sintético, razão de aquecimento de 10°C.min-1 e fluxo de 50 mL.min-1 -----	67
Figura 46 – (a) Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliação de 800x e (b) espectro de EDS de amostras sem tratamento (NT). -----	69
Figura 47 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): (a) ampliação de 800x, (b) região onde foi feita a análise e (c) resultados da análise em EDS do tecido de fibras de carbono submetido ao tratamento térmico a 450°C (FC-450)-----	70
Figura 48 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): (a) ampliação de 800x, (b) região onde foi feita a análise e (c) resultados da análise em EDS do tecido de fibras de carbono submetido ao tratamento térmico a 500°C (FC-500)-----	71
Figura 49 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): (a) ampliação de 800x, (b) região onde foi feita a análise de EDS e (c) resultados da análise em EDS do tecido de fibras de carbono submetido ao tratamento térmico a 600°C (FC-600) -----	72
Figura 50 - Fotografia dos tecidos de fibras de carbono obtidas após o tratamento térmico para a remoção da resina epóxi nos pré-impregnados. Da esquerda para a direita: FC-450, FC-500 e FC-600 -----	74
Figura 51 - Fotografias dos 10 corpos de prova do: (a) compósito contendo uma camada do tecido rFC (rABS/1rFC); (b) compósitos contendo duas camadas do tecido rFC (rABS/2rFC) após o ensaio de flexão -----	75
Figura 52 - Fotografia dos corpos de prova de compósitos contendo uma camada do tecido rFC após o ensaio de tração -----	76
Figura 53 - Número de publicações sobre compósitos híbridos reforçados com fibras vegetais na última década (dados anuais) -----	80
Figura 54 - Esquema de três configurações para o desenvolvimento de compósitos híbridos: (a) intercamada ou interply, (b) intracamada ou intraply; (c) intrafio ou intrayarn-----	81
Figura 55 - Esquema de preparação dos compósitos híbridos de rABS com tecido de fibras de carbono reciclado e tecidos de fibras vegetais -----	84

Figura 56 - Fotografia dos corpos de prova dos compósitos híbridos rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3: (a) antes do ensaio de absorção de água; (b) durante o ensaio, imersos em água destilada, segundo a norma ASTM D570-----	85
Figura 57 - Fotografia dos corpos de prova para ensaio de flexão dos compósitos híbridos: (a) rABS/1rFC/1T1; (b) rABS/1rFC/1T2; (c) rABS/1rFC/1T3, seguindo a norma ASTM D790-----	86
Figura 58 - Fotografia dos corpos de prova para ensaio de tração dos compósitos híbridos: (a) rABS/1rFC/1T1; (b) rABS/1rFC/1T2; (c) rABS/1rFC/1T3, seguindo a norma ASTM D3039 -----	86
Figura 59 - Fotografia dos corpos de prova para ensaio de impacto dos compósitos híbridos: (a) rABS/1rFC/1T1; (b) rABS/1rFC/1T2; (c) rABS/1rFC/1T3, seguindo a norma ASTM D256-----	87
Figura 60 - Absorção de água (%) em função do tempo (dias) do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, e dos compósitos híbridos (rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3) -----	88
Figura 61 - Gráfico da resistência a flexão do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3 -----	90
Figura 62 - Gráfico da deformação em flexão do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3 -----	91
Figura 63 - Gráfico do módulo de elasticidade em flexão do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3 -----	91
Figura 64 - Gráfico da resistência a tração do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3 -----	93
Figura 65 - Gráfico da deformação em tração do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3 -----	94
Figura 66 - Gráfico do módulo de elasticidade em tração do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3 -----	94
Figura 67 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração rABS/1rFC. Aumento de 400x-----	97
Figura 68 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração rABS/2rFC. Aumento de 80x.-----	97
Figura 69 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do compósito híbrido rABS/1rFC/1T1. Aumento de 100x-----	98
Figura 70 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do compósito híbrido rABS/1rFC/1T2. Aumento de 100x.-----	98
Figura 71 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do compósito híbrido rABS/1rFC/1T3. Aumento de 120x-----	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição e propriedades das algumas fibras vegetais utilizadas como em compósitos poliméricos.....	11
Tabela 2 - Tipos de tecidos utilizados e suas especificações .....	14
Tabela 3 - Bandas presentes no espectro das fibras de juta retiradas do tecido T1, T2 e T3 e fibras de algodão retirada do tecido T3 e suas respectivas atribuições .....	18
Tabela 4 - Resultados dos valores médios obtidos dos ensaios de tração realizado nos cordões de juta .....	21
Tabela 5 - Valores médios, desvios padrão e teste de Tukey dos resultados do ensaio de tração realizados nos diferentes tipos de tecidos de fibras de juta .....	23
Tabela 6 - Bandas presentes no espectro do ABS reciclado e suas respectivas atribuições.....	39
Tabela 7 - Valores dos resultados das curvas da análise de TG e DTG do ABS reciclado.....	40
Tabela 8 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de tração do rABS e dos compósitos rABS/T1, rABS/T2 e rABS/T3 .....	43
Tabela 9 - Resultados médios e desvio padrão dos ensaios de flexão da matriz rABS e dos compósitos rABS/T1, rABS/T2 e rABS/T3 .....	46
Tabela 10 - Resultados dos valores médios dos ensaios de impacto e desvio padrão do rABS, rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3.....	49
Tabela 11 - Classificação e tipos de fibras de carbono .....	57
Tabela 12 - Condições experimentais aplicadas para a decomposição da resina epóxi .....	62
Tabela 13 - Estágios de decomposição de curvas TGA/DTG dos NT analisados sob atmosfera de nitrogênio .....	66
Tabela 14 - Estágios de decomposição das curvas TG e DTG dos tecidos FC-450, FC-500 e FC-600 analisados sob atmosfera de ar sintético, razão de aquecimento de 10°C.min-1 e fluxo de 50 mL.min-1.....	68
Tabela 15 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de flexão do rABS e dos compósitos rABS/1rFC e rABS/2rFC .....	75
Tabela 16 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de tração do rABS e dos compósitos rABS/1rFC e rABS/2rFC .....	76
Tabela 17 - Códigos utilizados para os compósitos fabricados e suas quantidades de tecidos.....	84
Tabela 18 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de flexão do rABS dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3.....	90
Tabela 19 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de tração do rABS dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3.....	93
Tabela 20 - Resultados dos valores médios dos ensaios de impacto e desvio padrão do rABS, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/T1, rABS/1rFC/T2 e rABS/1rFC/T3 .....	95

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Justificativa.....	2
1.2. Objetivos .....	4
1.2.1. Objetivo Geral .....	4
1.2.2. Objetivos Específicos .....	4
CAPÍTULO 2 – FIBRAS VEGETAIS PARA MOLDAGEM DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS .....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Revisão bibliográfica.....	6
2.2.1 Compósitos.....	6
2.2.2 Composição, propriedades e aplicações das fibras lignocelulósicas.....	8
2.2.3 Fibras de juta .....	12
2.2.4 Fibras de algodão.....	13
2.3 Parte experimental.....	14
2.3.1 Cordões e tecidos de fibras de juta.....	14
2.3.2 Espectroscopia de absorção com transformada de Fourier (FTIR).....	15
2.3.3 Ensaio de tração de cordões de fibras de juta.....	15
2.3.4 Ensaio de tração dos tecidos de fibras de juta .....	17
2.4 Resultados e discussão .....	18
2.4.1 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....	18
2.4.2 Ensaio de tração nos cordões de fibras de juta.....	19
2.4.3 Ensaio de tração nos tecidos de fibras de juta.....	21
2.5 Conclusão Parcial.....	24
CAPÍTULO 3 – COMPÓSITOS DE ACRILONITRILA-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS) RECICLADO COM FIBRAS VEGETAIS.....	25
3.1. Introdução.....	25
3.2. Revisão bibliográfica.....	26
3.2.1. Resíduos de Equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) .....	26
3.2.2. Composição e propriedades do ABS.....	28
3.2.3. Reciclagem do ABS .....	29
3.2.4. Compósitos de ABS reciclado.....	30
3.3. Parte experimental.....	31
3.3.1. Materiais.....	31
3.3.2. Moldagem do rABS e dos compósitos.....	32
3.3.3. Espectroscopia de Absorção na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	34
3.3.4. Termogravimetria (TG).....	34
3.3.5. Ensaio de absorção de água.....	34
3.3.6. Ensaio mecânicos.....	36
3.4. Resultados e discussão .....	38
3.4.1. Espectroscopia do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	38
3.4.2. Termogravimetria (TG).....	39
3.4.3. Ensaio de absorção de água.....	41
3.4.4. Ensaio mecânicos.....	42

3.4.5.	Microscopia eletrônica de varredura - MEV .....	50
3.5.	Conclusão Parcial .....	53
CAPÍTULO 4 – RECUPERAÇÃO DE TECIDOS DE FIBRAS DE CARBONO E DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE ABS RECICLADO REFORÇADO COM TECIDO DE FIBRAS DE CARBONO RECICLADAS .....		54
4.1.	Introdução.....	54
4.2.	Revisão bibliográfica.....	55
4.2.1.	Fibras de carbono .....	55
4.2.2.	Reciclagem de fibras de carbono.....	58
4.3.	Parte experimental .....	60
4.3.1.	Materiais .....	60
4.3.2.	Decomposição da resina epóxi .....	61
4.3.3.	Termogravimetria (TG).....	62
4.3.4.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e energia dispersiva de espectroscopia de raio-X (EDS).....	62
4.3.5.	Moldagem de compósitos.....	62
4.3.6.	Ensaio mecânicos.....	64
4.4.	Resultados e discussão .....	65
4.4.1.	Termogravimetria (TG).....	65
4.4.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	68
4.4.3.	Propriedades mecânicas .....	74
4.5.	Conclusão Parcial .....	78
CAPÍTULO 5 – COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE ACRILONITRILA-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS) RECICLADO COM FIBRAS VEGETAIS E FIBRAS DE CARBONO RECICLADAS .....		79
5.1.	Introdução.....	79
5.2.	Revisão bibliográfica.....	80
5.3.	Parte experimental .....	83
5.3.1.	Materiais .....	83
5.3.2.	Moldagem dos compósitos híbridos.....	83
5.3.3.	Ensaio de absorção de água.....	85
5.3.4.	Ensaio mecânicos.....	86
5.3.5.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	87
5.4.	Resultados e discussão .....	88
5.4.1	Absorção de água .....	88
5.4.2	Ensaio mecânicos.....	90
5.4.3	Microscopia eletrônica de varredura - MEV .....	96
CONCLUSÕES FINAIS .....		99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		101

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

Ao longo dos anos, a inovação e o avanço tecnológico foram fatores que incentivaram a evolução dos diferentes setores produtivos e possibilitaram o crescimento e desenvolvimento econômico de diferentes nações. Por outro lado, a gestão ambiental tem se tornado cada vez mais importante de modo que os impactos ambientais causados por essa evolução tecnológica sejam minimizados.

Alguns dos setores que têm recebido destaque por conta dos avanços tecnológicos são os de equipamentos eletroeletrônicos e indústria aeronáutica; e isso acarreta na maior produção de resíduos provenientes destes setores, nos quais se descartam materiais como o terpolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e as fibras de carbono, com propriedades específicas e que poderiam ser reaproveitadas. Portanto, a recuperação de materiais como esses, de alto valor agregado, através de processo de reciclagem e a utilização deles para o desenvolvimento de compósitos, por exemplo, seria uma alternativa interessante para reintroduzi-los na cadeia produtiva promovendo a economia circular. Assim, pesquisas que visam propor uma alternativa para essa problemática decorrente dos resíduos industriais e produtos em fim de vida (pós consumo) são importantes para proteger o meio ambiente e garantir recursos para as próximas gerações.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver compósitos híbridos utilizando o ABS reciclado como matriz polimérica, tecidos de fibras de carbono reciclados e fibras de origem vegetal como fase dispersa de reforço.

O Capítulo 2 aborda o estudo das propriedades de tração de três tipos diferentes de tecidos de fibras vegetais, que são utilizadas tradicionalmente em aplicações menos nobres como em artesanatos e sacarias, visando uma aplicação mais nobre como fase de reforço em compósitos poliméricos.

No Capítulo 3 estão abordados os desenvolvimentos dos compósitos utilizando como matriz um polímero reciclado, proveniente de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos e, como fase dispersa, foram utilizados os tecidos de fibras de juta e algodão. Neste capítulo, além da moldagem dos compósitos, foram realizados nos materiais: espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), termogravimetria, ensaio de absorção de água, e ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

No Capítulo 4 foi analisada a possibilidade de recuperar fibras de carbono provenientes de resíduos industriais através do tratamento térmico, e transformá-las em matéria-prima para ser aplicada como fase de reforço em compósitos poliméricos, utilizando como matriz polimérica o ABS reciclado, avaliado no capítulo 3. Neste capítulo, então, após definir a melhor condição para obter tecidos de fibras de carbono reciclado foi realizada a moldagem de compósitos de ABS reciclado reforçado com uma e duas camadas de tecidos de fibras de carbono reciclado. Posteriormente, foram realizadas: a termogravimetria, a microscopia eletrônica de varredura e a avaliação das propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto dos materiais.

No Capítulo 5 está apresentado o desenvolvimento de compósitos híbridos utilizando o ABS reciclado como matriz polimérica e, como fase dispersa, os tecidos de fibras vegetais de juta e algodão e os tecidos de fibras de carbono reciclados. Após a moldagem dos materiais foram realizadas a análise absorção de água, os ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto e a microscopia eletrônica de varredura.

### **1.1. Justificativa**

A realização do presente trabalho é de relevância para os desenvolvimentos científicos, tecnológicos, econômicos e principalmente para o benefício do meio ambiente e, conseqüentemente, para toda a sociedade. A necessidade de estudos mais aprofundados sobre a utilização de fibras de origem vegetal, bem como a reutilização de resíduos industriais, tanto como matrizes quanto como reforço estrutural, em compósitos poliméricos justifica a inserção deste trabalho nos meios científico e tecnológico.

Do ponto de vista ambiental, o aproveitamento de um tipo de fibra 100% natural e abundante no Brasil, como a juta, o reaproveitamento de resíduos industriais como as fibras de carbono recicladas e o terpolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) justifica o desenvolvimento de material denominado “ambientalmente amigável”. A busca por materiais renováveis tem aumentado a cada dia e está relacionada a limitação dos recursos naturais e aos esforços para diminuir a quantidade de CO<sub>2</sub> lançada no meio ambiente. Assim, a reciclagem e a utilização de matéria-prima de origem renovável apontam como uma das alternativas para a produção de materiais ambientalmente

corretos, evitando o acúmulo de materiais que não são biodegradáveis, e que tendem a aumentar com o crescimento populacional ao longo dos anos.

Considerando o ponto de vista econômico, com a realização deste trabalho incentiva-se a recuperação de uma matéria-prima de alto valor agregado, no caso das fibras de carbono e do ABS proveniente de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos. Além disso, a utilização de fibras vegetais como as fibras de juta estimula a economia das regiões que sobrevivem deste tipo de cultivo. Assim, a utilização destas matérias-primas, contribui para o desenvolvimento de materiais de menor custo e, ainda, com características e propriedades de acordo com as necessidades de utilização.

Em relação ao ponto de vista científico, promove-se o desenvolvimento de compósitos moldados contendo propriedades adequadas, além do aproveitamento de materiais de alto valor agregado e que seriam descartados no meio ambiente, muitas vezes de forma incorreta.

A adoção de materiais mais sustentáveis e de tecnologias mais limpas através da prática de redução, reciclagem e reuso, contribui para atingir alguns dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), plano aprovado pela Assembleia Geral da ONU em 2015, visando resolver os problemas econômicos, sociais e ambientais (DÍAZ-LÓPEZ et al., 2021). Assim, o presente estudo contribui direta ou indiretamente para os seguintes objetivos: boa saúde e bem estar (ODS 3), energia limpa e acessível (ODS 7), trabalho decente e crescimento econômico (ODS 8), indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9), cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11), consumo e produção responsáveis (ODS 12) e parcerias para atingir os objetivos (ODS 17).

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho foi utilizar resíduos provenientes de equipamentos elétricos e eletrônicos pós-consumo (como o terpolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno), resíduo industrial proveniente da indústria aeronáutica (pré-impregnado contendo fibras de carbono) e tecidos de fibras vegetais (juta e algodão) para desenvolver compósitos e avaliar as propriedades mecânicas e térmicas para que sejam viáveis para a fabricação de novos produtos.

### 1.2.2. *Objetivos Específicos*

- Caracterizar e analisar as propriedades mecânicas (tração, flexão e impacto) dos materiais individuais e dos compósitos desenvolvidos, visando verificar as melhores proporções e condições de moldagem para obter compósitos com propriedades adequadas;
- Caracterizar as propriedades térmicas dos materiais individuais e dos compósitos para analisar os respectivos comportamentos térmicos;
- Avaliar a absorção de água e realizar a espectroscopia na região do infravermelho - FTIR dos materiais;
- Analisar as características morfológicas dos materiais através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## **CAPÍTULO 2 – FIBRAS VEGETAIS PARA MOLDAGEM DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

### **2.1. Introdução**

O desenvolvimento de produtos utilizando materiais sustentáveis tem proporcionado benefícios para o meio ambiente, indústria e consumidores, já que, ao longo dos anos, tem aumentado a preocupação em relação ao uso e esgotamento de recursos naturais. Assim, é crescente o interesse em substituir as fibras sintéticas convencionais (como, por exemplo, as fibras de vidro, carbono e aramida) por fibras de origem vegetal como fase dispersa em compósitos (VIGNESHWARAN *et al.*, 2020).

O interesse na utilização das fibras vegetais em compósitos poliméricos se deve, principalmente, à baixa densidade deste tipo de fibra, possibilitando a obtenção de compósitos mais leves com a adição de mais camadas de suporte; menor abrasividade; não toxicidade; e a biodegradabilidade dessas fibras. Geralmente, as fibras naturais apresentam menor custo quando comparadas à algumas fibras sintéticas, além de serem facilmente obtidas e possibilitarem um menor consumo de energia em sua produção (PRASAD *et al.*, 2024). Dessa forma, compósitos reforçados com fibras vegetais têm sido empregados na fabricação de peças e produtos em diversos setores como, por exemplo, na indústria automotiva, construção civil, embalagens, entre outros (KALIAPPAN; NATRAYAN, 2024; NAYAK *et al.*, 2024; PENDER *et al.*, 2024; RAVISHANKAR; NAYAK; KADER, 2019; VOUTETAKI; MPALASKAS, 2024). Dentre as fibras vegetais utilizadas como reforço em compósitos poliméricos pode-se citar as fibras de sisal, cânhamo, bambu, banana, juta e algodão (KHAN *et al.*, 2024; PALANISAMY *et al.*, 2024).

As fibras na forma de tecidos têm recebido destaque em comparação com outros materiais de reforço, como as partículas e as fibras curtas. Os tecidos podem ser confeccionados em diversas direções e formatos e, por isso, apresentam propriedades que podem ser adaptadas para atender às necessidades específicas em diferentes aplicações, através também da alteração do tipo de fibra que constitui o tecido, fração de fibras, arquitetura ou arranjo do tecido, entre outros parâmetros (CHOWDHURY; SUMMERSCALES, 2024; JEYAGURU *et al.*, 2024).

Neste contexto, este capítulo tem como objetivos: I) realizar uma revisão bibliográfica sobre a composição e propriedades das fibras vegetais que podem ser

aplicadas como fase dispersa em compósitos poliméricos; e II) realizar um estudo sobre a resistência a tração de três tipos diferentes de tecidos de fibras de juta e algodão.

## **2.2. Revisão bibliográfica**

### *2.2.1 Compósitos*

Aos longos dos anos, as novas tecnologias têm requisitado materiais cujas propriedades, muitas vezes, não são atendidas pelos materiais convencionais, então, a combinação de diferentes materiais produziu uma nova classe de material, o compósito (ZHAI; GRÖSCHEL; DRUMMER, 2016). A possibilidade de diferentes composições deu aos fabricantes a oportunidade de utilizar materiais novos e melhores reduzindo custos, aumentando a eficiência e utilizando melhor os recursos (SUMITHRA *et al.*, 2023). Assim, o interesse pelos materiais compósitos resultou em várias aplicações na indústria aeronáutica, construção civil, indústria automobilística, biomédica, de eletroeletrônicos, entre outras (BALLA *et al.*, 2019; SABA *et al.*, 2016; SUMITHRA *et al.*, 2023).

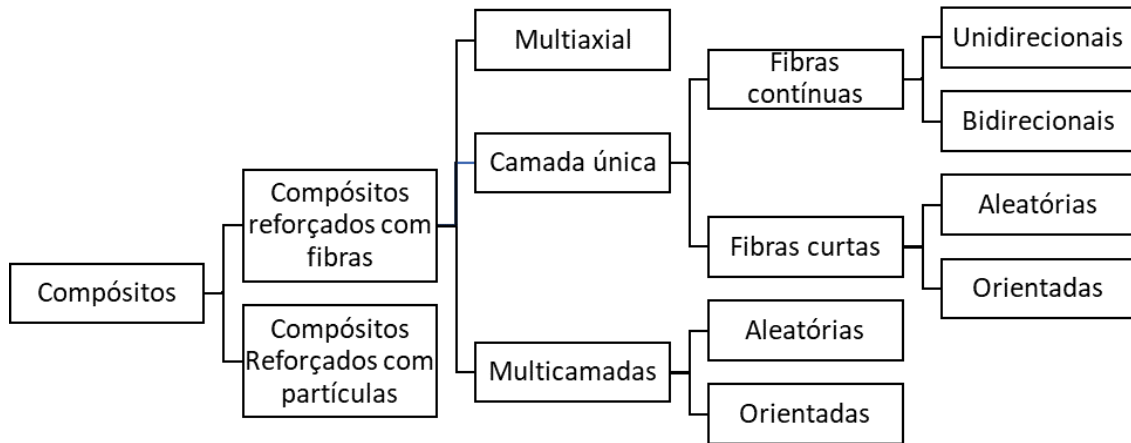
De forma geral, os compósitos podem ser definidos como a combinação de um ou mais materiais em uma estrutura multifásica (fase contínua e fase dispersa), separadas por uma interface bem definida, cada qual permanecendo com suas características individuais, resultando em um material com propriedades ou características superior à dos constituintes individuais (SUMITHRA *et al.*, 2023).

A fase contínua, também chamada de matriz, pode ser um material metálico, cerâmico ou polimérico. É responsável pelo acabamento superficial do compósito e mantém a orientação e espaçamento entre as fibras. Além disso, tem a função de envolver e transferir o esforço mecânico para a fase dispersa e protegê-la de ações causadas pelo meio (CALLISTER, 2008).

A fase dispersa representada pelas partículas ou fibras, pode atuar como carga auxiliando na redução de custos do produto final ou como reforço conferindo melhor resistência mecânica ao material. Adicionalmente, a fase dispersa pode melhorar a resistência térmica, química, elétrica, ótica, sendo que as propriedades finais do compósito dependerá de fatores como a proporção entre as fases, interação entre elas e do tipo de fase dispersa, ou seja, geometria, formato, tamanho, distribuição e orientação (ARPITHA; SANJAY; YOGESHA, 2014; SILVA; COELHO; BORDADO, 2013).

Levy Neto e Pardini (2006) propõe uma classificação dos materiais compósitos de acordo com o tipo de arranjo da fase dispersa, o qual está ilustrado na Figura 1.

**Figura 1 - Esquema de classificação dos compósitos de acordo com o tipo de fase dispersa**



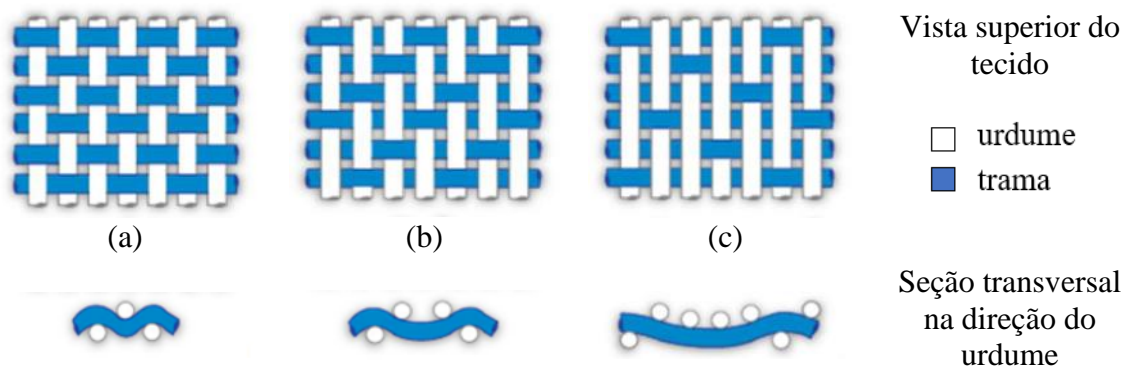
Fonte: Adaptado de (LEVY NETO; PARDINI 2006)

A seleção da fase dispersa deve considerar aspectos como o custo e disponibilidade dos materiais, desempenho desejado e a técnica de fabricação empregada. O desempenho dos compósitos utilizando fibras sintéticas, em muitos aspectos, ainda supera o dos compósitos que utilizam fibras naturais (RAHMAN; PUTRA, 2018). Entretanto, com a crescente necessidade de se resguardar o meio ambiente de diversas agressões oriundas dos processos industriais, minimizar a dependência de recursos não renováveis, bem como promover o desenvolvimento sustentável, o uso de matérias primas de origem vegetal e, portanto, renováveis vem crescendo nos últimos anos (AKHYAR et al., 2024; PATEL; YADAV; WINCZEK, 2023; SUMESH KR et al., 2024).

No geral, as fibras são utilizadas em compósitos poliméricos em diferentes configurações, como fibras contínuas, aleatórias e tecidos. Os tecidos possuem maior custo quando comparado às mantas, porém oferecem propriedades superiores em termos de resistência e rigidez e garantem maior estabilidade dimensional ao compósito. (AISYAH *et al.*, 2021). A tecelagem da fibra pode aumentar a resistência de ligação fibra-matriz e como as fibras estão unidas, compósitos reforçados com tecidos necessitam de maior tensão para que haja a quebra do compósito comparado com compósitos reforçados com fibras unidirecionais (KHAN *et al.*, 2016).

Na confecção dos tecidos, os fios que estão na direção do comprimento são chamados de urdume e na direção transversal, trama. Isso confere ao compósito resistência nas duas direções. Adicionalmente, de acordo com o arranjo entre o urdume e trama é possível a obtenção de tecidos do tipo plano (*plain weave*), sarja (*twill weave*) e cetim (*satin weave*) (Figura 2).

**Figura 2 - Esquema da arquitetura de alguns tipos de tecidos têxteis: a) plano; (b) sarja; (c) cetim. (I) vista superior do tecido; (II) seção transversal das fibras na direção do urdume**



Fonte: Adaptado de (TODOR; BULEI; KISS, 2018; YUHAZRI *et al.*, 2016)

No caso do tecido plano (Figura 2a) os fios do urdume passam por cima e por baixo de cada fio da trama. Já em tecidos no arranjo sarja (Figura 2b), um fio da trama é entrelaçado sob e sobre dois fios do urdume de maneira regular e repetida. E, no tecido tipo cetim (Figura 2c), há passagem do fio da trama sob vários fios sucessivos do urdume e, em seguida, sobre um fio desse fio da trama. Quando a trama passa sob quatro fios sucessivos do urdume e em seguida sobre um fio deste urdume, o arranjo é denominado de *4-harness satin* (MARINUCCI, 2019; YUHAZRI *et al.*, 2016). O diferentes arranjos dos tecidos de fibras tem possibilitado o desenvolvimento de pré-formas utilizados em compósitos avançados (CHOWDHURY; SUMMERSCALES, 2024; TODOR; BULEI; KISS, 2018).

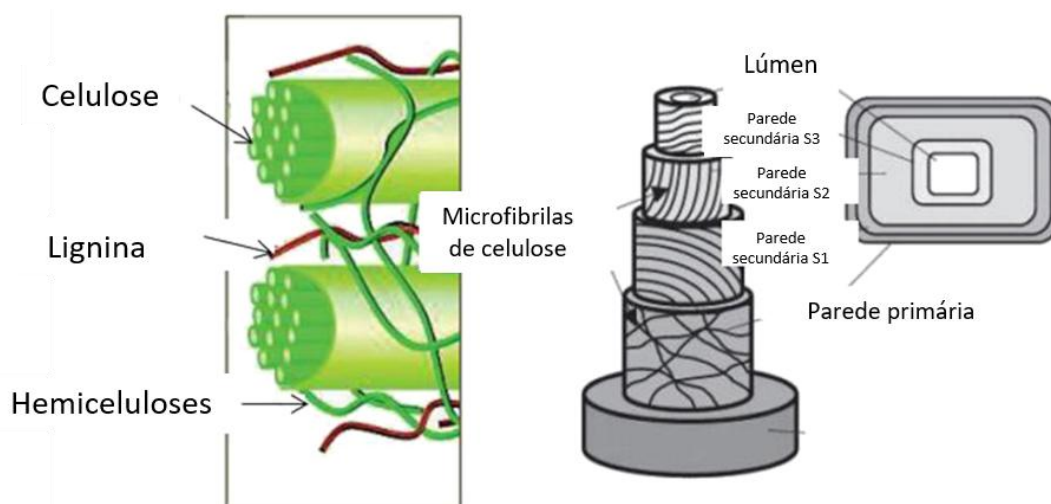
### 2.2.2 Composição, propriedades e aplicações das fibras lignocelulósicas

De modo geral, as fibras naturais podem ser obtidas a partir de fontes animais (como a lã e seda, por exemplo) minerais e vegetais (BAPTISTA *et al.*, 2019; BONGARDE; SHINDE, 2014). As fibras de origem vegetal são as mais estudadas devido a sua vasta disponibilidade, biodegradabilidade e custo baixo. Além disso, em algumas situações, as fibras vegetais podem ser provenientes de resíduos agrícolas,

trazendo benefícios econômicos adicionais para comunidades que trabalham em seus cultivos (KANNAN et al., 2024; SILVA; OLIVEIRA, 2021; SURESH; SUDHAKARA; VINOD, 2020; ZHANG et al., 2020).

Os principais constituintes das fibras vegetais ou lignocelulósicas são a celulose, hemiceluloses, lignina e uma pequena quantidade de pectina, ceras e substâncias solúveis em água. As composições químicas das fibras vegetais variam muito, dependendo da espécie vegetal, clima, solo, etc. no qual também determinam as propriedades das fibras vegetais (ATHIJAYAMANI *et al.*, 2016). Na Figura 3 está representada um esquema da estrutura de uma célula vegetal.

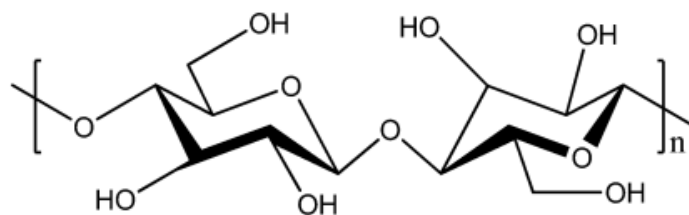
**Figura 3 - Representação esquemática da estrutura de uma célula vegetal**



Fonte: Adaptado de (OUSHABI, 2019)

A celulose (Figura 4) é um polissacarídeo linear formado por unidades repetitivas de D-glicose, cuja função é conferir estabilidade e resistência às fibras, sendo considerado o principal constituinte estrutural das fibras vegetais. O grau de cristalinidade da celulose varia conforme a sua fonte e método de processamento. De acordo com Silva *et al.* (2009) a celulose proveniente do algodão pode apresentar grau de cristalinidade em torno de 70%, enquanto a celulose derivada de árvores podem apresentar grau de cristalinidade em torno de 40% (SILVA *et al.*, 2009). Ademais, a quantidade e a orientação das microfibrilas de celulose em relação ao eixo da fibra influenciam significativamente na resistência à tração, rigidez e estabilidade dessas fibras (BOURMAUD *et al.*, 2013; REDDY; YOGANANDAM; MOHANAVEL, 2020).

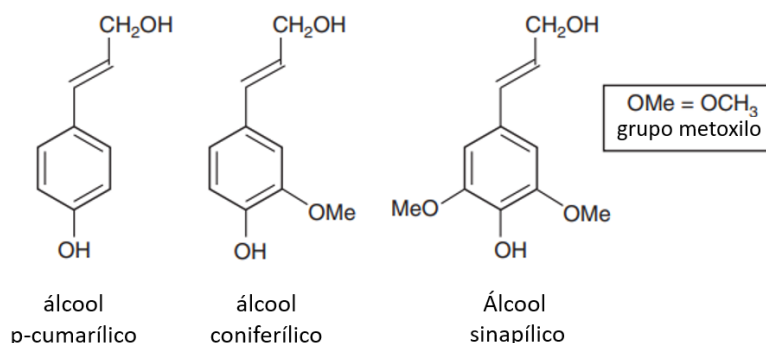
**Figura 4 - Estrutura química da celulose**



Fonte: (WILLGERT et al., 2014)

A lignina é uma macromolécula complexa de estrutura altamente reticulada composta por três tipos de álcoois: p-cumarílico, coniferílico e sinapílico (Figura 5) que, por polimerização enzimática, resulta em uma estrutura tridimensional que unem as fibras celulósicas formando a parede celular (WATKINS *et al.*, 2015). É responsável por conferir rigidez das fibras, e a quantidade de lignina influencia na estrutura, propriedades, morfologia, flexibilidade e taxa de hidrólise das fibras (REDDY; YOGANANDAM; MOHANAVEL, 2020).

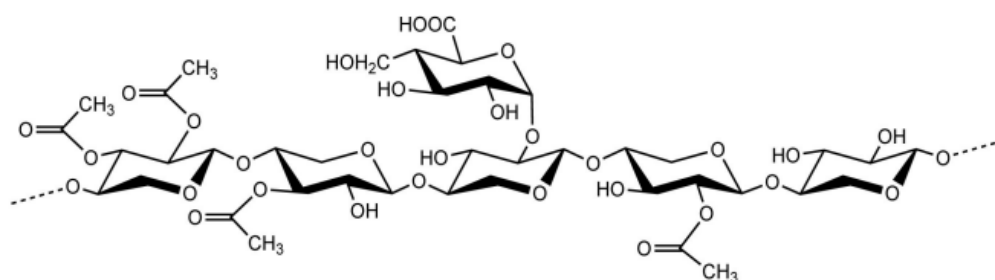
**Figura 5 - Representação esquemática das unidades estruturais da lignina**



Fonte: (WATKINS *et al.*, 2015)

As hemiceluloses (Figura 6), também chamadas de polioses, são constituídas de macromoléculas incluindo a xilose, arabinose, galactose, glucose e manose. A unidade mais abundante é a xilose, unidas por ligações glicosídicas nas posições 1 e 4. As hemiceluloses apresentam grau de ramificação entre as cadeiras considerável e, por isso, são bastante hidrofílicas (HUANG *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2012). A pectina é um polissacarídeo, rico em ácido galacturônico, presente na parede celular e tem função aglutinante. As ceras atuam na proteção da superfície das fibras (LEMOS; MAUSS; SANTANA, 2017; REDDY; YOGANANDAM; MOHANAVEL, 2020).

**Figura 6 - Estrutura típica das hemiceluloses**



Fonte: (HU et al., 2020)

As fibras lignocelulósicas podem ser obtidas a partir de diferentes partes das plantas como, por exemplo, do caule (juta, linho, cânhamo, entre outros), das folhas (sisal, banana, abacaxi, entre outros) e das sementes (algodão, coco, entre outros.) (KHAN; HAMEED SULTAN; ARIFFIN, 2018).

Ao longo dos anos, tem aumentado o interesse no desenvolvimento de compósitos utilizando fibras vegetais em substituição às fibras sintéticas como fibras de vidro, carbono e aramida uma vez que as fibras vegetais apresentam vantagens, como a sua baixa massa específica, custo baixo e aspectos ambientais, como a sua biodegradabilidade. Essas fibras já vêm sendo empregadas na confecção de roupas, cordas, cestos e, mais recentemente, vem sendo amplamente estudadas como fase dispersa em compósitos poliméricos. A literatura reporta o uso de fibras vegetais de diferentes fontes em compósitos com matriz termorrígida e termoplástica como o bambu (YEH; YANG, 2020), buriti (DA CRUZ DEMOSTHENES *et al.*, 2020), piaçava (GARCIA FILHO *et al.*, 2021), sisal, banana (HARIPRASAD *et al.*, 2020), juta (MARGOTO *et al.*, 2020; SINGH; SINGH; DHAWAN, 2020). A Tabela 1 mostra a composição e as propriedades de algumas fibras vegetais utilizadas em compósitos poliméricos.

**Tabela 1 - Composição e propriedades das algumas fibras vegetais utilizadas como em compósitos poliméricos**

Fibra	Composição			Propriedades			
	Celulose (%)	Hemi-celulose (%)	Lignina (%)	Densidade (g/m <sup>3</sup> )	Tensão máxima (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Deformação (%)
Juta	61-72	18-22	12-13	1,3-1,48	393-800	0,13-26,5	1,16-1,80
Algodão	82-96	2-6	-	1,51	300-700	6-10	0,3-10
Sisal	65-70	10-14	8-10	1,3-1,4	390-450	12-41	2,3-2,5
Coco	36-43	41-45	0,15	1,15-1,25	131-220	4-6	15-40
Banana	63-65	6-19	5-12	1,35	529-914	27-32	2,6-5,9

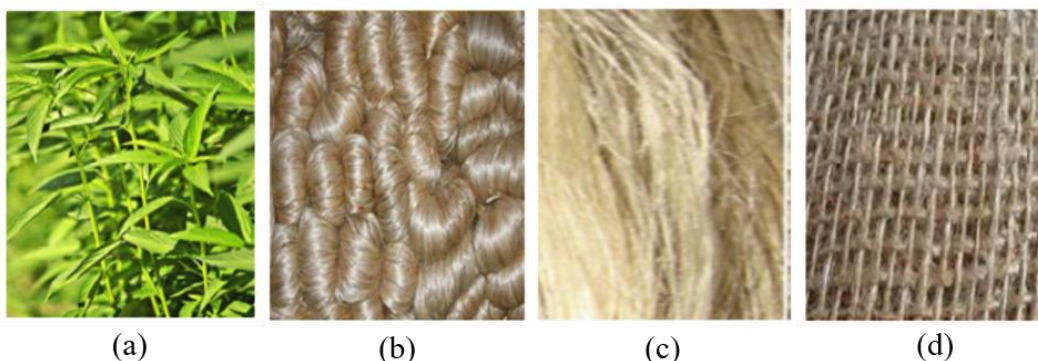
Fonte: (ANSELL; MWAIKAMBO, 2009; ARUN; VINCENT; KARTHIKEYAN, 2020; VIGNESHWARAN *et al.*, 2020)

Dentre as fibras vegetais, destacam-se as fibras de juta e algodão, já que ambas possuem baixo custo em comparação com as fibras sintéticas e são amplamente cultivadas no Brasil (COÊLHO, 2021; MARQUES *et al.*, 2020).

### 2.2.3 Fibras de juta

A juta (*Corchorus capsularis*) é uma planta que alcança um tamanho de 3 a 4 metros de altura e é cultivada, principalmente, em locais de clima úmido e quente como o norte brasileiro, nos estados do Amazonas e Pará. Por conta de seu aspecto macio e brilhante (Figura 7), além da resistência ao calor e ao fogo, as fibras de juta são amplamente utilizadas na indústria têxtil como matéria prima para a confecção de sacaria, telas e fundos de tapetes. Adicionalmente, por questões socioambientais, o cultivo da juta é importante para o desenvolvimento sustentável no meio rural para a agricultura familiar (SOARES *et al.*, 2020).

**Figura 7 - (a) planta de juta; (b) fibras de juta “in natura”; (c) fibras de juta unidirecional; (d) tecido de fibras de juta**



Fonte: (SINGH *et al.*, 2018)

Em matrizes termorrígidas, as propriedades mecânicas de compósitos de juta/epóxi têm sido amplamente investigadas. Singh *et al.* (2020) estudaram a influência do tratamento alcalino com NaOH nas propriedades dos compósitos reforçados com fibras de juta moldados pelos processos de *hand lay up* e moldagem por compressão. Os autores sugerem que a concentração ideal para o tratamento das fibras de juta é de 5% de hidróxido de sódio (NaOH), a qual foi capaz de promover aumento na resistência à tração, flexão e impacto nos compósitos (SINGH; SINGH; DHAWAN, 2020). No estudo de Raghavendra *et al.* (2017) foi avaliado a influência da absorção de umidade nas propriedades mecânicas de compósitos de epóxi reforçados com tecidos de fibras de juta fabricados por *hand lay up*, no qual a incorporação desses tecidos resultou no

aumento de até 320% na resistência à tração e 570% na resistência à flexão dos compósitos. Entretanto, ao serem expostos à água salina, os compósitos tiveram perda de até 35% nas propriedades mecânicas (RAGHAVENDRA *et al.*, 2017).

Em relação aos termoplásticos, o polipropileno é amplamente estudado como matriz em compósitos utilizando fibras de juta. Margoto *et al.* (2020) estudaram a influência da quantidade de fibras de juta e os efeitos da incorporação de um agente de compatibilidade (MAPP) nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com tecidos de fibras de juta moldados por compressão. Os resultados mostraram que compósitos contendo duas camadas de tecidos de fibras de juta com 30% de MAPP ocasiona um aumento de 100% na resistência à tração e 45% na resistência à flexão, mostrando a importância de haver uma boa adesão interfacial entre a matriz e a fibra nos compósitos (MARGOTO *et al.*, 2020).

Chatterjee *et al.* (2020) estudaram o efeito do comprimento e da quantidade de fibras de juta em compósitos de polipropileno. Os autores observaram que os melhores resultados foram obtidos para compósitos contendo 10% de fibras de juta com 3 cm de comprimento, que promoveu aumento de até 147% na resistência à tração dos compósitos (CHATTERJEE; KUMAR; SINGH, 2020).

#### 2.2.4 Fibras de algodão

As fibras de algodão são provenientes da semente do algodoeiro *Gossypium*, que é uma das espécies vegetais mais cultivadas no mundo, no qual o Brasil é o quarto maior produtor e o segundo maior exportador mundial. Os estados brasileiros que mais produzem o algodão são Mato Grosso, Bahia, Minas Gerais, Goiás, e Mato Grosso do Sul, e assim como a juta, o algodão também é importante por questões socioambientais nas regiões que a cultivam (COÊLHO, 2021; JERÔNIMO *et al.*, 2014).

O algodão é uma fibra constituída principalmente de celulose (82-96%), no qual varia dependendo do tipo de algodoeiro e tempo de colheita. Por não possuir lignina em sua composição, as fibras de algodão não são tão rígidas. O algodão é amplamente utilizado na indústria têxtil na produção de peças para vestuário por possuir baixo custo e ser de fácil pigmentação (BAJPAI; MARY; CHAND, 2015).

Em compósitos, o algodão ainda é pouco utilizado. Macedo *et al.* (2014) avaliaram a influência da incorporação de amido e algodão *in natura* em compósitos de

poli(ácido láctico) (PLA). Os autores observaram que a incorporação do amido pode ser uma alternativa para facilitar a decomposição da matriz, bem como diminuir o custo do produto final, uma vez que o algodão poderia atuar como uma carga de enchimento (MACEDO; CARMONA; ROSA, 2014).

Kamble e Behera (2020) desenvolveram compósitos de resina epóxi reforçados com algodão proveniente de resíduos têxteis, os quais foram moldados por compressão. Os autores observaram um aumento de quase 70% na resistência à tração dos compósitos em comparação com a resina epóxi não reforçada. Além disso, as propriedades mecânicas dos compósitos foram comparáveis às de uma madeira comercial como a de pinus (KAMBLE; BEHERA, 2020).

Desta forma, nas próximas seções será descrito um estudo sobre a resistência à tração de diferentes tipos de tecidos de fibras de juta e tecido híbrido de fibras de juta e algodão.

## 2.3 Parte experimental

### 2.3.1 Cordões e tecidos de fibras de juta

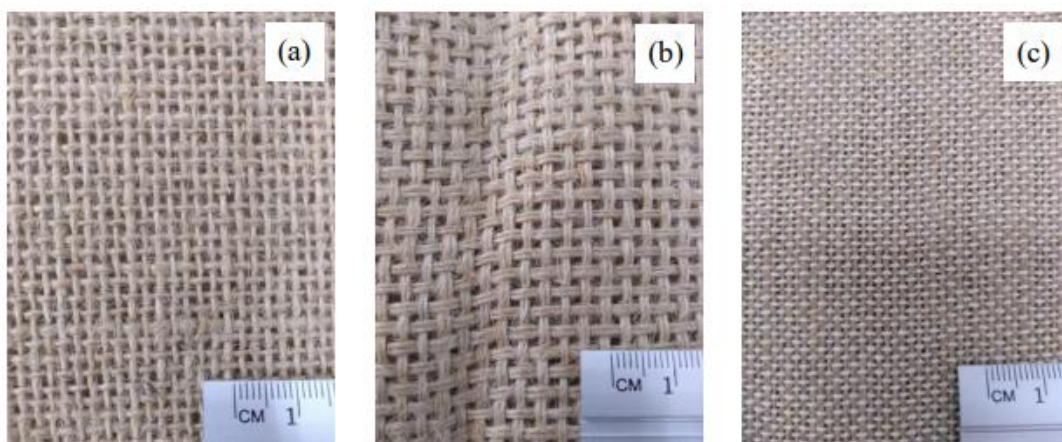
Os tecidos de fibras de juta utilizados nesta pesquisa foram adquiridos no comércio nacional. As fibras não sofreram qualquer tipo de tratamento químico ou físico, sendo caracterizadas como “in natura”. Foram utilizados três tipos diferentes de tecidos de fibras de juta e suas características estão descritas na Tabela 2 e podem ser observadas na Figura 8.

**Tabela 2 - Tipos de tecidos utilizados e suas especificações**

Amostra	Composição	Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	Nº de cordões no urdume (cordões/cm)	Nº de cordões na trama (cordões/cm)
T1	Juta	365	4,3	4,5
T2	Juta	445	6,2	6,0
T3	Juta e algodão	360	7,0 (juta)	7,5 (algodão)

Fonte: (HOSOKAWA *et al.*, 2021)

**Figura 8 - Fotografia dos tecidos de fibras de juta. (a) T1; (b) T2; (c) T3**



Fonte: Autoria própria (2024)

O tecido T1 (Figura 8a) é composto somente de fibras de juta com fio simples no urdume e na trama; o tecido T2 (Figura 8b) também é composto somente de fibras de juta com fios duplos no urdume e na trama. Já o tecido T3 (Figura 8c) é um tecido considerado híbrido composto por fibras de juta no urdume e fibras de algodão na trama.

### 2.3.2 Espectroscopia de absorção com transformada de Fourier (FTIR)

A fibras de juta e de algodão foram caracterizados pela espectroscopia de absorção com transformada de Fourier (FTIR) em um equipamento Spectrum 65 (Perkin Elmer), com modo ATR. Os espectros de absorção foram analisados na faixa de  $4000$  a  $600\text{cm}^{-1}$  com resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$  e  $32\text{ scans}$ .

### 2.3.3 Ensaio de tração de cordões de fibras de juta

Os ensaios de tração realizado nos cordões de fibras de juta seguiu os parâmetros da norma ASTM D2256-10. Primeiramente, dez cordões que formam o tecido foram retirados aleatoriamente de cada tecido e cortados no comprimento de  $250\text{mm}$ . Considerando o tecido híbrido (T3) foram retirados somente cordões de fibras de juta, orientados no urdume.

Para a realização dos ensaios de tração foram necessários os valores da área da seção transversal dos cordões de juta. Então, para o cálculo da área da seção transversal do cordão de juta, as amostras de cordões foram pesadas individualmente em balança de

precisão e depois colocadas na estufa a 80°C por 24 horas. Depois, os cordões foram novamente pesados. O teor de umidade das fibras de juta foi obtido a partir da Equação 1:

$$M = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $M$  é o teor de umidade (%);  $m_1$  é a massa da amostra seca (g) e  $m_2$  é a massa da amostra na umidade de equilíbrio em uma determinada umidade relativa (g).

Os valores da massa seca foram utilizados para determinar a área através da Equação 2:

$$A = \frac{m}{\rho \cdot L} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde  $A$  é a área da seção transversal ( $\text{mm}^2$ );  $m$  é a massa seca da fibra (g);  $\rho$  é a densidade da fibra ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e  $L$  é o comprimento da fibra (cm). O valor considerado para a massa específica da juta foi de  $1,61 \text{g}/\text{cm}^3$  e foi retirado do trabalho de Fidelis (2014).

Para a realização dos ensaios de tração dos cordões foi utilizada uma máquina universal para ensaios mecânicos (EMIC DL 30000) (Figura 9) com célula de carga de 500kgf e velocidade de ensaio de 1,25mm/min.

**Figura 9 - Fotografia do cordão de fibras de juta preso na garra do equipamento de ensaio de tração**

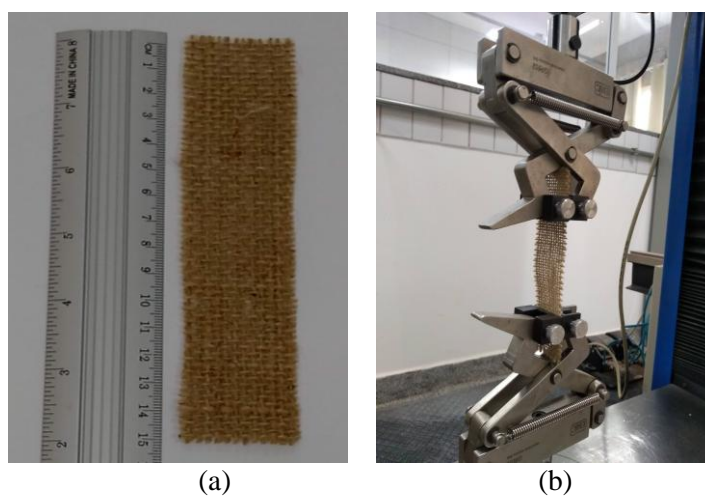


Fonte: Autoria própria (2024)

### 2.3.4 Ensaio de tração dos tecidos de fibras de juta

Os ensaios de tração dos tecidos de fibras de juta seguiram a norma ASTM D5035-11, para o qual dez corpos de prova de cada tecido (T1, T2 e T3) foram cortados nas dimensões de 25mm de largura e 150mm de comprimento (Figura 10a) e ensaiados na máquina universal para ensaios mecânicos equipamento (EMIC DL 30000), com célula de carga de 500kgf e velocidade de ensaio de 300 mm/min.

**Figura 10 - Fotografias: (a) de um corpo de prova do tecido T1; (b) corpo de prova no equipamento para a realização do ensaio de tração**



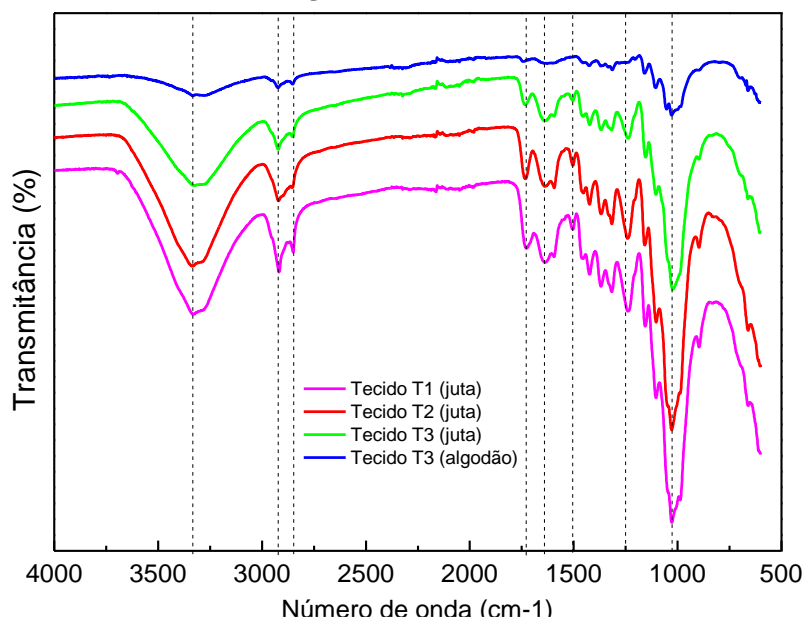
Fonte: Autoria própria (2024)

Posteriormente, os resultados dos ensaios de tração dos cordões e dos tecidos de fibras de juta foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey para comparação das médias.

## 2.4 Resultados e discussão

### 2.4.1 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

**Figura 11 - Espectros de infravermelho das fibras de juta do tecido T1, T 2 e T3 e fibras de algodão do tecido T3**



**Tabela 3 - Bandas presentes no espectro das fibras de juta retiradas do tecido T1, T2 e T3 e fibras de algodão retirada do tecido T3 e suas respectivas atribuições**

Atribuições	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )
Estiramento vibracional de OH	3300
Estiramento vibracional de C-H de CH <sub>3</sub>	2920
Estiramento vibracional de C-H de CH <sub>2</sub>	2847
Estiramento vibracional de C=O	1730 - 1735
Estiramento vibracional de C=O das hemiceluloses	1620
Estiramento vibracional de C-H	1450
Estiramento vibracional de CO e O-H	1030

Fonte: Adaptado de (LAVORATTI *et al.*, 2017; PIRES *et al.*, 2012)

A Figura 11 apresenta os espectros de FTIR das fibras de juta e algodão retiradas dos tecidos T1, T2 e T3. Observa-se que os picos são comuns para ambas as fibras. As bandas em 3300 cm<sup>-1</sup> estão relacionadas ao estiramento vibracional dos grupos hidroxila (OH) da celulose, hemiceluloses, água e lignina. As bandas em 2920cm<sup>-1</sup> e 2847cm<sup>-1</sup> estão associadas ao estiramento vibracional das ligações C-H dos grupos metila (CH<sub>3</sub>) e

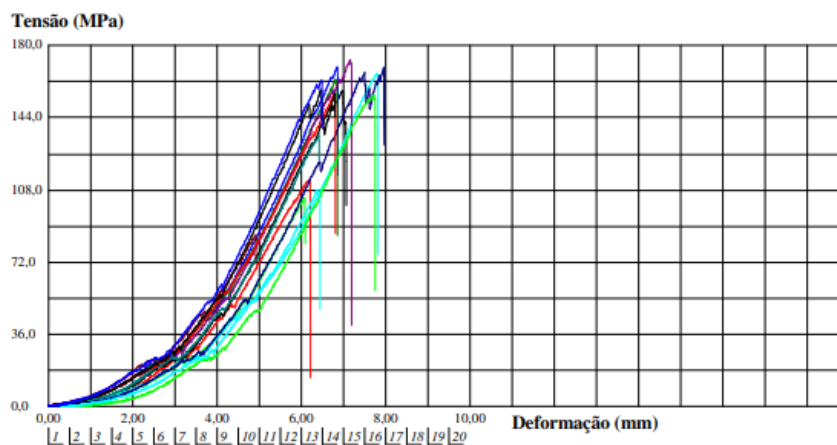
metileno (CH<sub>2</sub>), respectivamente da celulose e hemiceluloses. As bandas em 1730cm<sup>-1</sup> e 1620cm<sup>-1</sup> representam o estiramento vibracional da carbonila (C=O) da estrutura das hemiceluloses e lignina. As bandas em 1030 cm<sup>-1</sup> estão associadas ao estiramento vibracional dos grupos CO e OH dos polissacarídeos da estrutura de celulose (LAVORATTI *et al.*, 2017; PIRES *et al.*, 2012).

Assim, verifica-se que os resultados obtidos estão bem próximos aos valores de referência encontrados na literatura e, comparando os dois tipos de fibras (juta e algodão) observa-se que há uma pequena diferença na intensidade das bandas obtidas. Isso pode estar associado a quantidade de material analisado, uma vez que a fibra de algodão é mais fina do que as fibras de juta analisadas.

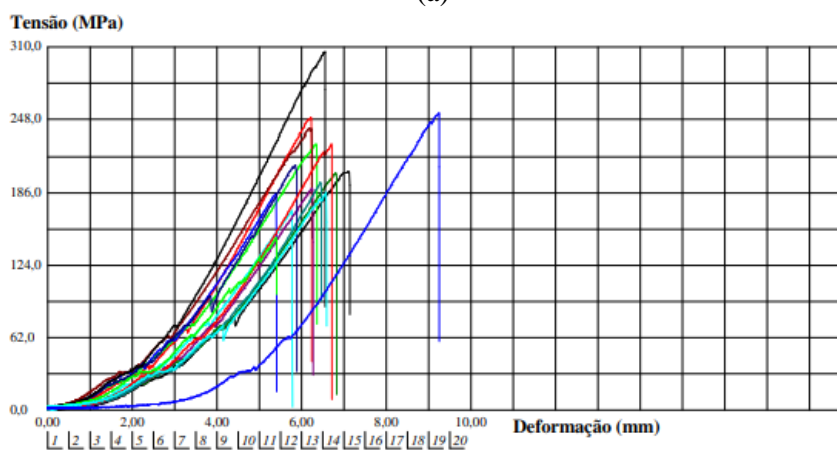
#### 2.4.2 Ensaio de tração nos cordões de fibras de juta

As curvas típicas de tensão *versus* deformação para os cordões de fibras de juta testados estão apresentadas na Figura 12a-c. O comportamento dos cordões de fibras de juta pode ser dividido em duas fases: na primeira região não linear da curva ocorre uma acomodação das fibras que compõe o cordão com um ganho crescente do módulo de elasticidade até o início do rompimento das primeiras fibras. Depois, observa-se um aspecto de pós-ruptura descontínua, que pode ser atribuído a não homogeneidade das tensões entre as fibras constituintes do fio, ocasionando a ruptura das fibras mais tensionadas. Um comportamento similar também é observado em outra fibra vegetal, o linho, cujas fibras são obtidas a partir do caule da planta, assim como as fibras de juta (HU *et al.*, 2010; ISLAM *et al.*, 2020).

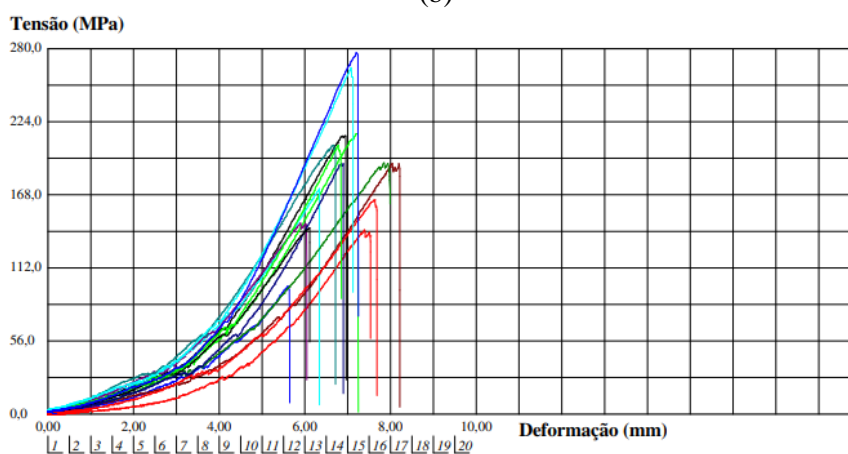
**Figura 12 - Curvas Tensão versus Deformação do ensaio de tração realizado nos cordões de fibras de juta do tecido: (a) T1; (b) T2; (c) T3. As diferentes cores nas curvas representam o número de cordões testados**



(a)



(b)



(c)

Os resultados da média e desvio padrão para a força máxima, resistência à tração, deformação e módulo de elasticidade para os cordões de fibras de juta são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Resultados dos valores médios obtidos dos ensaios de tração realizado nos cordões de juta**

Amostra	Força Máxima (N)	Resistencia a tração (MPa)	Deformação (%)	Módulo elástico (GPa)
T1	37,53 (7,31) <sup>A</sup>	145,0 (28,22) <sup>B</sup>	3,13 (0,52) <sup>A</sup>	9,27 (0,95) <sup>B</sup>
T2	43,92 (8,02) <sup>A</sup>	213,5 (39,00) <sup>A</sup>	3,07 (0,26) <sup>A</sup>	12,61 (1,40) <sup>A</sup>
T3	40,44 (10,07) <sup>A</sup>	188,4 (46,88) <sup>A</sup>	3,21 (0,41) <sup>A</sup>	11,75 (2,14) <sup>A</sup>

Médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si no nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

A análise de variância ao nível de significância de 5% e teste de Tukey mostrou que não houve diferença significativa nos valores de força máxima e deformação específica para os diferentes tipos de fios de fibras de juta, enquanto para as variáveis tensão máxima e módulo de elasticidade houve diferença significativa.

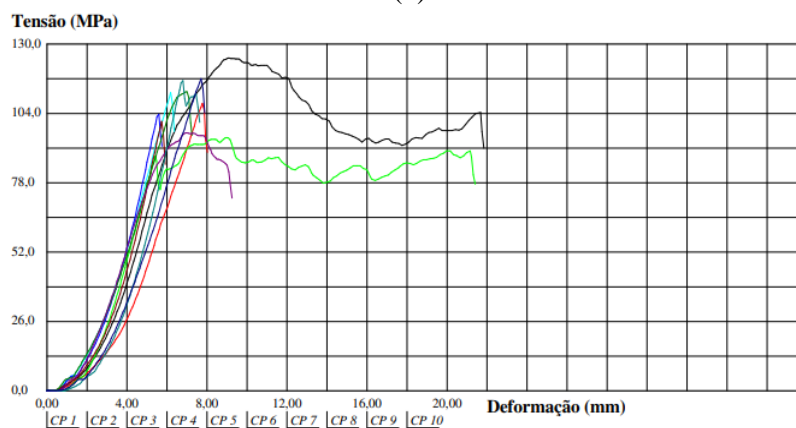
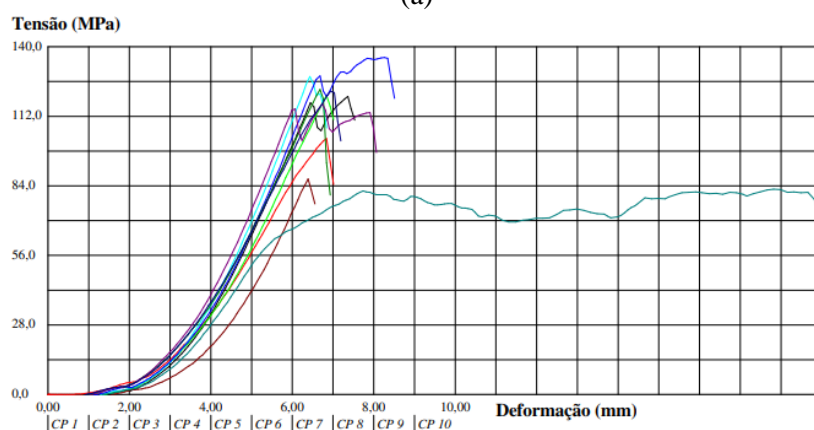
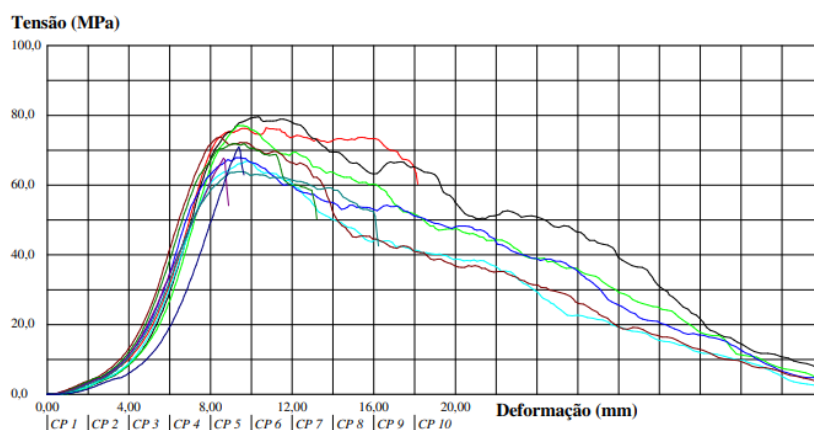
Os cordões de fibras de juta com maior resistência a tração foram dos tecidos T2 e T3 cujos valores foram  $213,5 \pm 39,0$  MPa e  $188,4 \pm 46,9$  MPa, respectivamente, enquanto as amostras do tecido T1 atingiram uma média de  $145,0 \pm 28,2$  MPa. Esses valores são superiores aos encontrados por Arunavathi *et al.* (2017), no qual obtiveram resistência à tração de  $71,7 \pm 9,5$  MPa e são inferiores a resistência à tração encontrada por Vigneshwaran *et al.* (2020) no qual varia entre 393-800 MPa. Essa diferença nos valores de resistência à tração encontrados pode estar associada ao diâmetro e a quantidade de monofilamentos torcidos nos fios de juta, o que justifica, também o aumento do módulo de elasticidade (ARUNAVATHI; EITHIRAJ; VELURAJA, 2017; VIGNESHWARAN *et al.*, 2020). O diâmetro das fibras está relacionado com a quantidade de células constituintes, alterando parâmetros estruturais como o ângulo helicoidal, volume e número de células que constituem defeito. Esses fatores contribuem para valores menores de propriedades mecânicas das fibras vegetais (NUNES *et al.*, 2022). Tais informações corroboram com os resultados obtidos, uma vez que os cordões do tecido T1 apresentaram os menores valores de diâmetro.

#### 2.4.3 Ensaio de tração nos tecidos de fibras de juta

Os ensaios de tração nos tecidos de fibras de juta foram realizados com a finalidade de analisar o desempenho de tecidos confeccionados com diferentes arquiteturas ou arranjos. Assim, a Figura 13a-c apresenta as curvas típicas de tensão *versus* deformação dos ensaios realizados nos tecidos T1, T2 e T3. Assim, é possível observar uma não linearidade na região plástica das amostras ensaiadas. Além disso, próximo à força máxima ocorre uma oscilação, justificada pela ruptura das fibras

individuais que compõe o tecido. Adicionalmente, observa-se que após a ruptura há um escorregamento entre os cordões que compõe o tecido impedindo que todos os cordões sejam rompidos (Figura 14). Esse comportamento é mais pronunciado nas amostras de T1, por conta do espaçamento maior entre os cordões de fibras de juta. Na literatura, Caldas (2014) reporta resultados semelhantes em tecidos de fibras de sisal.

**Figura 13 - Curvas tensão versus deformação do ensaio de tração do tecido: (a) T1; (b) T2; (c) T3. As diferentes cores nas curvas representam o número de cordões testados**



**Figura 14 - Fotografias do: (a) tecido antes do ensaio de tração, e (b) após o ensaio de tração**



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados da média e desvio padrão obtidos do ensaio de tração realizado nos tecidos de fibras de juta (T1, T2 e T3) são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Valores médios, desvios padrão e teste de Tukey dos resultados do ensaio de tração realizados nos diferentes tipos de tecidos de fibras de juta**

Amostra	Força Máxima (N)	Resistência a tração (MPa)	Deformação (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
T1	275,86 (22,12) <sup>C*</sup>	71,68 (5,07) <sup>C</sup>	12,65 (0,93) <sup>A</sup>	1,38 (0,18) <sup>C</sup>
T2	538,49 (42,04) <sup>A</sup>	121,57 (8,97) <sup>A</sup>	9,73 (0,97) <sup>B</sup>	2,59 (0,37) <sup>A</sup>
T3	407,44 (46,84) <sup>B</sup>	108,73 (9,57) <sup>B</sup>	9,59 (1,62) <sup>B</sup>	2,17 (0,32) <sup>B</sup>

\*Médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si no nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

O tecido com maior resistência à tração foi o tipo T2 ( $121,57 \pm 8,97$  MPa), seguido pelo tecido T3 ( $108,73 \pm 9,57$  MPa) e T1 ( $71,68 \pm 5,07$  MPa). Isso significa que mesmo sendo todos tecidos do tipo plano (*plain weave*), o arranjo como é confeccionado altera a resistência à tração do tecido. Assim, no caso do T2, os fios duplos na trama e no urdume garantem que o tecido seja mais resistente à tração do que T1 que possui trama e urdume com fio simples. Os resultados obtidos nesse estudo são, significativamente, superiores aos reportados por Lima (2009), no qual a resistência à tração do tecido de fibras de juta foi de  $14,20 \pm 2,94$  MPa. Essa diferença pode ser justificada pelo fato de que, no trabalho, a autora utilizou tecidos provenientes de sacos de aniagem, cuja distância entre os cordões que compõe o tecido é nitidamente maior do que no presente estudo. Isso significa que há menor quantidade de fibras de juta por centímetro.

## **2.5 Conclusão Parcial**

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de tração em cordões de fibras de juta, as amostras retiradas de T2 e T3 apresentaram valores de resistência à tração semelhantes. Já nos ensaios realizados nos tecidos de fibras de juta (T1 e T2) e no tecido híbrido de juta/algodão (T3) verificou-se que o tecido que apresentou maior resistência à tração foi o tecido T2, indicando que a gramatura influencia na propriedade do tecido.

Dessa forma, os resultados demonstraram que os tecidos vegetais tem potencial para serem utilizados como reforço em compósitos poliméricos.

## CAPÍTULO 3 – COMPÓSITOS DE ACRILONITRILA-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS) RECICLADO COM FIBRAS VEGETAIS

### 3.1. Introdução

Nos últimos anos, os níveis crescentes na produção e consumo de equipamentos elétricos e eletrônicos no mundo levou a um aumento contínuo da quantidade de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). De acordo com o relatório publicado pela *Global E-Waste Monitor*, em 2024, aproximadamente 62 milhões de toneladas de REEE foram gerados em 2022 e estima-se que a quantidade desse resíduo gerado excederá 82 milhões de toneladas até 2030 (BALDÉ et al., 2024).

Além disso, a pandemia do COVID-19 trouxe mudanças abruptas e sem precedentes à sociedade fazendo com que trabalhadores se adequassem ao trabalho no formato “*home-office*” e cerca de 1,3 bilhões de estudantes tiveram o aprendizado *online*. Assim, a grande mudança para atividades *online* deve resultar em um pico na geração de REEE no futuro (ABD-MUTALIB et al., 2023; YU; YU; TAN, 2020).

A reciclagem de REEE pode garantir que recursos valiosos, como por exemplo materiais metálicos e poliméricos, não sejam desperdiçados evitando que os poluentes intrínsecos sejam depositados no meio ambiente (ANANDH *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2022). Além disso, quando o material é reprocessado há menor consumo de energia para sua produção, menor quantidade de matéria-prima virgem é extraída, menores consumos de recursos naturais e de emissão de gás carbônico para o ambiente (MENDES CAMPOLINA *et al.*, 2017).

Dentre os materiais encontrados nos REEE, cerca de 30% em massa são polímeros e podemos destacar o acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) (TAURINO; POZZI; ZANASI, 2010), no qual juntamente com o poliestireno de alto impacto (*HIPS*, do inglês) correspondem a 50% em massa dos materiais poliméricos encontrados em REEE (MARTINHO *et al.*, 2012). Um levantamento realizado por Hosokawa *et al.* (2021) aponta um crescimento nos últimos sete anos no número de publicações relacionadas à reutilização e reciclagem do ABS provenientes de REEE (HOSOKAWA *et al.*, 2021).

Entretanto, no reprocessamento de materiais poliméricos podem ocorrer reações de decomposição que afetam as propriedades finais em serviço, como por exemplo a diminuição na resistência mecânica, alterações de cor, forma, etc., sob a influência das

condições de processamento ou fatores ambientais na utilização ou descarte, como calor, luz ou exposição a produtos químicos (JASSO-GASTINEL; SOLTERO-MARTÍNEZ; MENDIZÁBAL, 2017). Os esforços atuais estão direcionados no sentido de se obter um produto a partir de polímeros reciclados que possuam propriedades com valores próximos ao do polímero virgem, visando o emprego em aplicações mais nobres. Neste caso, a adição de um material de reforço, como as fibras, pode promover a melhora das propriedades mecânicas do ABS reciclado expandindo suas possíveis aplicações.

A adição de fibras de origem vegetal ou lignocelulósicas como reforço em polímeros reciclados é uma possibilidade, já que além da redução dos resíduos plásticos há, também, o aproveitamento das propriedades das fibras vegetais em substituição às fibras sintéticas visando, desta forma, o desenvolvimento de materiais que sejam sustentáveis. Fibras lignocelulósicas como bambu, kenaf, cânhamo, cana-de-açúcar, juta, entre outras, tem atraído a atenção de pesquisadores em função da facilidade de obtenção das fibras e por possibilitarem acréscimos nos valores de propriedades mecânicas de polímeros termoplásticos reciclados (ANGULO *et al.*, 2021; INÁCIO; NONATO; BONSE, 2018; OWEN *et al.*, 2018; RODRÍGUEZ-ANDA *et al.*, 2020; ROKBI *et al.*, 2020)

Assim, este capítulo tem como objetivos: I) realizar uma revisão bibliográfica sobre os REEE, propriedades e reciclagem do ABS, enfatizando a importância do desenvolvimento de compósitos de ABS reciclado com fibras vegetais; e II) reportar o desenvolvimento de compósitos de ABS reciclado obtidos de REEE, utilizando tecidos de fibras de juta e algodão como fase dispersa.

## **3.2. Revisão bibliográfica**

### *3.2.1. Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE)*

Os equipamentos elétricos e eletrônicos são projetados para funcionar por um período, após o qual deixa de funcionar (fim de vida) ou tem seu desempenho abaixo do ideal (obsolescência). Quando isso ocorre, o usuário ou o proprietário do dispositivo pode optar por descartá-lo e assim tornar esse item um resíduo de equipamento elétrico e eletrônico (REEE) ou lixo eletrônico (SHITTU; WILLIAMS; SHAW, 2021).

O REEE considera periféricos e acessórios como parte do equipamento no momento do descarte e esse tipo de resíduo se difere de outros resíduos sólidos comuns por conter materiais raros e preciosos que podem ser reciclados ou recuperados (VAN YKEN *et al.*, 2021). Além disso, podem conter substâncias tóxicas que quando depositadas em aterros ou locais impróprios, apresentam riscos para o meio ambiente e para a sociedade (SHITTU; WILLIAMS; SHAW, 2021; TSAI, 2020; WIDMER *et al.*, 2005).

Por conta do alto volume gerado, tem-se levantado preocupações em relação ao gerenciamento dos REEE. Em 2019, apenas 17,4% dos 53,6 milhões de toneladas de REEE produzidos no mundo foram coletados e reciclados (FORTI *et al.*, 2020). No Brasil, em 2020, foram coletados 175.259 kg de resíduos eletroeletrônicos de forma ambientalmente adequada, dos quais 86.504 kg correspondem a pilhas e baterias e 88.755 kg correspondem a acessórios e cabos de computadores, celulares e aparelhos de áudio e vídeo como DVDs, telefones e caixas de som (ABRELPE, 2021).

Através da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), a logística reversa foi estabelecida como um dos instrumentos de implementação do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Diante disso, fabricantes, importadores, comerciantes, distribuidores e os cidadãos são responsáveis por recolher os resíduos proveniente de seus produtos e embalagens pós consumo priorizando seu retorno para um novo ciclo de aproveitamento (BRASIL, 2012).

O sistema de logística reversa de REEE pode auxiliar a compreender operações de transporte, desmontagem e reciclagem que consomem materiais e recursos energéticos e causam impactos ambientais. Através da análise de ciclo de vida (ACV), Rocha e Penteado (2021) avaliaram os benefícios e encargos ambientais decorrentes de um sistema de logística reversa na cidade de Campinas/SP. Os resultados indicaram que os benefícios da logística reversa superam seus impactos por conta da economia de metais e recursos minerais decorrente principalmente da reciclagem de placas de circuito impresso e pela redução dos impactos causados por substâncias tóxicas (ROCHA; PENTEADO, 2021).

Os REEE são formados por uma mistura complexa de materiais e substâncias e sua composição varia dependendo do *design* e da funcionalidade do dispositivo. De modo geral, os materiais presentes nos REEE podem ser agrupados em cinco categorias: metais ferrosos, metais não ferrosos, vidro, polímeros e outros materiais (JAIBEE *et al.*,

2015; SHITTU; WILLIAMS; SHAW, 2021). Adicionalmente, no REEE contém metais valiosos como prata, ouro, alumínio e cobre; e materiais perigosos como cádmio, cromo, chumbo e mercúrio, no qual se não forem tratados adequadamente, podem trazer impactos para a saúde e meio ambiente (WILLIAMS, 2016).

A composição dos polímeros encontrados nos REEE varia dependendo do tipo de equipamento e seu uso é favorecido, pois são materiais de custo relativamente baixo e que resultam em materiais leves e duráveis com baixa condutividade térmica e elétrica (CHARITOPULOU *et al.*, 2021; MARTINHO *et al.*, 2012; YANG *et al.*, 2013). Diferentes tipos de polímeros podem ser identificados no REEE, cada qual com suas propriedades específicas. O polipropileno (PP), por exemplo, possui alta rigidez, servindo como material estrutural; o polimetilmetacrilato (PMMA) e o policarbonato (PC) são utilizados em elementos ópticos devido às suas boas propriedades ópticas; o poliestireno (PS) é amplamente utilizado como diversas peças mecânicas e vidros ópticos, etc., pois possui alta resistência e boa transparência. Adicionalmente, o acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) tem sido amplamente utilizado como revestimentos em eletrodomésticos e equipamentos eletroeletrônicos devido à sua resistência ao impacto e ao fogo (CHEN *et al.*, 2019).

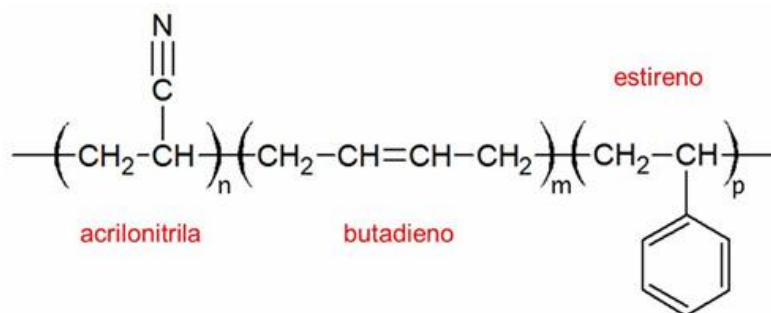
### 3.2.2. *Composição e propriedades do ABS*

Os principais polímeros presentes em equipamentos elétricos e eletrônicos são o ABS, HIPS, PP e blendas de PC/ABS (MARTINHO *et al.*, 2012). No caso dos equipamentos elétricos e eletrônicos relacionados à área de informática, os polímeros mais encontrados são o ABS (30-70%) e HIPS (3-20%) cuja proporção depende do equipamento (BRENNAN; ISAAC; ARNOLD, 2002).

O ABS é um terpolímero formado pelos monômeros acrilonitrila (15- 35%), butadieno (5-30%) e estireno (40-60%), como ilustrado na Figura 15. A proporção de cada monômero pode conferir propriedades diferentes ao material. A acrilonitrila, por exemplo, contribui para a resistência térmica e química do ABS. Já o butadieno contribui com tenacidade e resistência ao impacto e o estireno contribui para a processabilidade, rigidez e resistência do material (CAMPO, 2008; MCKEEN, 2010). Adicionalmente, o ABS apresenta um sistema bifásico, no qual partículas de

polibutadieno estão dispersas em uma matriz de acrilonitrila e estireno (SAN) (CAMPO, 2008).

Figura 15 - Estrutura química do terpolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)



Fonte: (HOSOKAWA et al., 2021)

Considerado um polímero termoplástico de engenharia, o ABS é amplamente utilizado pela indústria na fabricação de carcaças para aparelhos eletrônicos, peças de carroceria de automóveis, tampas de rodas, painéis de instrumentos e tubos internos, brinquedos, componentes de informática e tecnologia da informação e comunicação, além de dispositivos médicos e capacetes de segurança (CHAUHAN; KÄRKI; VARIS, 2019). De forma geral, os polímeros termoplásticos podem ser aquecidos, moldados e resfriados de forma reversível e, por essa razão, o ABS também é utilizado na manufatura aditiva (SAMUKANO *et al.*, 2019).

### 3.2.3. Reciclagem do ABS

A questão em relação à destinação dos REEE tem levantado preocupações de pesquisadores devido a presença de retardantes de chama (cerca de 5-25% em massa) e metais pesados (cerca de 0,5-3% em massa), que são tóxicos à saúde e ao meio ambiente (CHAUHAN *et al.*, 2022). Assim, recentemente, tem aumentado o interesse por pesquisas sobre as alternativas, incluindo a reciclagem, para gerir os REEE de forma adequada que não seja a deposição em aterros (CHEN *et al.*, 2021; DIAS *et al.*, 2018; ZHAO; BAI, 2021).

Ao realizar os processos de reciclagem, os equipamentos são desmontados e os materiais (polímeros, metais e cerâmica) são separados e direcionados para o tratamento adequado para cada classe de material. No caso dos materiais poliméricos, as principais

rotas são a reciclagem energética, química e reciclagem mecânica (FREYMOND *et al.*, 2021).

A reciclagem energética consiste na queima do material polimérico para a produção de energia na forma de calor, vapor e eletricidade. Entretanto, a emissão de poluentes como dióxido de carbono, óxido de nitrogênio, óxido de enxofre, componentes orgânicos voláteis e substâncias cancerígenas são fatores preocupantes na incineração de polímeros (FREYMOND *et al.*, 2021).

A reciclagem química visa recuperar a matéria prima (monômeros, óleos e ceras) para a fabricação de outros polímeros ou compostos químicos, através de processos químicos, pirólise, gaseificação, entre outros (FREYMOND *et al.*, 2021).

Na reciclagem mecânica, o resíduo polimérico é reprocessado com o objetivo de se obter a matéria prima para a fabricação de um novo produto. As principais etapas envolvidas nesse tipo de reciclagem são moagem, lavagem, secagem, extrusão e granulação (FREYMOND *et al.*, 2021).

No entanto, sabe-se que o reprocessamento induz a decomposição termomecânica dos polímeros devido ao aumento de temperatura e ao cisalhamento, implicando assim na perda de propriedades químicas, físicas e mecânicas. (FREYMOND *et al.*, 2021; JASSO-GASTINEL; SOLTERO-MARTÍNEZ; MENDIZÁBAL, 2017). Na literatura é reportado que a resistência ao impacto pode ser o parâmetro mais afetado ao submeter o ABS ao reprocessamento, uma vez que o butadieno é mais suscetível à decomposição termo oxidativa devido a presença de ligações duplas. Quando submetido às altas temperaturas, a oxidação do butadieno pode ocasionar dificuldade de adesão à matriz de SAN, resultando em concentração de tensões e redução das propriedades mecânicas do polímero reciclado (BOLDIZAR; MÖLLER, 2003). Então, o ABS reciclado é geralmente utilizado em produtos com aplicações de baixo valor agregado, ao invés de ser reintroduzido na produção dos equipamentos eletroeletrônicos.

#### 3.2.4. *Compósitos de ABS reciclado*

Os estudos acerca de materiais compósitos contendo polímeros reciclados, frequentemente, estão focados na utilização de polímeros comuns como polipropileno

(ROKBI *et al.*, 2020) e polietileno (MORENO; HIRAYAMA; SARON, 2018) como matriz polimérica e poucos trabalhos abordam polímeros de engenharia. Entretanto, os polímeros de engenharia, como o ABS, são termoplásticos de alto desempenho com propriedades superiores às dos polímeros comuns. Portanto, o desenvolvimento de compósitos utilizando esse tipo de matriz polimérica é uma alternativa para mitigar o problema da diminuição das propriedades mecânicas resultantes do processo de reciclagem mecânica e, ao mesmo tempo, reinserir um material de maior valor agregado na cadeia produtiva (CHAUHAN; KÄRKI; VARIS, 2019).

Na literatura são reportados alguns estudos envolvendo compósitos de ABS como matriz, principalmente na área de manufatura aditiva. Dentre os materiais utilizados como fase dispersa nesse tipo de matriz podemos citar as fibras de carbono e aramida, que podem ser utilizadas como fase dispersa na matriz de ABS resultando no aumento da estabilidade térmica e auxiliando na ductilidade do material (WANG *et al.*, 2019a); e as fibras de bananeira que podem melhorar a capacidade de resistência mecânica da matriz de ABS reciclada (SINGH; KUMAR; RANJAN, 2019).

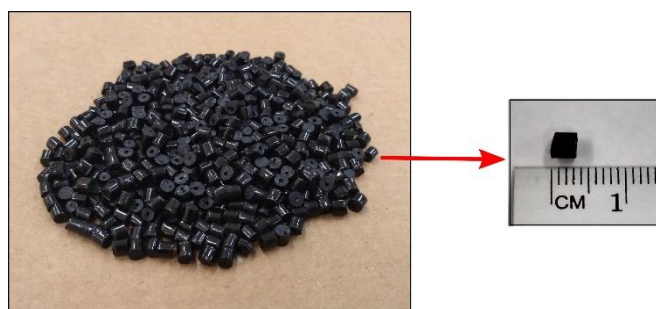
Embora apresentem grande potencial, ainda são poucos os estudos relacionados ao desenvolvimento de compósitos de ABS reciclado utilizando fibras vegetais, principalmente na forma de tecidos (HOSOKAWA *et al.*, 2021). Por isso, este capítulo apresenta nas próximas seções o desenvolvimento de compósitos de ABS reciclado com tecidos de fibras de juta e algodão com diferentes características.

### **3.3. Parte experimental**

#### *3.3.1. Materiais*

Para a moldagem foi utilizado como matriz o ABS reciclado (rABS), fornecido por uma empresa situada na cidade de Sorocaba/SP, a qual coleta as peças descartadas dos equipamentos eletrônicos e realiza um pré-processamento para transformar o terpolímero em *pellets* (grânulos) (Figura 16).

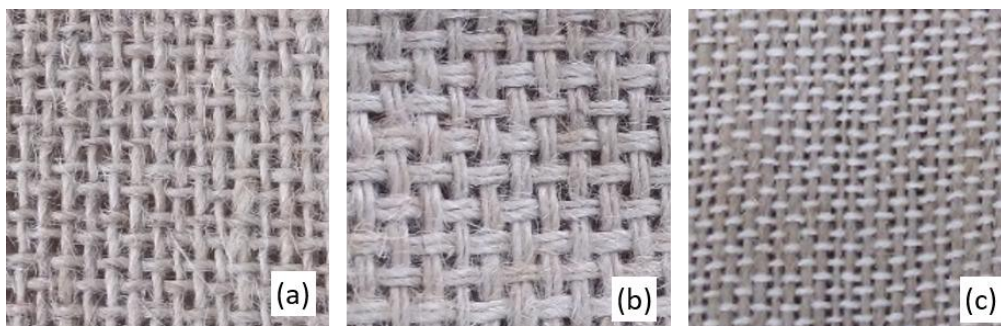
**Figura 16 - Terpolímero de ABS reciclado**



Fonte: Autoria própria (2024)

Como fase dispersa, foram utilizados três tipos bidirecionais de tecidos de fibras de juta, no qual foram abordados no capítulo 2: I) tecido de fibras de juta com trama simples (Figura 17a) - T1; II) um tecido de fibras de juta com trama dupla (Figura 17b) - T2; e III) um tecido híbrido composto por fibras de juta trama simples (orientado a  $0^\circ$ ) e fibras de algodão trama simples (orientados a  $90^\circ$ ) (Figura 17c) – T3.

**Figura 17 - Fotografias dos tecidos utilizados: (a) T1, (b) T2 e (c) T3**



Fonte: Autoria própria (2024)

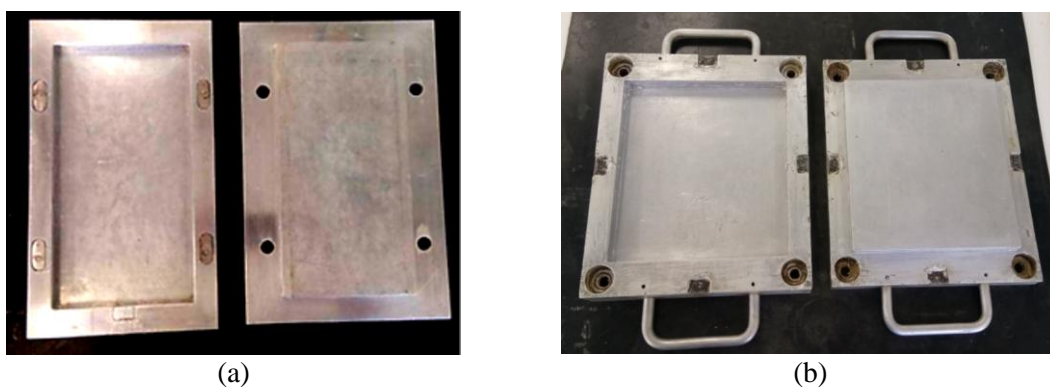
### 3.3.2. Moldagem do rABS e dos compósitos

Os tecidos foram cortados nas dimensões dos moldes para tração (127 mm x 250 mm) (Figura 18a) e flexão/impacto (160 mm x 180 mm) (Figura 18b). Foram utilizados moldes diferentes devido a diferença de comprimento e espessura na placa moldada que, posteriormente, originariam corpos de prova seguindo as normas ASTM específicas. Para facilitar a desmoldagem, um desmoldante a base de cera de carnaúba e derivados de petróleo foi aplicado nos moldes. O ABS reciclado (rABS) foi pesado em uma balança analítica; metade da quantidade pesada foi inserida no molde e depois foi

acomodado o tecido de juta, completando o molde com o restante da matriz polimérica, e formando uma estrutura do tipo “sanduíche” (Figura 19).

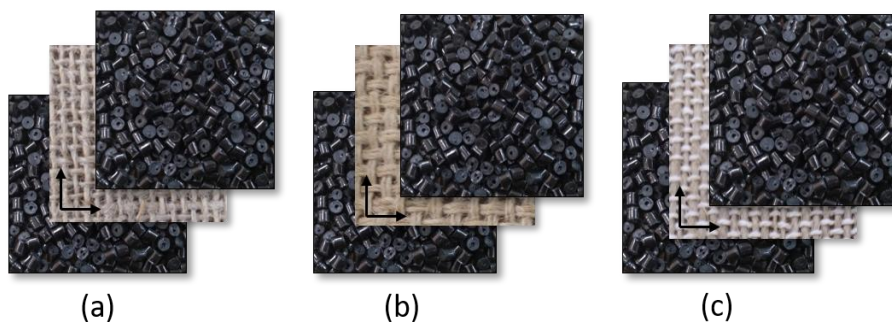
O processo de moldagem empregado neste trabalho foi do tipo compressão a quente, o qual é utilizado nos setores automobilístico e aeroespacial, e possibilita a produção de peças em geometrias variadas utilizando reforço na forma de tecido. Os compósitos foram moldados utilizando uma prensa hidráulica com aquecimento a 200°C, por 30 minutos com força de moldagem de 6 toneladas. As condições de moldagem foram definidas após estudos prévios. Na sequência, foram deixados resfriar até atingir a temperatura ambiente, quando as placas foram desmoldadas. As espessuras das placas moldadas foram de 3 mm para o ensaio de tração e 5 mm para o ensaio de flexão/impacto.

**Figura 18 - Fotografias dos moldes metálicos para a moldagem de placas para confecção de corpos de prova de: (a) tração; (b) flexão**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

**Figura 19 - Esquema de preparação dos compósitos de rABS reforçado com: (a) T1; (b) T2; (c) T3**

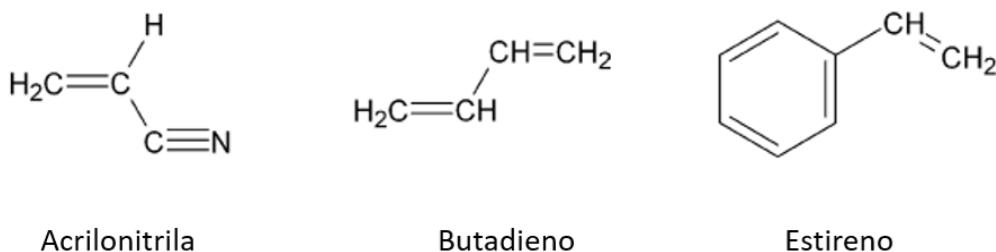


Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

### 3.3.3. Espectroscopia de Absorção na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A identificação do terpolímero ABS reciclado (rABS) utilizado neste estudo foi feita pela espectroscopia de absorção com transformada de Fourier (FTIR) em um equipamento Spectrum 65 (Perkin Elmer), com modo ATR. Os espectros de absorção foram analisados na faixa de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$  com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e 32 scans. Na Figura 20 está representada a estrutura química dos monômeros que compõe o terpolímero ABS.

**Figura 20 - Estrutura química dos monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno**



Fonte: (MCKEEN, 2010)

### 3.3.4. Termogravimetria (TG)

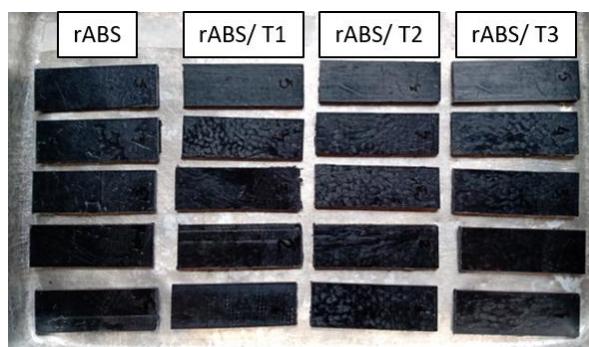
A variação de massa em função da temperatura do ABS reciclado (rABS) foi avaliada. As medições foram realizadas com amostras de 8g em cadinho de platina e inseridas em uma termobalança (Shimadzu, TGA50) em atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo de 50 mL/min, intervalo de temperatura de 25 a 800°C e razão de aquecimento de 10°C/min.

### 3.3.5. Ensaio de absorção de água

Para realização do ensaio de absorção de água foram confeccionados corpos de prova, conforme a norma ASTM D570, com as dimensões: 25 mm de largura x 76,2 mm de comprimento x 3 mm de espessura. Inicialmente, os corpos de prova (Figura 21) foram secos em estufa, da marca Nova Ética, a 105°C por 24 horas. Após a secagem, os corpos de prova foram pesados em balança analítica e, em seguida, imersos em água destilada (Figura 22a) a temperatura ambiente.

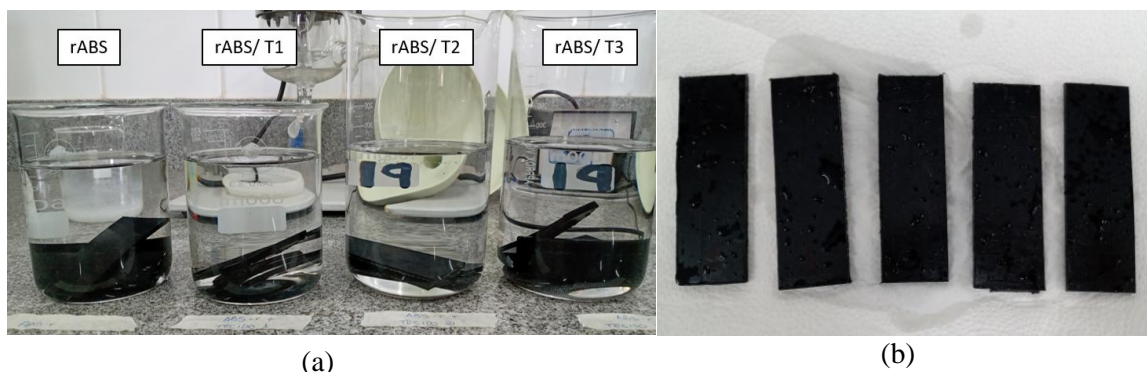
Em tempos pré-determinados os corpos de prova foram retirados da água, secos com papel toalha (Figura 22b), pesados na balança analítica e novamente colocados no banho. Esse processo foi repetido por 63 dias, quando se observou que não houve variação significativa da massa.

**Figura 21 - Fotografias dos corpos de prova do rABS e compósitos confeccionados para o ensaio de absorção de água**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

**Figura 22 - Fotografias de corpos de prova: (a) imersos em água destilada; (b) exemplo de amostras retiradas após imersão**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

Ao final do ensaio, foi plotada a curva de absorção percentual *versus* o tempo de imersão. O percentual de absorção de água é calculado de acordo com a Equação 3. A curva representa a média de cinco corpos de prova.

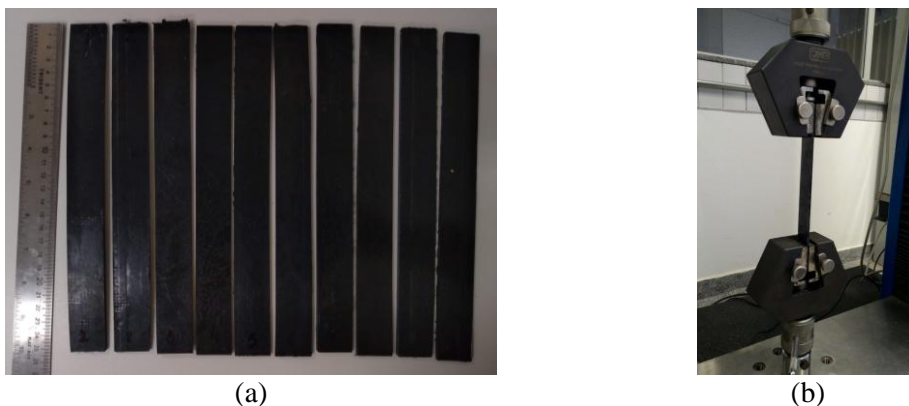
$$M(\%) = \frac{w_i - w_f}{w_f} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

onde,  $M(\%)$  é a absorção de água em %;  $w_i$  é a massa inicial do corpo de prova e  $w_f$  é a massa final do corpo de prova.

### 3.3.6. Ensaios mecânicos

Os ensaios de tração da matriz polimérica de ABS reciclado (rABS) e dos compósitos foram realizados em temperatura ambiente. Os corpos de prova foram (Figura 23a) cortados nas dimensões de 25mm de largura x 250 mm de comprimento, segundo a norma ASTM D3039 e testados em máquina universal para ensaios mecânicos (EMIC DL 30000) (Figura 23b) utilizando célula de carga de 2000 kgf e velocidade de ensaio de  $2,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

**Figura 23 - Fotografias dos: (a) corpos de prova; (b) corpo de prova no equipamento para ensaio de tração**



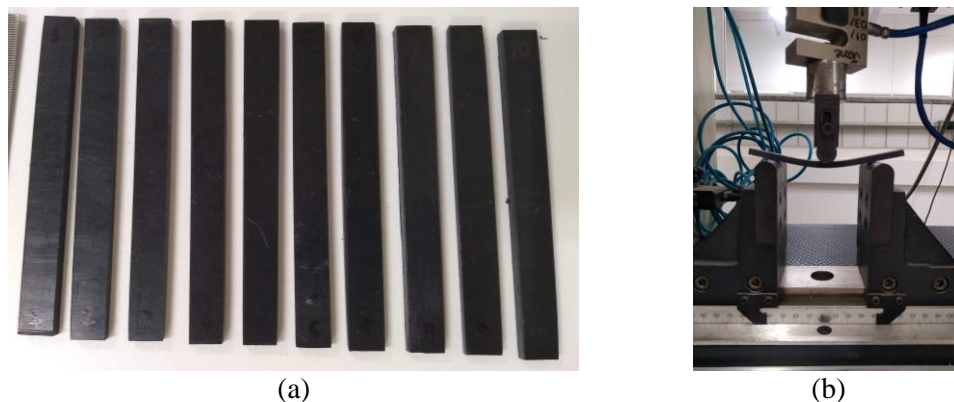
Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

Para os ensaios de flexão de três pontos foram confeccionados corpos de prova nas dimensões de 12,7 mm de largura x 127 mm de comprimento (Figura 24a), de acordo com a norma ASTM D790. Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina para ensaios mecânicos (EMIC DL 10000) (Figura 24b). A célula de carga utilizada foi de 500kgf, a distância entre os apoios foi de 83,2 mm e a velocidade do ensaio foi de  $2,2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , a qual foi determinada a partir da Equação 4:

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (\text{Equação 4})$$

onde,  $R$  é a velocidade do ensaio (mm/min),  $L$  é a distância entre os apoios (mm);  $d$  é a espessura média dos corpos de prova (mm) e  $Z$  é a taxa de deformação 0,01 (mm/mm/min).

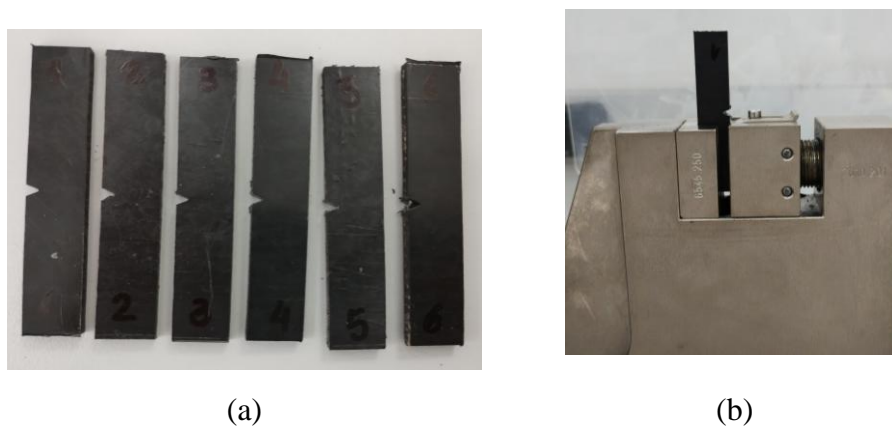
**Figura 24 - Fotografias dos: (a) corpos de prova; (b) corpo de prova no dispositivo de ensaio de flexão**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

A avaliação das propriedades de impacto dos materiais foi realizada de acordo com a norma ASTM D256, cujas dimensões dos corpos de prova foram de 63,5 x 12,7 x 4 mm<sup>3</sup> e entalhe em “V” de 2,54 mm. O ensaio de impacto foi realizado em um equipamento de impacto pendular da marca Instron modelo CEAST 9050, com pêndulo de 1J na configuração de impacto Izod (Figura 25b).

**Figura 25 - Fotografias de (a) corpos de prova após entalhe; (b) corpo de prova no dispositivo de ensaio de impacto na configuração Izod**



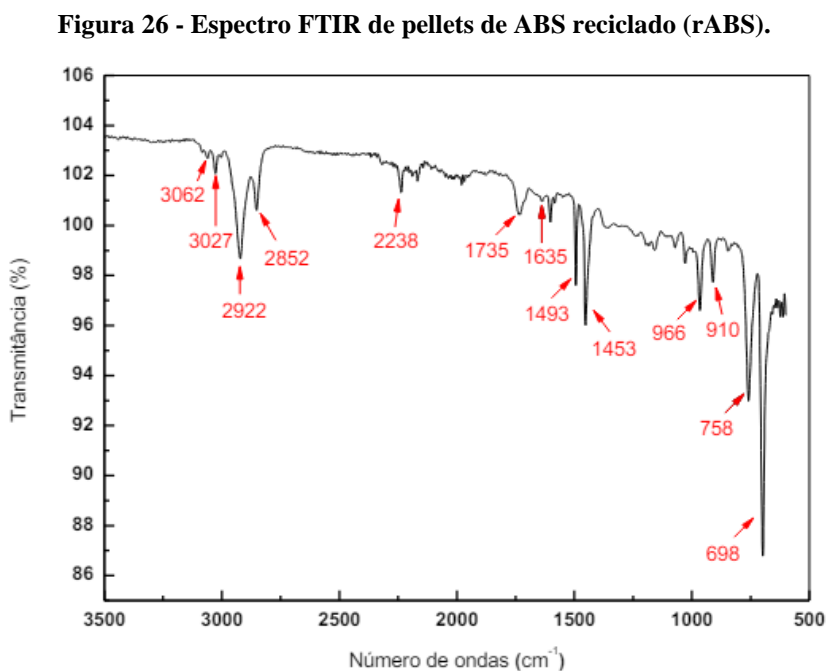
Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

Posteriormente, foi avaliada a influência dos diferentes tecidos de fibras de juta nas propriedades mecânicas dos compósitos através da análise de variância (ANOVA) e pelo teste de Tukey. Os resultados foram considerados estatisticamente significativos se os valores de p fossem  $<0,05$ .

### 3.4. Resultados e discussão

#### 3.4.1. Espectroscopia do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

O ABS é um terpolímero que se caracteriza por ter uma fase borrachosa (butadieno) dispersa em uma matriz de SAN. Assim, o que determina se a amostra analisada é de fato o ABS é a presença de grupos nitrila ( $C\equiv N$ ) (Figura 20), o qual é responsável por conferir rigidez e resistência química. A Figura 26 apresenta o espectro de FTIR e na Tabela 6 estão apresentadas as principais bandas presentes no espectro do ABS reciclado e suas respectivas atribuições.



**Tabela 6 - Bandas presentes no espectro do ABS reciclado e suas respectivas atribuições**

Atribuições	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )
vibrações de estiramento de C-H aromático	3200-3000
vibrações de estiramento de C-H alifático	3000-2800
vibrações de estiramento da insaturação do grupo ciano	2237
vibrações de estiramento da ligação dupla do butadieno	1638
vibrações de estiramento da ligação C=O	1735
deformações angulares do estireno	1500-1400
vibração de estiramento do anel aromático do estireno	1495
deformação angular do alceno trans do butadieno	965
deformação angular do alceno vinil do butadieno	910
Deformação angular de C-H aromático	760-700

Fonte: Adaptado de (LI *et al.*, 2017; OLONGAL *et al.*, 2019)

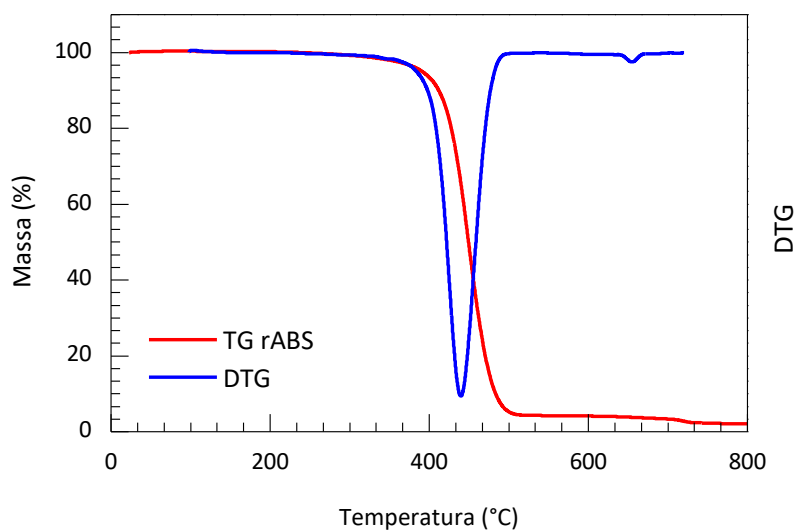
No espectro (Figura 26) é possível observar vibrações de estiramento característica do grupo ciano da acrilonitrila em 2238cm<sup>-1</sup>. A absorção em 1635cm<sup>-1</sup> representa as vibrações de estiramento da ligação dupla do butadieno, enquanto a vibração de estiramento do anel aromático do estireno aparece em 1493cm<sup>-1</sup>. Adicionalmente, vibrações de estiramento de C-H aromático e alifático do ABS podem ser vistas na faixa de 3200-3000cm<sup>-1</sup> e 3000-2800cm<sup>-1</sup>, respectivamente. No intervalo de 1500-1400cm<sup>-1</sup> é possível observar deformações angulares do estireno, e em 966cm<sup>-1</sup> houve a absorção correspondente a deformação angular do alceno trans do butadieno (OLONGAL *et al.*, 2019).

A decomposição do ABS reciclado pode ser avaliada pela banda de absorção da carbonila, a qual ocorre em 1735 cm<sup>-1</sup>. A absorção da radiação UV inicia reações químicas fotooxidativas, que geram grupos químicos como carbonila e hidroperóxidos e provocam reações de cisão de cadeia e/ou de reticulação (SANCHEZ; FERREIRA; FELISBERTI, 1999).

#### 3.4.2. Termogravimetria (TG)

Na Figura 27 estão representadas as curvas TG e DTG do ABS reciclado (*pellets de rABS*). Os valores dos resultados, como a temperatura inicial de decomposição (Ti), temperatura final (Tf), temperatura onde a perda de massa é máxima (Tmax) e porcentagem de resíduo a 800°C (%), estão descritos na Tabela 7.

**Figura 27 - Curvas TG e DTG do rABS (pellets)**



**Tabela 7 - Valores dos resultados das curvas da análise de TG e DTG do ABS reciclado**

<b>Ti (°C)</b>	<b>Tf (°C)</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>Porcentagem de resíduo a 800°C (%)</b>
407,41	486,86	449,36	2,08

Considerando a Figura 27 e a Tabela 7 é possível observar que o processo de decomposição do ABS reciclado ocorre em apenas um estágio de perda de massa, o qual iniciou em aproximadamente 407°C até 486°C sendo a taxa máxima de perda de massa em 449°C. Os resultados foram superiores aos encontrados na literatura por Kurek *et al.* (2018), na qual a temperatura inicial e final de decomposição do ABS virgem foi, respectivamente, de 350°C e 480°C, com perda máxima em 420°C. No ABS reciclado analisado por Hosokawa (2017), a temperatura de decomposição iniciou em 371,7°C e terminou em 475,5°C, com perda máxima em 427,2°C. A literatura reporta que as reações de decomposição do polibutadieno e estireno se iniciam em 340°C e da acrilonitrila em torno de 400°C. Ao final da análise (800°C) foi detectada uma porcentagem residual de 2%, a qual pode ser atribuída a componentes carbonáceos formados (KUREK *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2002).

A identificação da presença de impurezas nos polímeros reciclados é necessária para garantir a sua aplicabilidade na fabricação de novos produtos. A mistura de diferentes tipos de polímeros ou a presença de umidade e outros compostos de baixa massa molar pode ocasionar perda de propriedades mecânicas do material (RIBEIRO;

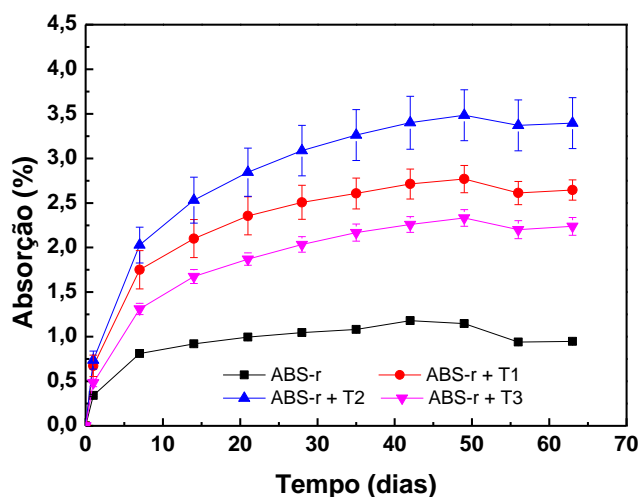
DOMINGUES JR.; RIEGEL, 2012). No caso deste trabalho, na curva TG pode ser observado que não há presença de outros compostos de baixa massa molar, nem umidade e nem outros polímeros além do ABS reciclado, comprovando, assim, a qualidade do material reciclado.

Adicionalmente, a faixa de temperatura de decomposição do ABS reciclado se mostrou adequada para ser moldado por processo simples como o de compressão a quente utilizado neste trabalho.

### 3.4.3. Ensaio de absorção de água

Os perfis de absorção de água do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2 e rABS/1T3 estão apresentados na Figura 28. Os perfis comparam o incremento percentual médio de massa e desvio padrão das amostras em relação ao tempo de imersão em dias.

Figura 28 - Absorção de água (%) em função do tempo (dias) do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2 e rABS/1T3



A partir dos resultados (Figura 28) observou-se que a curva apresenta uma região linear para os primeiros sete dias, na qual a absorção de água ocorre de maneira mais rápida. Esse fenômeno pode estar associado à mobilidade das moléculas de água entre os micro vazios das cadeias poliméricas. Adicionalmente, vazios também podem ter sido formados durante o processo de moldagem por compressão a quente (SAHU;

GUPTA, 2020). Com o passar do tempo, a inclinação da curva é modificada tendendo a se estabilizar após 40 dias representando o nível de saturação de umidade.

O percentual de absorção de água foi maior nos compósitos do que na matriz rABS (1,2%), isso se deve principalmente à natureza hidrófila das fibras vegetais (BALAN; RAVICHANDRAN, 2020). Além disso, deve ser considerada a qualidade da interface entre a fibra e matriz, pois quanto maior a adesão interfacial, menor a absorção de água (NEGRÃO; PINTO; SILVA, 2020). Em compósitos contendo fibras vegetais, a absorção de água ocorre pela superfície da fibra e, também, por capilaridade através do lúmen cuja função é canalizar água no interior da fibra, causando o seu inchamento (MOUDOOD *et al.*, 2019). No caso deste trabalho, os corpos de prova não tiveram as laterais seladas, assim simulou-se uma condição mais agressiva de exposição a umidade.

Comparando os diferentes tecidos, observou-se que os compósitos contendo somente fibras de juta (rABS/1T1 e rABS/1T2) absorveram maiores porcentagens de água (2,8% e 3,5%, respectivamente) do que o compósito rABS/1T3 (2,3%). As fibras vegetais são constituídas de celulose, lignina e hemicelulose (polioses), dentre as quais a hemicelulose é a principal responsável pela absorção de água, pois é caracterizada pelo alto grau de ramificação, responsável pela sua estrutura não cristalina, que resulta em um comportamento altamente hidrofílico. No caso, as fibras de juta contém maior quantidade de hemicelulose (18-22%) em sua estrutura do que o algodão (3%) (LIVANI *et al.*, 2023; SAHU; GUPTA, 2020).

Ressalta-se que o teste de absorção de água por imersão realizada nos materiais é uma situação superestimada. No caso deste trabalho, trata-se de uma matriz hidrofóbica e a aplicação sugerida não envolve exposição em água por tempo prolongado.

#### 3.4.4. *Ensaio mecânicos*

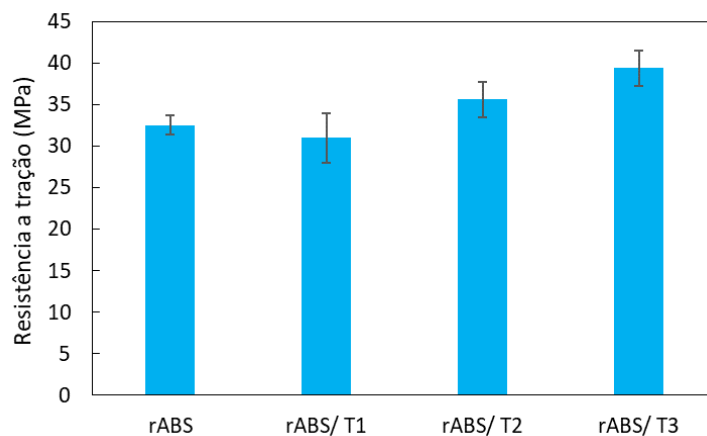
Na Tabela 8 estão os resultados médios e desvio padrão da resistência à tração, deformação máxima e módulo de elasticidade do rABS e dos compósitos rABS/T1, rABS/T2 e rABS/T3. A Figura 29 apresenta a variação das propriedades de tração do rABS e dos compósitos em relação ao tipo de tecido de fibras de juta.

**Tabela 8 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de tração do rABS e dos compósitos rABS/T1, rABS/T2 e rABS/T3**

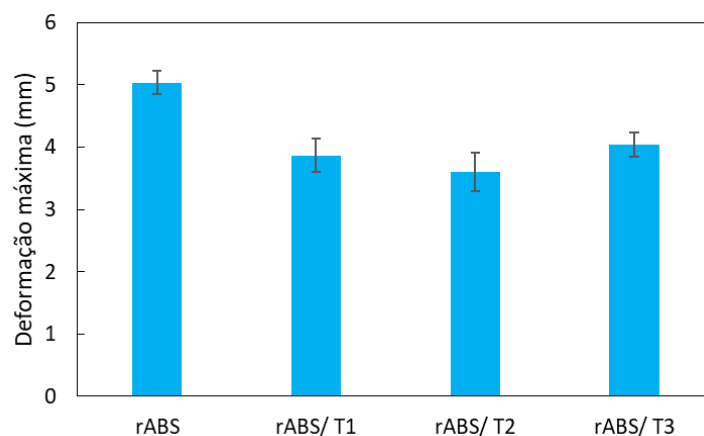
Material	Resistência à tração (MPa)	Deformação máxima (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
rABS	32,56±1,14 <sup>c*</sup>	5,04±0,18 <sup>a</sup>	1,21±0,09 <sup>b</sup>
rABS/ T1	31,00±2,99 <sup>c</sup>	3,87±0,27 <sup>bc</sup>	1,41±0,14 <sup>b</sup>
rABS/ T2	35,65±2,14 <sup>b</sup>	3,61±0,31 <sup>c</sup>	2,27±0,19 <sup>a</sup>
rABS/ T3	39,41±2,14 <sup>a</sup>	4,04±0,20 <sup>b</sup>	2,16±0,35 <sup>a</sup>

Médias que não apresentam a mesma letra são significativamente diferentes (Teste de Tukey com p-valor < 0,05).

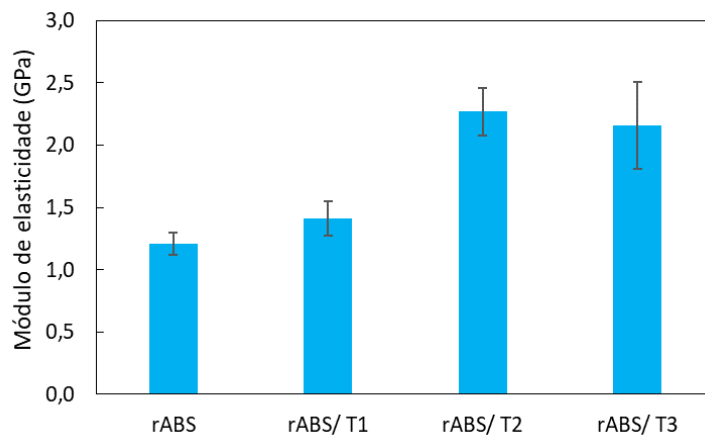
**Figura 29 - Gráficos de: (a) resistência à tração (b) deformação máxima; (c) módulo de elasticidade do rABS e dos compósitos rABS/T1, rABS/T2 e rABS/T3**



(a)



(b)



(c)

Na literatura é reportado que a resistência à tração do ABS virgem varia de 36-71,6 MPa, módulo de elasticidade 99,8 a 2413MPa e a deformação de 3 a 20% (CHACÓN *et al.*, 2019). No caso deste trabalho, a resistência à tração do ABS reciclado foi de  $32,56 \pm 1,14$  MPa (Tabela 8), valor aproximadamente 93% superior ao reportado por Budin *et al.* (2020), o qual obteve resistência à tração de 16,9 MPa para o ABS reciclado (BUDIN *et al.*, 2020).

Esses valores demonstram a qualidade do ABS reciclado utilizado neste trabalho, pois o processo de reciclagem pode promover variações nas propriedades mecânicas do ABS reciclado ocasionado por diferentes graus de cisão nas cadeias poliméricas. Consequentemente, os polímeros com diferentes massas molares possuem quantidades distintas de grupos terminais que aumentam o volume livre e a mobilidade molecular, fazendo com que as cadeias poliméricas respondam às tensões de forma distintas (BUDIN *et al.*, 2020).

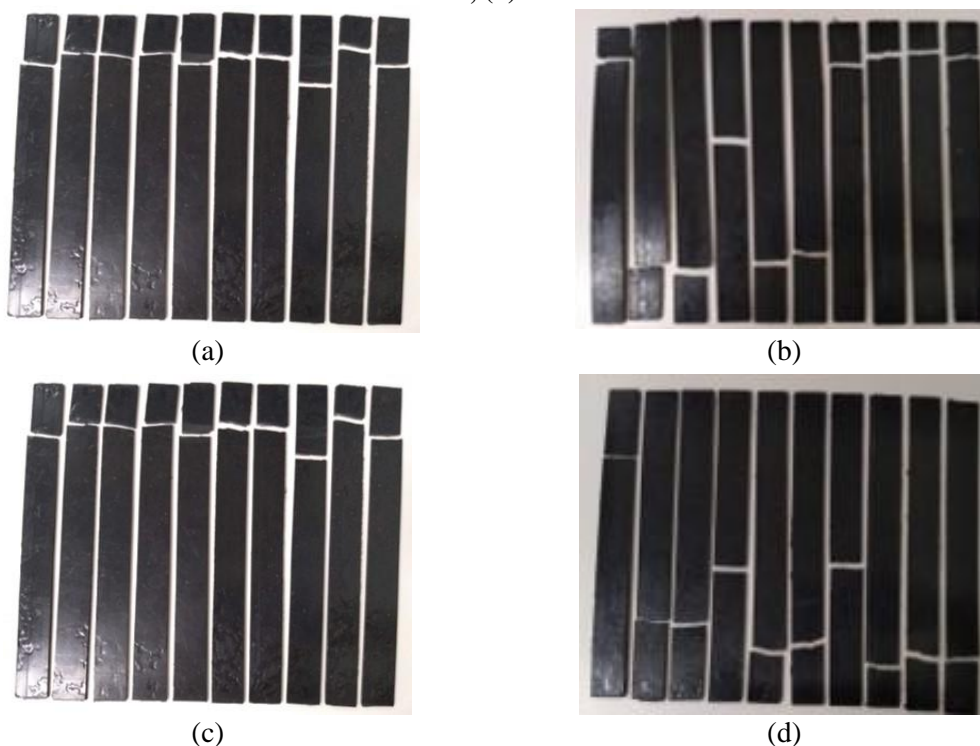
Em relação aos compósitos, de acordo com a Tabela 8, a resistência à tração do rABS/1T1 foi similar à da matriz rABS cujos valores foram  $31,00 \pm 2,99$  MPa e  $32,56 \pm$  MPa, respectivamente, ambos pertencendo ao grupo “c”. Para os demais compósitos, houve um aumento na resistência à tração de até 9,5% (rABS/1T2) e 21% (rABS/1T3) cujos valores foram  $35,65 \pm 2,14$  MPa e  $39,41 \pm 2,14$  MPa, respectivamente. As propriedades de tração dependem da estrutura das fibras; assim esse aumento na resistência à tração dos compósitos pode ser justificado pela incorporação de um tecido cujas fibras apresentam maior resistência à tração. Adicionalmente, sugere-se que o tecido T3 tenha resultado em melhor resistência à tração do que os tecidos T1 e T2, devido à maior quantidade de cordões por centímetro no T3, que auxiliou durante o esforço longitudinal.

Fatores como o aumento de defeitos na região da interface ou o descolamento entre as fases (fibra e matriz) e a presença de vazios na região interfacial entre o rABS e o tecido T1 podem ter resultado em menor resistência à tração devido a menor adesão entre as fibras de juta do tecido T1 e o rABS (CHOTIRAT; CHAOCHANCHAIKUL; SOMBATSOMPOP, 2007). Essa região interfacial pode ser fundamentada utilizando imagens de MEV; como foi observado, posteriormente, nas Figuras (35-37), que revelou o descolamento ao redor das fibras de juta.

Os valores de deformação máxima dos compósitos diminuíram em relação à matriz polimérica de ABS reciclado ( $5,04 \pm 0,18$  mm), ou seja, ocorreram decréscimos de 23,2% ( $3,87 \pm 0,27$  mm) para o compósito rABS/T1, 28,0% ( $3,61 \pm 0,31$ mm) para o compósito contendo o rABS/T2 e 19,8% ( $4,04 \pm 0,20$ mm) para o rABS/T3. A orientação das fibras influencia diretamente na resistência a tração dos compósitos, no caso as fibras orientadas a  $0/90^\circ$  permitem melhor transmissão de tensões diminuindo a deformação e contribuem para a rigidez do material (ELFALEH *et al.*, 2023).

Na Figura 30 podem ser observados os corpos de prova após serem submetidos ao ensaio de tração. Assim, nota-se que todos os corpos de prova apresentaram ruptura completa.

**Figura 30 - Fotografia dos corpos de prova após o ensaio de tração. (a) rABS; (b) rABS/T1; (c) rABS/T2; (d) rABS/T3**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

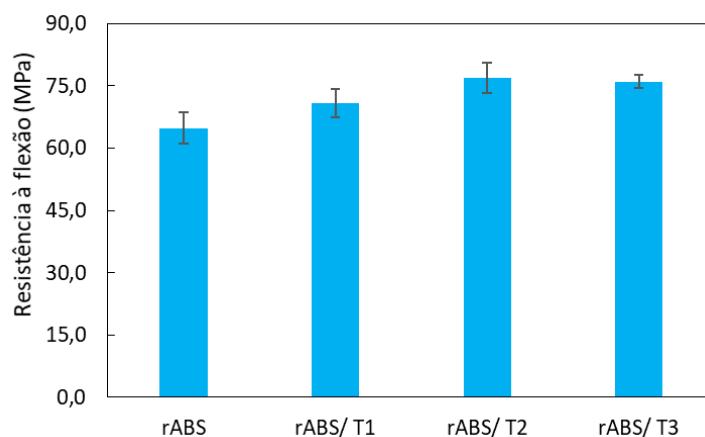
Na Tabela 9 estão descritos os resultados médios e desvio padrão da resistência à flexão, deformação máxima e módulo de elasticidade em flexão do rABS e dos compósitos rABS/T1, rABS/T2 e rABS/T3. A Figura 31 apresenta a variação das propriedades de flexão do rABS e dos compósitos em relação ao tipo de tecido de fibras de juta.

**Tabela 9 - Resultados médios e desvio padrão dos ensaios de flexão da matriz rABS e dos compósitos rABS/T1, rABS/T2 e rABS/T3**

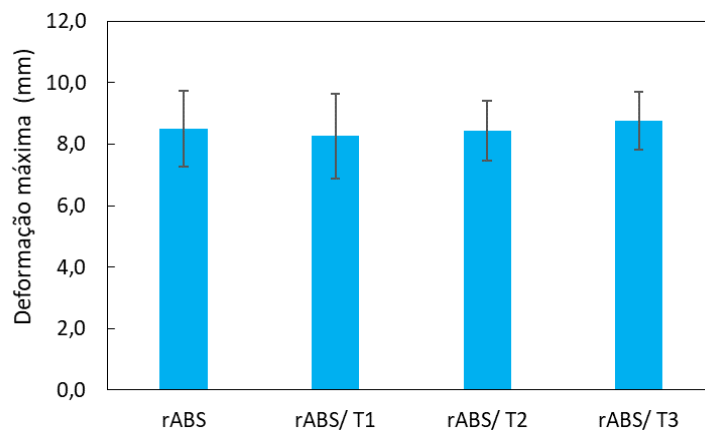
Material	Resistência à flexão (MPa)	Deformação máxima (mm)	Módulo de elasticidade (MPa)
rABS	64,80±3,75 <sup>C*</sup>	8,50±1,24 <sup>A</sup>	2,63±0,18 <sup>A</sup>
rABS/ T1	70,82±3,48 <sup>B</sup>	8,27±1,38 <sup>A</sup>	3,01±0,16 <sup>A</sup>
rABS/ T2	76,90±3,66 <sup>A</sup>	8,43±0,97 <sup>A</sup>	3,21±0,20 <sup>A</sup>
rABS/ T3	76,02±1,63 <sup>A</sup>	8,77±0,95 <sup>A</sup>	3,15±0,15 <sup>A</sup>

\*Médias que não apresentam a mesma letra são significativamente diferentes (Teste de Tukey com p-valor < 0,05).

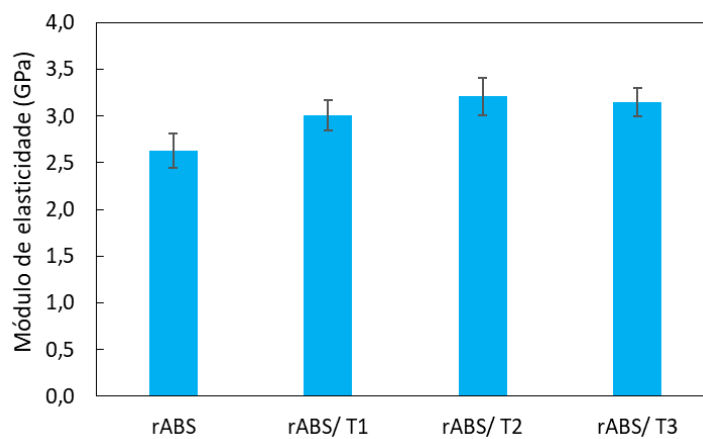
**Figura 31 - Gráficos dos resultados dos ensaios de flexão do rABS e dos compósitos**



(a)



(b)

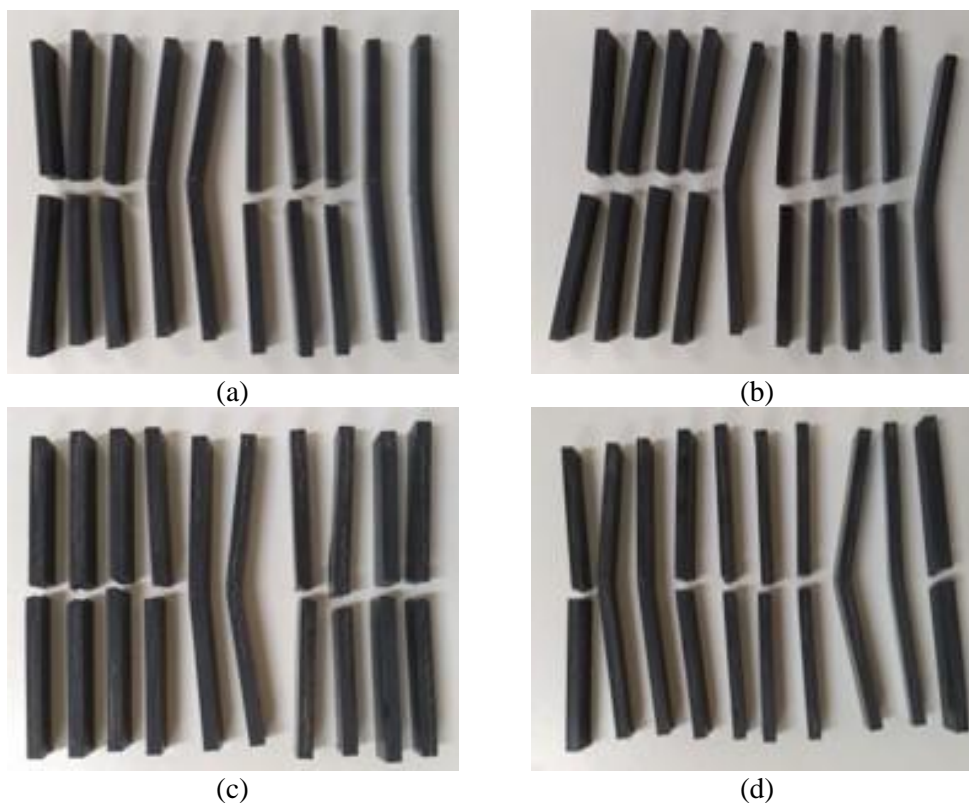


(c)

De acordo com a Tabela 9, houve aumento nos valores de resistência à flexão dos compósitos em relação a matriz. Os valores foram, respectivamente,  $64,80 \pm 3,75$  MPa para o rABS,  $70,82 \pm 3,48$  MPa (aumento de 9,4%) para rABS/T1,  $76,90 \pm 3,66$  MPa (aumento de 18,7%) para rABS/T2 e  $76,02 \pm 1,63$  MPa (aumento de 17,3%) para rABS/T3, indicando que a quantidade de fibras favoreceu a maior resistência à flexão. No caso do compósito rABS/T2 que apresentou o maior valor de resistência à flexão, o tecido confeccionado com trama dupla também colaborou para o aumento na resistência do compósito. Isso porque a lignina é responsável por catalisar reações entre as hidroxilas das fibras vegetais e os grupos epóxidos do polibutadieno do ABS (FONSECA; WALDMAN; DE PAOLI, 2021). Já a deformação máxima em flexão se manteve praticamente a mesma, tanto para a matriz (rABS) quanto para os compósitos.

O módulo de elasticidade em tração e flexão (Figuras 29c e 31c, respectivamente) de compósitos reforçados com fibras são influenciados pelo alto valor do módulo de elasticidade das fibras de juta e algodão. A rigidez das fibras vegetais está associada à lignina presente nas fibras vegetais. (CHOTIRAT; CHAOCHANCAIKUL; SOMBATSOMPOP, 2007; VIGNESHWARAN *et al.*, 2020). Os compósitos apresentaram aumento de até 78% (rABS/T2) no módulo de elasticidade em tração e 22% (rABS/T2) no módulo de elasticidade em flexão.

Na Figura 32 podem ser observados os corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de flexão. Assim, nota-se alguns corpos de prova não apresentaram ruptura, ou seja, havendo apenas a deformação, a qual não foi alterada de forma significativa com a incorporação dos tecidos.

**Figura 32 - Fotografias dos corpos de prova após o ensaio de flexão**

Fonte: A autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

Em um trabalho, Fonseca *et al.* (2021) avaliaram a influência de um agente compatibilizante (copolímero aleatório de estireno e anidrido maleico, nomeado de XIBOND™) comercial nas propriedades mecânicas (tração e flexão) de compósitos de ABS reforçados com fibras de celulose. Os resultados relatados mostraram que 30% em massa de fibras de celulose foram capazes de promover uma melhora de até 20% nas propriedades mecânicas de tração e flexão do ABS sem compatibilizante. Já com a adição do compatibilizante, houve uma redução na adesão entre as fibras e a matriz resultando em menores valores de propriedades mecânicas (FONSECA; WALDMAN; DE PAOLI, 2021).

Durante o processo de extrusão do ABS, pode ocorrer a oxidação de segmentos de polibutadieno, gerando epóxidos que reagem com as hidroxilas das fibras vegetais para formar ligações éter. No caso de compatibilizantes a base de poliestireno pode haver uma competição entre as ligações das fibras vegetais em segmentos do poliestireno onde há domínios ativos e o polibutadieno do ABS, havendo uma diminuição nas propriedades mecânicas (FONSECA; WALDMAN; DE PAOLI, 2021).

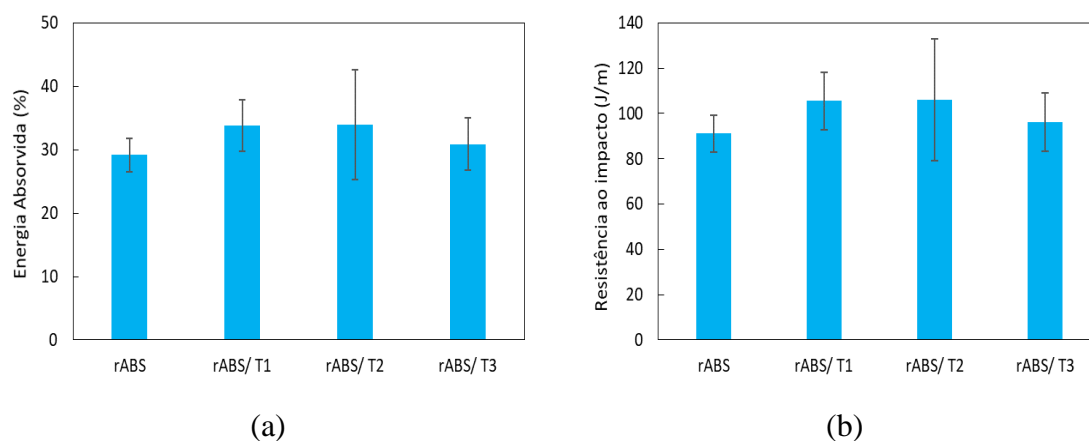
Na Tabela 10 estão apresentados os valores médios das propriedades após os ensaios de impacto. Na Figura 33 (a-b) estão os gráficos dos resultados de absorção de energia e resistência ao impacto do rABS, e dos compósitos moldados com os tecidos de fibras vegetais. É possível observar que a resistência ao impacto do rABS foi de  $91,15 \pm 8,17$  J/m, valor 75% superior ao reportado pelos autores Dame *et al.* (2016), que obtiveram valor de resistência ao impacto de 52,0 J/m para o ABS reciclado.

**Tabela 10 - Resultados dos valores médios dos ensaios de impacto e desvio padrão do rABS, rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3**

<b>Material</b>	<b>Energia Absorvida* (%)</b>	<b>Resistência ao impacto* (J/m)</b>
<b>rABS</b>	$29,18 \pm 2,62$ <sup>A</sup>	$91,15 \pm 8,17$ <sup>A</sup>
<b>rABS/1T1</b>	$33,79 \pm 4,02$ <sup>A</sup>	$105,54 \pm 12,56$ <sup>A</sup>
<b>rABS/1T2</b>	$33,93 \pm 8,64$ <sup>A</sup>	$106,00 \pm 27,00$ <sup>A</sup>
<b>rABS/1T3</b>	$30,85 \pm 4,12$ <sup>A</sup>	$96,35 \pm 12,85$ <sup>A</sup>

\* Médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si no nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

**Figura 33 - Gráfico da (a) absorção de energia (%); (b) resistência ao impacto (J/m) do rABS, rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3**

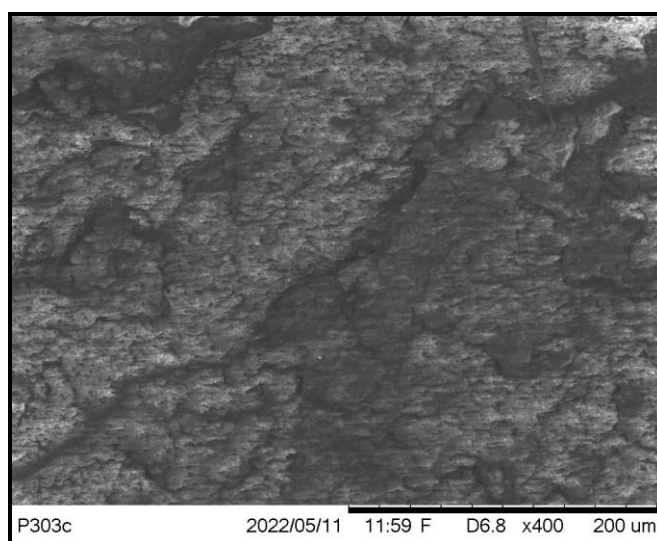


Em relação aos compósitos, os tecidos de fibras de juta (T1, T2 e T3) não influenciaram na resistência ao impacto do rABS. Estatisticamente, todos os materiais estão no agrupamento “a”.

### 3.4.5. Microscopia eletrônica de varredura - MEV

Na Figura 34 está apresentada a imagem de MEV obtida da superfície da fratura do corpo de prova de rABS, após o ensaio de tração realizado. Nesta imagem pode ser observada um tipo de fratura de material dúctil, caracterizando a presença de diversos planos de fratura.

**Figura 34 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do rABS  
Aumento de 400x**

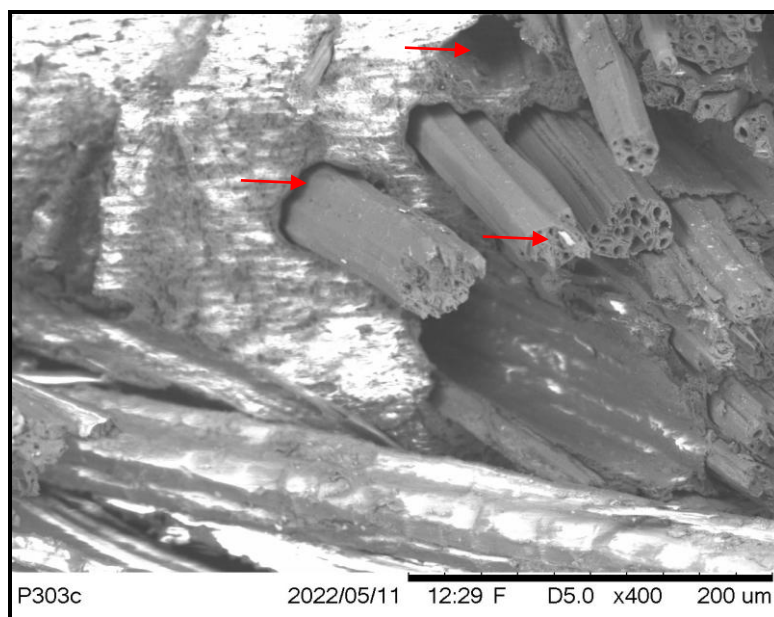


Fonte: Autoria própria (2024)

Durante o processo de reciclagem do ABS podem ocorrer a perda de pequenas moléculas voláteis como lubrificantes e a mistura de impurezas no material reciclado, o que pode induzir também, uma perda de propriedades mecânicas (BEIGBEDER *et al.*, 2013). No caso deste trabalho não foi observado a presença de impurezas na superfície da amostra do rABS após o ensaio de tração, como pode ser visto na Figura 34, o que corrobora com os resultados obtidos no ensaio de TG no qual apareceu somente um pico de perda de massa pertencente a decomposição do rABS. Isso pode estar associada à qualidade do processo de reciclagem pelo qual o material foi submetido, contribuindo posteriormente para a fabricação de produtos de melhor qualidade.

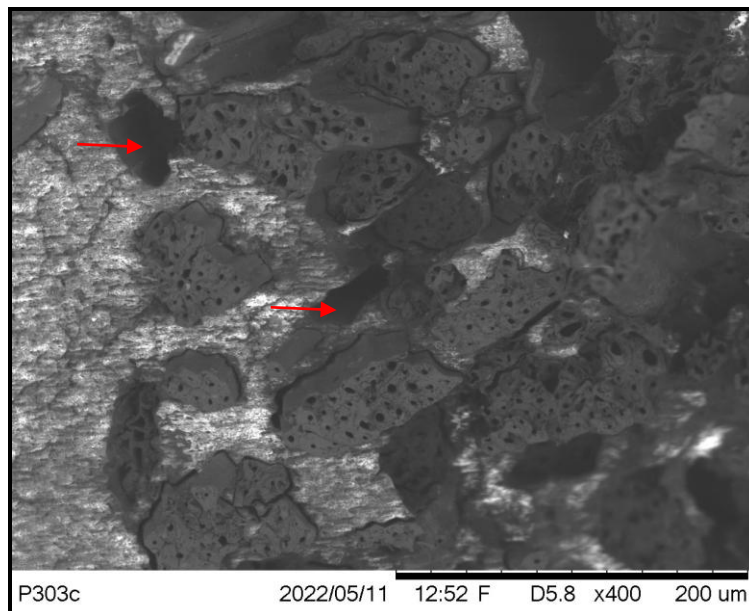
Na Figura 35, 36 e 37 estão apresentadas as imagens de MEV obtidas da superfície da fratura após os ensaios de tração realizados nos compósitos contendo somente fibras vegetais rABS/1T1, rABS/1T2 e rABS/1T3, respectivamente.

**Figura 35 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do rABS/1T1. Aumento de 400x**



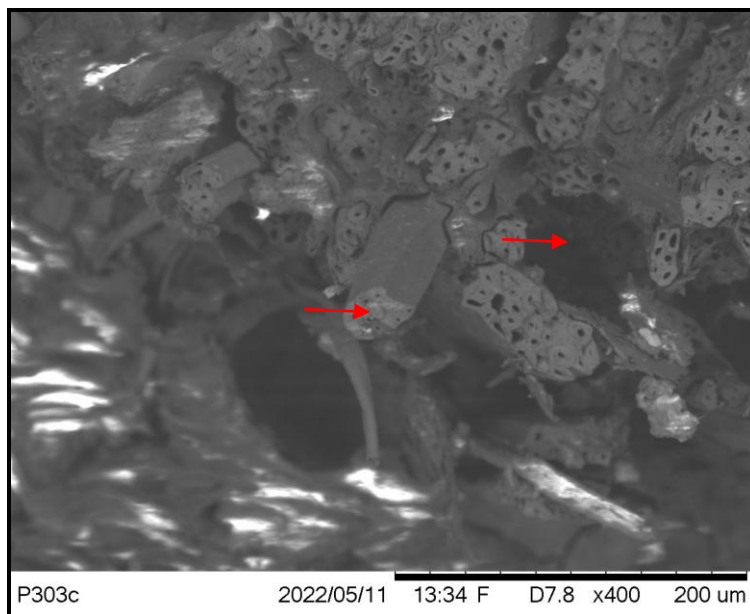
Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 36 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do rABS/1T2. Aumento de 400x**



Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 37 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração dos compósitos rABS/1T3. Aumento de 400x**



Fonte: Aatoria própria (2024)

Nas Figuras 35, 36 e 37 estão indicados, através das setas na cor vermelha, alguns mecanismos de falhas mecânicas como arrancamento de fibras (*pull out*), quebra de fibras, lacunas entre as fibras e a matriz. Isso demonstra a baixa adesão interfacial entre as fibras e a matriz, o que reflete nos valores obtidos de resistência a tração. O tratamento químico dos tecidos de fibras vegetais poderia ser uma alternativa para melhorar a adesão interfacial. Wang *et al.* (2019) avaliaram a influência do tratamento químico com hidróxido de sódio das fibras de juta unidirecionais nas propriedades mecânicas dos compósitos com resina epóxi e os resultados indicaram que houve aumento de até 230% no módulo de elasticidade em tração dos compósitos com as fibras de juta tratadas (WANG *et al.*, 2019b).

### 3.5. Conclusão Parcial

A partir do estudo deste capítulo foi verificado que apesar de se tratar de um material reciclado, o processo de reciclagem pelo qual o ABS foi submetido resultou em um material reciclado de qualidade, provavelmente, com grau de pureza similar ao do ABS virgem. Além disso, diferentemente do que se esperava de um material reciclado, os valores das propriedades mecânicas do ABS reciclado não sofreram decréscimos significativos quando comparados com o ABS virgem reportado na literatura, demonstrando que o processo de reciclagem não ocasionou decomposição intensa ao ABS.

Os tecidos que se mostraram mais adequados para promover o aumento nas propriedades de tração e flexão foram os tecidos T2 e T3. A gramatura e a arquitetura (ou arranjo) do tecido tem influência nas propriedades finais do compósito, uma vez que tecidos de maior gramatura e com trama dupla (T2) são capazes de promover aumento no valor da resistência à flexão do material, enquanto que tecidos híbridos com maiores quantidades de cordões de juta e algodão por centímetro aumentam a resistência à tração dos compósitos. Adicionalmente, o algodão atuou como um elemento de reforço adicional, auxiliando no alinhamento dos cordões de fibras de juta. As combinações feitas neste trabalho superaram as expectativas, uma vez que os materiais desenvolvidos não apresentaram piora nas propriedades mecânicas, visto que foi utilizado um material reciclado e adicionado uma fase dispersa (tecido de fibras) sem a utilização de agente compatibilizante.

Por fim, o aproveitamento de fibras vegetais na produção de compósitos poliméricos utilizando matriz reciclada amplia também a possibilidade de utilização e aproveitamento de biomassa (fibra vegetal), valorizando um recurso natural abundante no país. Além disso, o desenvolvimento deste tipo de compósito atende uma perspectiva de diminuir os impactos ambientais causados pelos resíduos industriais e agroindustriais, também gerando renda para os trabalhadores destes setores.

## **CAPÍTULO 4 – RECUPERAÇÃO DE TECIDOS DE FIBRAS DE CARBONO E DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE ABS RECICLADO REFORÇADO COM TECIDO DE FIBRAS DE CARBONO RECICLADAS**

### **4.1. Introdução**

O rápido avanço da ciência e tecnologia de materiais tem impulsionado o desenvolvimento de materiais com elevada resistência mecânica associado à baixa massa específica e a um custo competitivo. Assim, compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas de vidro, aramida, de carbono, entre outras, têm sido aplicados em vários setores industriais como o aeronáutico, automobilístico, energia eólica, tanques de armazenamento, equipamentos esportivos, entre outros (MENG *et al.*, 2018).

Em 2017, a demanda global por fibras de carbono foi de 70,5 mil toneladas e a estimativa é que a quantidade utilizada pela indústria ultrapasse 140 mil toneladas até 2025 (POHLKEMPER *et al.*, 2024). Há alguns anos, quase a totalidade de fibra de carbono produzida no mundo já era utilizada para a moldagem de compósitos poliméricos (aproximadamente 83%), dos quais a maioria (69%) utiliza polímeros termorrígidos como matriz (BLEDZKI *et al.*, 2021).

Adicionalmente, é comum que as indústrias utilizem as fibras de carbono na forma de um produto intermediário, também chamado de pré-impregnado (ou *prepreg*), no qual uma matriz polimérica, como a resina epóxi, é impregnada nas fibras de carbono. Neste caso, a resina tem a função de unir as fibras de carbono, sofrendo o processo de cura quando submetida à ação de temperatura e pressão, convertendo o pré-impregnado em uma peça infusível (COSTA *et al.*, 2005; DE PAIVA *et al.*, 2024; PARDINI, 1996).

No entanto, o uso crescente de compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de carbono aumenta os desafios ambientais sobre os resíduos potenciais. Este tipo de resíduo compreende pré-impregnados descartados por não conformidade remanescente de cortes de fabricação, materiais de teste de moldagem inicial em indústrias e produtos em fim de vida. Assim, cerca de 6.000 a 8.000 aeronaves comerciais podem chegar ao fim de sua vida útil até 2030 (MENG *et al.*, 2017; PETRAKLI *et al.*, 2020).

Portanto, há uma demanda para o desenvolvimento de técnicas de gerenciamento e reciclagem de resíduos de polímeros reforçados com fibras de carbono. No Brasil, não há dados concretos sobre a destinação desse tipo de material. Já existem algumas

iniciativas para implementar o sistema de logística reversa, porém, estas iniciativas estão condicionadas a acordos e parcerias entre empresas então, por enquanto, a maior parte destes dos compósitos estruturais são destinados a aterros industriais e/ou sanitários ou incinerados (RODRIGUES *et al.*, 2021).

Uma alternativa para reduzir o lixo descartado em aterros é a recuperação das fibras de carbono presentes nos pré-impregnados, por exemplo, por meio de tratamento térmico. Além disso, a recuperação das fibras de carbono presentes nos pré-impregnados é importante e economicamente interessante, pois são materiais de alto custo (preço) e que poderiam ser utilizadas para fabricar outras peças (MENG *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2014).

Nesse contexto, este capítulo tem como objetivos: I) realizar uma revisão bibliográfica relacionada às fibras de carbono bem como a sua reciclagem e II) propor a recuperação de tecidos de fibra de carbono presentes nos pré-impregnados provenientes de resíduos industriais por meio de tratamento térmico para remoção da resina; e desenvolver compósitos utilizando o ABS reciclado como matriz polimérica e as fibras de carbono recicladas como fase dispersa.

## **4.2. Revisão bibliográfica**

### *4.2.1. Fibras de carbono*

As fibras de carbono são fibras com cerca de 5 a 10 micrômetros de diâmetro compostas por pelo menos 90% em massa de átomos de carbono, apresentando propriedades notáveis, como altos valores de resistência à tração (2-7 GPa), baixa densidade (1,75-2,18 g/cm<sup>3</sup>), boa resistência à compressão (valores até 3GPa) e, sobretudo, altos valores de módulo de elasticidade (200-900 GPa). Além disso, as fibras de carbono apresentam baixos valores de expansão térmica, excelente condutividade elétrica e boa resistência química e térmica (LIU; KUMAR, 2012).

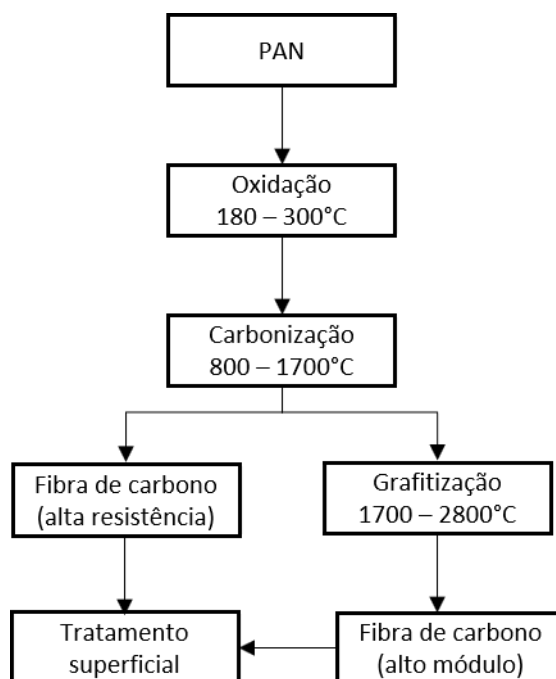
Essas propriedades tornaram as fibras de carbono muito populares na indústria aeronáutica e aeroespacial, engenharia civil, automotiva, além de serem aplicados na fabricação de artigos esportivos de competição. Assim, suas propriedades se assemelham à uma peça fabricada em aço e o valor do seu peso é próximo ao do plástico (BHATT; GOE, 2017).

As fibras de carbono são produzidas a partir da pirólise de um precursor que podem ser a poliacrilonitrila (PAN), fibras de celulose e piche. De forma geral, o processo de pirólise consiste no tratamento térmico do precursor para remover oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, dando origem às fibras de carbono. Adicionalmente, a seleção da matéria-prima, o processo de produção e as condições utilizadas para a formação do precursor influenciarão nas propriedades finais das fibras (LEVY; PARDINI, 2006).

Quase 90% das fibras de carbono são produzidas a partir da PAN e os 10% restantes são produzidos a partir de fibras de celulose ou piche de petróleo. Todos esses materiais são polímeros orgânicos, caracterizados por longas cadeias de moléculas unidas por átomos de carbono. A composição exata de cada precursor varia de uma empresa para outra e geralmente é considerada um segredo comercial (BHATT; GOE, 2017).

A poliacrilonitrila (PAN) é um polímero atático de cadeia linear obtido a partir do monômero de acrilonitrila ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}\equiv\text{N}$ ) que contém grupos nitrila altamente polares ligados na estrutura principal. As etapas para a obtenção das fibras de carbono a partir da PAN podem ser observadas na Figura 38.

**Figura 38 - Esquema resumido do processo de fabricação das fibras de carbono utilizando a PAN como precursor.**



Fonte: Adaptado de (LEVY; PARDINI, 2006, MARINUCCI, 2011)

A primeira etapa para a fabricação das fibras de carbono é a oxidação da fibra de poliacrilonitrila. Nessa etapa, a fibra passa por um forno com diferentes zonas de temperatura em atmosfera oxidante, no qual ocorre a quebra das triplas ligações entre C e N. Os anéis cíclicos do grupo nitrila são formados e ocorre a ligação do oxigênio à estrutura. Assim, a fibra apresenta um teor de carbono em torno de 60% e oxigênio de 8 a 12% (LEVY; PARDINI, 2006, MARINUCCI, 2011).

Na etapa de carbonização, as fibras são aquecidas em atmosfera inerte de nitrogênio e, então ocorre a remoção das moléculas de hidrogênio e formação de uma estrutura hexagonal de carbono com alinhamento das moléculas e teor de carbono de 92 a 93%. (LEVY; PARDINI, 2006, MARINUCCI, 2011).

Após a carbonização, é necessário realizar um tratamento superficial para promover a adesão química entre a fibra e a matriz polimérica. A adição de grupos funcionais a superfície das fibras favorece a adesão interfacial (MARINUCCI, 2011). A grafitação é um processo adicional quando se deseja obter fibras de carbono com módulo mais elevado. Os átomos de nitrogênio são eliminados e o teor de carbono fica acima de 99% (SOUTO; CALADO; JUNIOR, 2015).

Desta forma, as fibras de carbono podem ser classificadas de acordo com o seu módulo de elasticidade, precursores e temperatura de tratamento térmico. A Tabela 11 apresenta algumas dessas classificações de maneira resumida.

<b>Tabela 11 - Classificação e tipos de fibras de carbono</b>	
<b>Módulo de elasticidade</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Valores</b>
Módulo ultra-alto	>450 GPa
Módulo alto	350-450 GPa
Módulo intermediário	200 – 350 GPa
Baixo módulo e alta tensão	Módulo <100 GPa/ resistência à tração >3GPa
Super alta tensão	Resistencia à tração >4,5 GPa
<b>Precursores</b>	
<b>Tipos</b>	<b>Subtipos</b>
Fibra de PAN	
Fibras de celulose	Mesofásico/isotrópico
Fibra de Piche	
<b>Temperatura de tratamento térmico</b>	
<b>Tipos</b>	<b>Temperatura/classificação</b>
Alto aquecimento	>2000°C/ alto módulo
Aquecimento intermediário	Em torno de 1500°C / alta força
Baixo aquecimento	Em torno de 1000°C / baixo módulo e baixa força

Fonte: Adaptado de (SOUTO; CALADO; JUNIOR, 2015)

As fibras de carbono são, geralmente, empregadas como fase dispersa em compósitos utilizando matrizes termorrígidas, principalmente a resina epóxi. De modo geral, a resina epóxi é um polímero termorrígido de alto desempenho no qual apresenta pelo menos dois grupos epóxi terminais em sua estrutura. Apresenta excelentes propriedades mecânicas, baixa contração durante a cura e excelente estabilidade química e térmica (temperatura de decomposição > 300°C), e por isso, é amplamente utilizada em revestimentos, adesivos, componentes automotivos e em compósitos reforçados com fibras (DUTRA *et al.*, 2019; ZHANG; CHEN; NI, 2020).

Compósitos reforçados com fibras de carbono apresentam crescente utilização pela indústria aeronáutica. Componentes fabricados em ligas de alumínio, por exemplo, têm sido substituídos por compósitos estruturais utilizando fibras de carbono, contribuindo para a redução de peso (20-30%) e de custo final das peças (25%) em relação às fabricadas em ligas metálicas (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

A demanda por compósitos reforçados com fibras de carbono tem crescido na última década com uma taxa de crescimento anual de 12%, podendo atingir 199 mil toneladas em 2022. Assim, a quantidade de resíduos provenientes de compósitos reforçados com fibras de carbono tende a aumentar no futuro aumentando, também, a preocupação em relação ao gerenciamento para uma destinação adequada para esse tipo de resíduo (BLEDZKI *et al.*, 2021).

#### 4.2.2. *Reciclagem de fibras de carbono*

A reciclagem de compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono (CPRFC) tem se mostrado uma alternativa interessante, pois tem potencial para recuperar valor dos materiais residuais ao invés de descartar as matérias primas de alto valor agregado em aterros ou incinerá-los (MENG *et al.*, 2018). Comparativamente, o preço das fibras de vidro varia dependendo da qualidade e do tipo de produto custando em média de U\$1,3-1,5/kg, já as fibras de carbono de alta resistência custam entre U\$ 20-30/kg e, quando se trata de fibras de carbono de alto desempenho o custo pode chegar até U\$100/kg. Portanto, a reciclagem de fibras de carbono a partir de CPRFC se mostra importante para recuperar um material de alto valor agregado (KIM; KIM, 2023).

Os métodos conhecidos atualmente visam a reciclagem mecânica, química e térmica. A reciclagem mecânica é a técnica mais antiga no qual os resíduos de CPRFC são triturados para reduzir os tamanhos, com o objetivo de serem incorporados como cargas na fabricação de novos compósitos poliméricos. É considerado o processo mais simples e econômico, mas produz fibras de carbono recicladas com baixa razão de aspecto e retém 50-60% da resistência à tração. Ou seja, este método tem uma eficiência baixa (KIM; KIM, 2023). Além disso, é reportado que ao utilizar o resíduo de CPRFC triturado como fase dispersa em matriz de poliéster sob condições de fabricação tradicionais, há dificuldade em dispersar a carga pela matriz polimérica. (PALMER *et al.*, 2009)

Na reciclagem química é utilizado um solvente para degradar a resina e recuperar as fibras de carbono retendo pelo menos 80% da resistência à tração. Neste caso, é reportado o uso de solventes em seu estado supercrítico como ácido acético, água, álcool, entre outros. A desvantagem desse processo é o alto custo de processamento, além da utilização de grande quantidade de solventes e a possibilidade de produzir substâncias tóxicas (KIM; KIM, 2023; KIM *et al.*, 2019; MA *et al.*, 2021).

A reciclagem térmica, por outro lado, tem se mostrado promissora para a reciclagem de CPRFC. A decomposição térmica é um processo térmico capaz de degradar a matriz polimérica recuperando as fibras de carbono (ABDALLAH *et al.*, 2021). É um processo economicamente viável comparado aos processos mecânico e químico, pois não há necessidade de agentes químicos e recupera fibras de carbono com propriedades comparáveis às fibras virgens. Na literatura, Rodrigues *et al.* (2014) submeteram compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de carbono após fragmentá-los, a uma temperatura de 450°C por duas horas, e recuperaram as fibras curtas de carbono sem comprometer significativamente as propriedades da superfície das fibras (RODRIGUES *et al.*, 2014).

No trabalho de Yatim *et al.* (2020) foi realizado o tratamento térmico de compósitos reforçados com fibras de carbono em diferentes temperaturas (550°C, 600°C e 650°C) e avaliaram a influência quando submetidos a diferentes atmosferas (nitrogênio e oxigênio). Para os autores, a pirólise realizada sob uma atmosfera inerte de nitrogênio no intervalo de temperatura de 250 a 420°C foi considerada significativa para decompor alguns componentes da resina epóxi. Já nos compósitos submetidos a temperatura de 550°C em atmosfera de oxigênio houve a completa eliminação da resina

epóxi, obtendo-se fibras unidirecionais de carbono recicladas, com superfícies limpas e com as suas formas preservadas, sugerindo a possibilidade de sua reutilização pela indústria na fabricação de componentes secundários. (YATIM *et al.*, 2020)

Para Abdou *et al.* (2021) o tratamento térmico a 550°C por uma hora no compósito polimérico resultou na decomposição da resina capaz de recuperar com sucesso as fibras de carbono, com uma superfície compatível com fibras de carbono virgens, e sugeriram que as fibras de carbono recuperadas possam ser utilizadas na fabricação de novos compósitos (ABDOU *et al.*, 2021). Deste modo, a decomposição térmica tem apresentado grande potencial como uma alternativa para degradar a resina epóxi, e assim, recuperar as fibras de carbono.

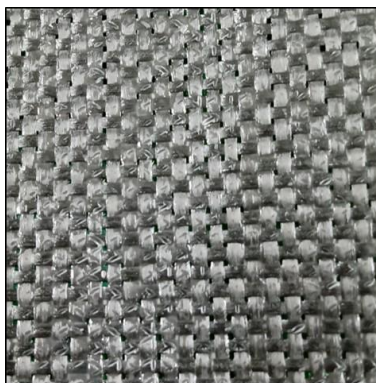
Entretanto, ainda são poucos os estudos que realizam a reciclagem de compósitos que recuperem fibras de carbono na forma de tecidos. Por isso, este capítulo apresenta nas próximas seções um estudo para avaliar a possibilidade e as condições para recuperar tecidos bidirecionais de fibras de carbono (a partir de pré-impregnados) e, também, realizar a moldagem de compósitos de ABS reciclado utilizando tecidos de fibras de carbono recicladas como fase dispersa.

### **4.3. Parte experimental**

#### *4.3.1. Materiais*

Para este estudo, pré-impregnados (*pré-pregs*) de matriz epóxi contendo tecidos de fibras de carbono foram doados por uma empresa do setor de materiais compósitos. Os materiais consistem de tecidos de fibras de carbono bidirecionais impregnados com resina epóxi curada (polimerizada) (Figura 39).

**Figura 39 - Pré-impregnado de resina epóxi curada reforçado com tecido de fibras de carbono**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagem fora de escala.

#### 4.3.2. *Decomposição da resina epóxi*

A alternativa escolhida para recuperação das fibras de carbono foi a reciclagem térmica através da decomposição térmica utilizando uma mufla de laboratório JUNG N1100. Os compósitos foram submetidos a tratamentos térmicos com diferentes temperaturas a fim de encontrar a melhor condição para a remoção da resina epóxi sem causar degradações térmicas significativas nas fibras de carbono. Para o tratamento térmico foram cortadas amostras de 65mm de largura x 300mm de comprimento dos pré-impregnados reforçados com tecidos de fibras de carbono (Figura 40). Essas amostras foram cuidadosamente enroladas, acondicionadas em cadinhos e tratadas em mufla em temperatura ambiente até atingirem diferentes temperaturas (450°C, 500°C e 600°C) por duas horas. Na Tabela 12 estão apresentados detalhes sobre as amostras e condições experimentais utilizadas.

**Figura 40 - Fotografia de uma amostra de pré-impregnado antes do tratamento térmico**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagem fora de escala.

**Tabela 12 - Condições experimentais aplicadas para a decomposição da resina epóxi**

Amostra	Temperatura (°C)	Tempo (horas)
NT	Sem tratamento	-
FC-450	450	2
FC-500	500	2
FC-600	600	2

#### 4.3.3. Termogravimetria (TG)

Inicialmente, para analisar as características térmicas do pré-impregnado (NT), foi realizada a termogravimetria (TG) em cadinho de platina com cerca de 8mg de amostra. A análise foi conduzida em equipamento Shimadzu (TGA-50) na faixa de temperatura entre 25°C e 800°C a uma razão de aquecimento de 10°C.min<sup>-1</sup> sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL.min<sup>-1</sup>.

Os tecidos de fibras de carbono recuperados a partir do tratamento térmico (FC-450, FC-500 e FC-600) foram submetidos a análises de TG no equipamento Shimadzu (TGA-50). As análises foram conduzidas com 8mg de amostra em cadinho de platina em atmosfera de ar sintético com vazão de 50 mL.min<sup>-1</sup>. A razão de aquecimento foi de 10°C.min<sup>-1</sup> no intervalo de temperatura de 25°C a 800°C.

#### 4.3.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e energia dispersiva de espectroscopia de raio-X (EDS)

A superfície do pré-impregnado antes do tratamento (NT) e dos tecidos de fibras de carbono reciclados (FC-450, FC-500 e FC-600) foram analisados por meio de imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca HITACHI, modelo TM3000. As amostras analisadas foram fixadas com fita de carbono no suporte. Neste estudo, nenhum revestimento metálico foi feito nas amostras. As análises foram realizadas com uma tensão de aceleração de 5kV usando filamento de tungstênio.

O ensaio de EDS (energia dispersiva de espectroscopia de raio-X) foi realizado para identificar os elementos químicos presentes na superfície das amostras.

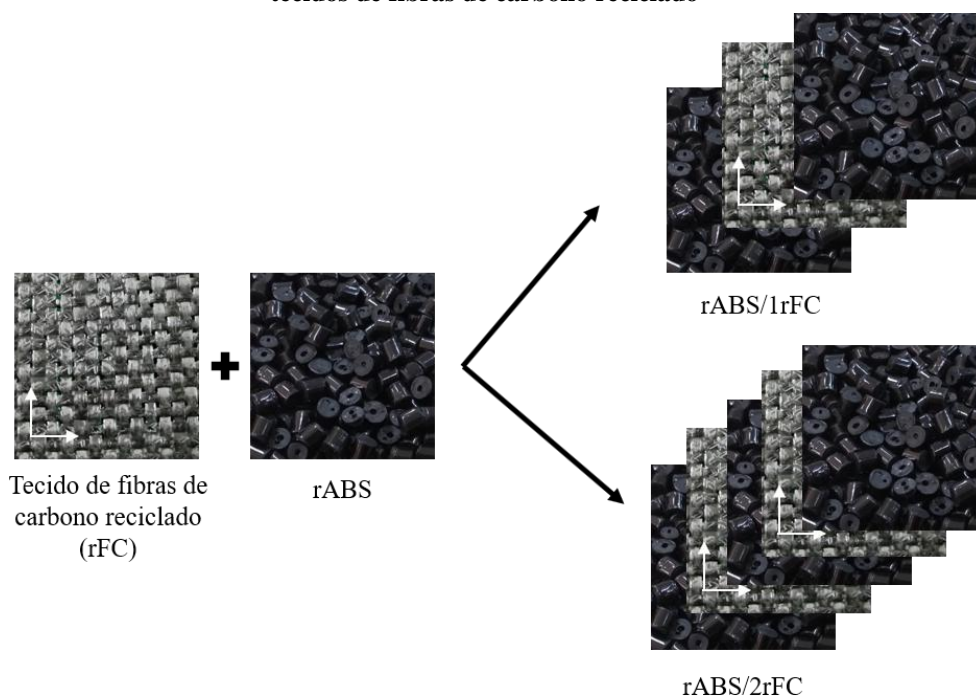
#### 4.3.5. Moldagem de compósitos

Após realizar a decomposição da resina epóxi, analisar através da termogravimetria (TG) e da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e,

posteriormente, selecionar a melhor condição para recuperar os tecidos de fibras de carbono com o mínimo de danos nas fibras, foi realizada a moldagem de compósitos utilizando os tecidos de fibras de carbono reciclado como fase dispersa e o ABS reciclado como matriz polimérica.

Para a moldagem, os tecidos de fibras de carbono reciclados foram cortados nas dimensões dos moldes feito de ligas de alumínio para o ensaio de flexão (79 mm x 130 mm) e tração (127 mm x 248 mm). No caso do molde para tração, foram utilizadas duas partes do tecido reciclado (de aproximadamente 65mm de largura) por conta da área disponível na mufla, que impossibilitou a recuperação de tecidos de maior largura. Em seguida, o ABS reciclado (rABS) foi pesado em uma balança analítica; metade da quantidade pesada foi inserida no molde e depois foi acomodado o tecido de fibras de carbono reciclado, completando o molde com o restante da matriz (rABS), formando uma estrutura do tipo “sanduíche” (Figura 41). O compósito foi moldado pelo método de compressão a quente, utilizando uma prensa hidráulica com aquecimento a 200°C, por 30 minutos com força de moldagem de 6 toneladas. Na sequência, foram deixados resfriar até atingir a temperatura ambiente, quando as placas foram desmoldadas. As espessuras das placas moldadas foram de 3,4 mm para o ensaio de tração e flexão/impacto.

**Figura 41 - Esquema de preparação dos compósitos de rABS contendo uma e duas camadas de tecidos de fibras de carbono reciclado**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagem fora de escala.

#### 4.3.6. Ensaio mecânico

Para os ensaios de flexão de três pontos foram confeccionados corpos de prova nas dimensões de 12,7 mm de largura x 127 mm de comprimento (Figura 42), de acordo com a norma ASTM D790. Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina para ensaios mecânicos (EMIC DL 10000). A célula de carga utilizada foi de 500kgf, a distância entre os apoios foi de 54,4 mm e a velocidade do ensaio foi de 1,45 mm.min<sup>-1</sup>, a qual foi calculada a partir da Equação 4 apresentada no capítulo 3.

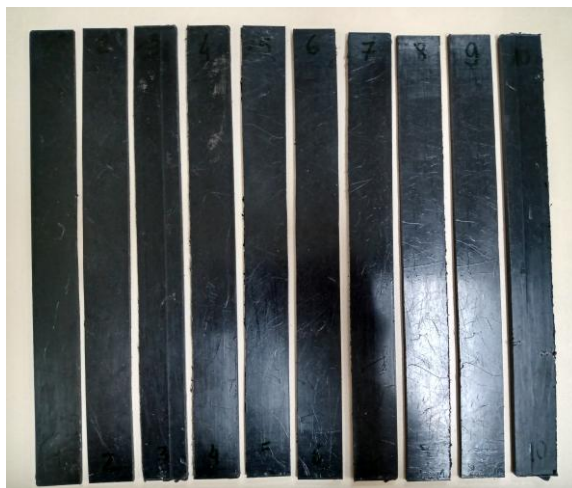
**Figura 42 - Fotografia dos corpos de prova para o ensaio de flexão**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagem fora de escala.

Os ensaios de tração da matriz polimérica (rABS) e dos compósitos contendo uma e duas camadas do tecido de fibras de carbono reciclado (rABS/1rFC e rABS/2rFC, respectivamente) foram realizados em temperatura ambiente. Os corpos de prova (Figura 43) foram cortados nas dimensões de 25mm de largura x 250 mm de comprimento, segundo a norma ASTM D3039 e testados em máquina universal para ensaios mecânicos (EMIC DL 30000), utilizando célula de carga de 2000 kgf e velocidade de ensaio de 2,0 mm.min<sup>-1</sup>. Para garantir que todos os corpos de prova tivessem tecidos bidirecionais, o meio das placas foi desprezado, ou seja, apenas corpos de prova das extremidades foram consideradas aptas para o ensaio de tração.

**Figura 43 – Fotografia dos corpos de prova para o ensaio de tração**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagem fora de escala.

A avaliação das propriedades de impacto dos compósitos rABS/1rFC e rABS/2rFC foi realizada de acordo com a norma ASTM D256 e comparada com o rABS, cujas dimensões dos corpos de prova foram de 63,5 x 12,7 x 4 mm<sup>3</sup> e entalhe em “V” de 2,54 mm. O ensaio de impacto foi realizado em um equipamento de impacto pendular da marca Instron modelo CEAST 9050, com pêndulo de 1J na configuração de impacto Izod.

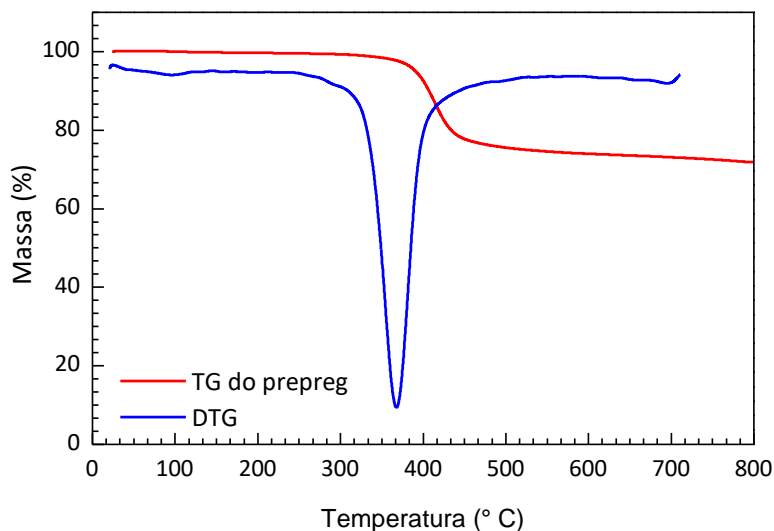
Posteriormente, foi avaliada a influência do tecido de fibras de carbono reciclado nas propriedades mecânicas dos compósitos através da análise de variância (ANOVA) e pelo teste de Tukey. Os resultados foram considerados estatisticamente significativos se os valores de p fossem <0,05.

#### **4.4. Resultados e discussão**

##### *4.4.1. Termogravimetria (TG)*

O comportamento térmico do pré-impregnado (no caso, um compósito polimérico reforçado com tecido de fibras de carbono, denominado NT) foi analisado através da Termogravimetria (TG). A Figura 44 mostra as curvas da termogravimetria (TG) e da derivada (DTG). Os resultados, como temperatura inicial, temperatura final, temperatura na qual a perda de massa é máxima e a porcentagem residual a 800°C são mostrados na Tabela 13.

**Figura 44 - Curvas TG e DTG do NT sob atmosfera de nitrogênio, razão de aquecimento de 10°C.min-1 e fluxo de 50 mL.min-1**



**Tabela 13 - Estágios de decomposição de curvas TGA/DTG dos NT analisados sob atmosfera de nitrogênio**

$T_i$ (°C)	$T_f$ (°C)	$T_{max}$ (°C)	R (%)
361,60	446,92	413,11	71,83

Temperatura inicial ( $T_i$ ); temperatura final ( $T_f$ ); temperatura na qual a perda de peso é máxima ( $T_{max}$ ); a porcentagem residual a 800°C (R).

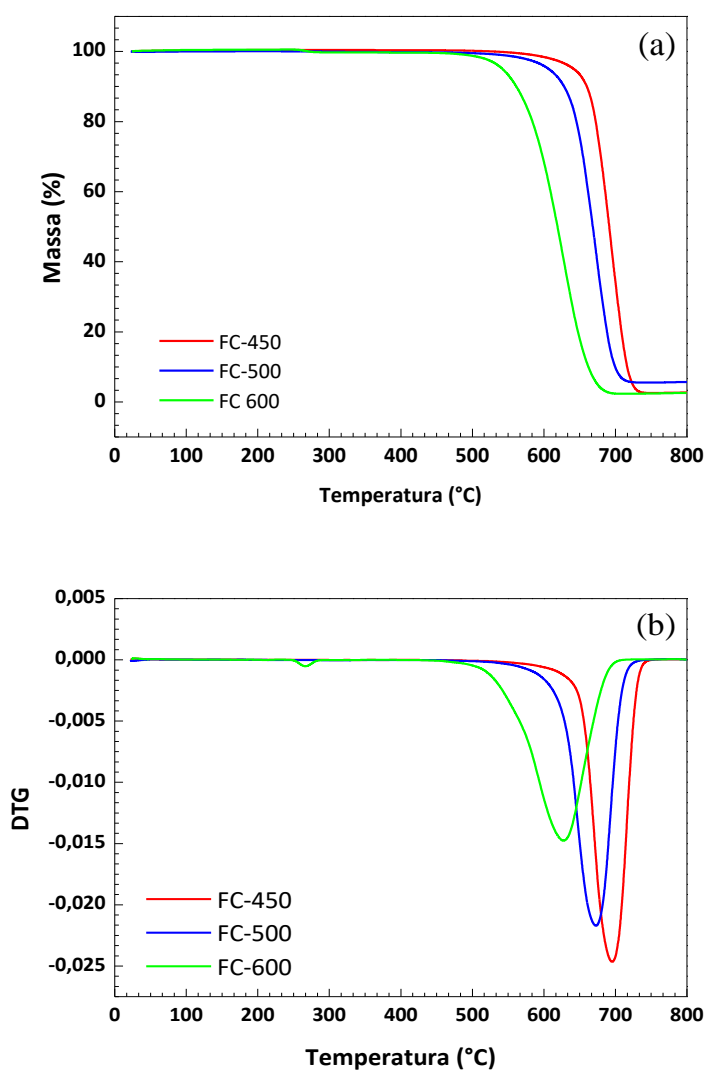
A partir da curva TG da amostra sem tratamento (NT) (Figura 44), analisada sob atmosfera inerte de nitrogênio é possível observar que a decomposição da matriz ocorre em apenas um estágio de perda de massa no qual tem início em 361,60°C e termina em 446,92°C com massa residual de 71,83% a 800°C (Tabela 13), a qual está associada à porcentagem em massa de fibras de carbono no pré-impregnado. A reação ocorre de forma mais acentuada quando a temperatura atinge 413,11°C, temperatura na qual a perda de massa é máxima. Assim, a temperatura de decomposição observada pode estar associada à decomposição e volatilização de grupos químicos que formam a cadeia polimérica da resina epóxi do tipo DGEBA (DENG *et al.*, 2020).

Trabalhos da literatura descrevem comportamento semelhante para a decomposição de resina epóxi em compósitos de fibras de carbono. De acordo com Guilherme *et al.* (2017) a resina epóxi apresenta decomposição na faixa de temperatura de 290°C a 520°C com cerca de 30% de perda de massa (GUILHERME *et al.*, 2017).

Deng *et al.* (2020) realizou a recuperação de fibras de carbono através da recuperação térmica utilizando um forno micro-ondas e uma mufla para degradar a resina. Os autores reportaram que a resina epóxi começou a se decompor em aproximadamente 270°C e terminou em 600°C, com uma massa residual de 72% (DENG *et al.*, 2020).

A Figura 45 mostra as curvas de termogravimetria (Figura 45a) e derivada (Figura 45b) de tecidos de fibras de carbono após tratamento térmico a 450°C, 500°C e 600°C, ou seja, das amostras FC-450, FC-500 e FC-600, respectivamente. Os valores dos resultados como temperatura inicial, temperatura final, temperatura na qual a perda de massa é máxima e a porcentagem residual a 800°C estão descritos na Tabela 14.

**Figura 45 - Curvas (a) TG; (b) DTG de FC-450, FC-500 e FC-600 em atmosfera de ar sintético, razão de aquecimento de 10°C.min-1 e fluxo de 50 mL.min-1**



**Tabela 14 - Estágios de decomposição das curvas TG e DTG dos tecidos FC-450, FC-500 e FC-600 analisados sob atmosfera de ar sintético, razão de aquecimento de 10°C.min<sup>-1</sup> e fluxo de 50 mL.min<sup>-1</sup>**

Amostra	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	R (%)
FC450	640,50	728,38	694,84	2,69
FC500	585,22	710,19	672,50	5,69
FC600	526,77	678,96	627,59	2,58

Temperatura inicial (T<sub>i</sub>); temperatura final (T<sub>f</sub>); temperatura na qual a perda de massa é máxima (T<sub>max</sub>); porcentagem residual a 800°C (R%).

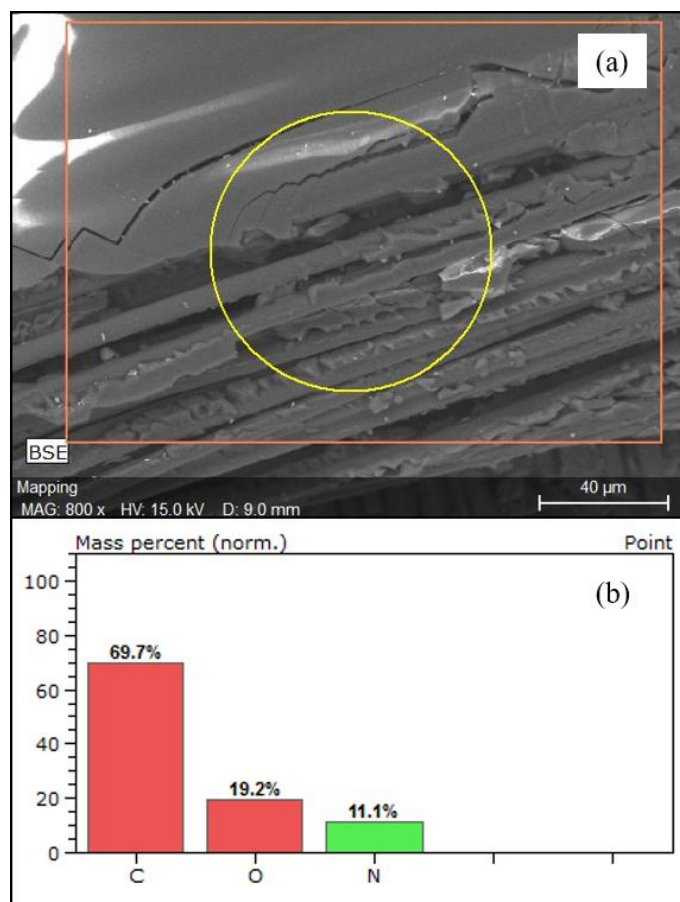
Em relação aos resultados de TG realizados na FC-450, FC-500 e FC-600 é possível observar na Figura 45 um mecanismo de decomposição que ocorre em apenas um estágio de perda de massa no qual está associada à decomposição das fibras de carbono. Assim, sob atmosfera oxidante (ar sintético) quase todo o material é degradado com massa residual de 97,3% para FC-450, 94,3% para FC-500 e 97,4 para FC-600. A decomposição térmica sob ar sintético promove a oxidação das fibras de carbono em temperaturas que variam de 570°C a 980°C (QUACH *et al.*, 2017).

O tecido FC-450 foi o que apresentou decomposição em faixa de temperatura mais alta (640,50°C - 728,38°C) em comparação com o tecido FC-500 (585,22°C - 710,20°C) e o tecido FC-600 (526,77°C - 678,96°C). Esses resultados revelam que a temperatura na qual o pré-impregnado é submetido no tratamento térmico pode influenciar na estabilidade térmica do tecido de fibras de carbono recuperado. Essa menor estabilidade pode estar associada à presença de resina não degradada nas amostras submetidas a temperaturas mais baixas.

#### 4.4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para verificar a matriz polimérica presente no compósito estudado neste trabalho, a Figura 46 mostra a superfície da amostra antes do tratamento térmico (NT).

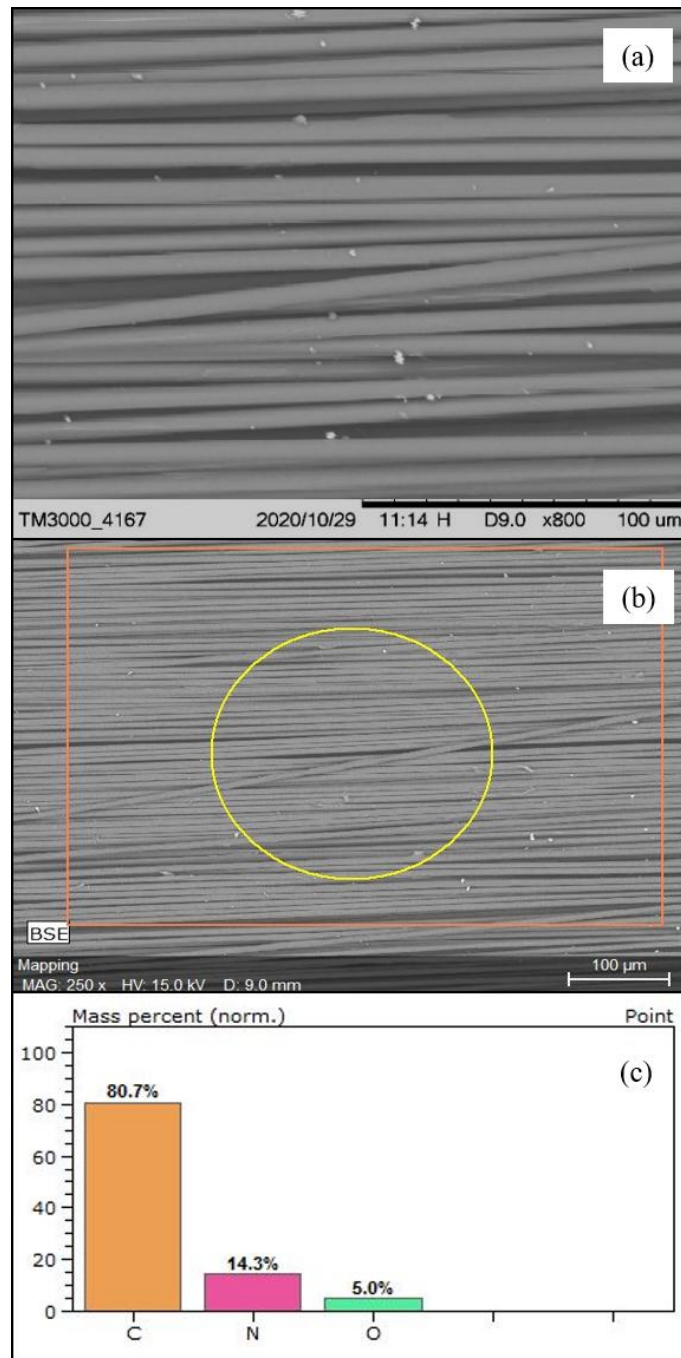
**Figura 46 – (a) Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliação de 800x e (b) espectro de EDS de amostras sem tratamento (NT).**



O EDS foi realizado na região demarcada na Figura 46. Pelas imagens do MEV observa-se que as fibras de carbono estão dispostas paralelamente entre si e impregnadas com resina epóxi (Figura 46). A análise em EDS mostra elementos característicos da composição da matriz polimérica como o nitrogênio (9,5%) e oxigênio (20,0%). O elemento carbono (66,8) presente na amostra pertence tanto a matriz polimérica quanto à fibra de carbono.

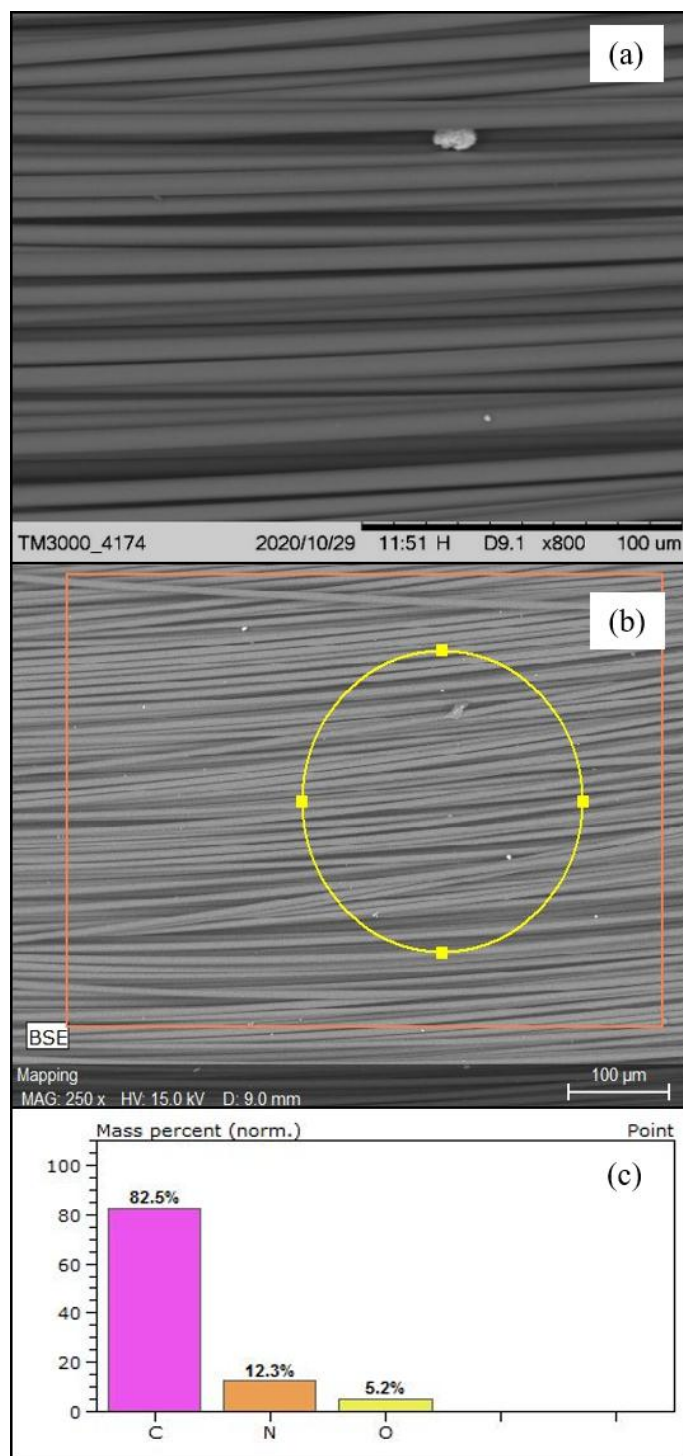
As Figuras 47, 48 e 49 mostram as superfícies dos tecidos de fibras de carbono submetidos aos tratamentos térmicos a 450°C (FC-450), 500°C (FC-500) e 600°C (FC-600), respectivamente e os seus resultados da análise em EDS.

Figura 47 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): (a) ampliação de 800x, (b) região onde foi feita a análise e (c) resultados da análise em EDS do tecido de fibras de carbono submetido ao tratamento térmico a 450°C (FC-450)



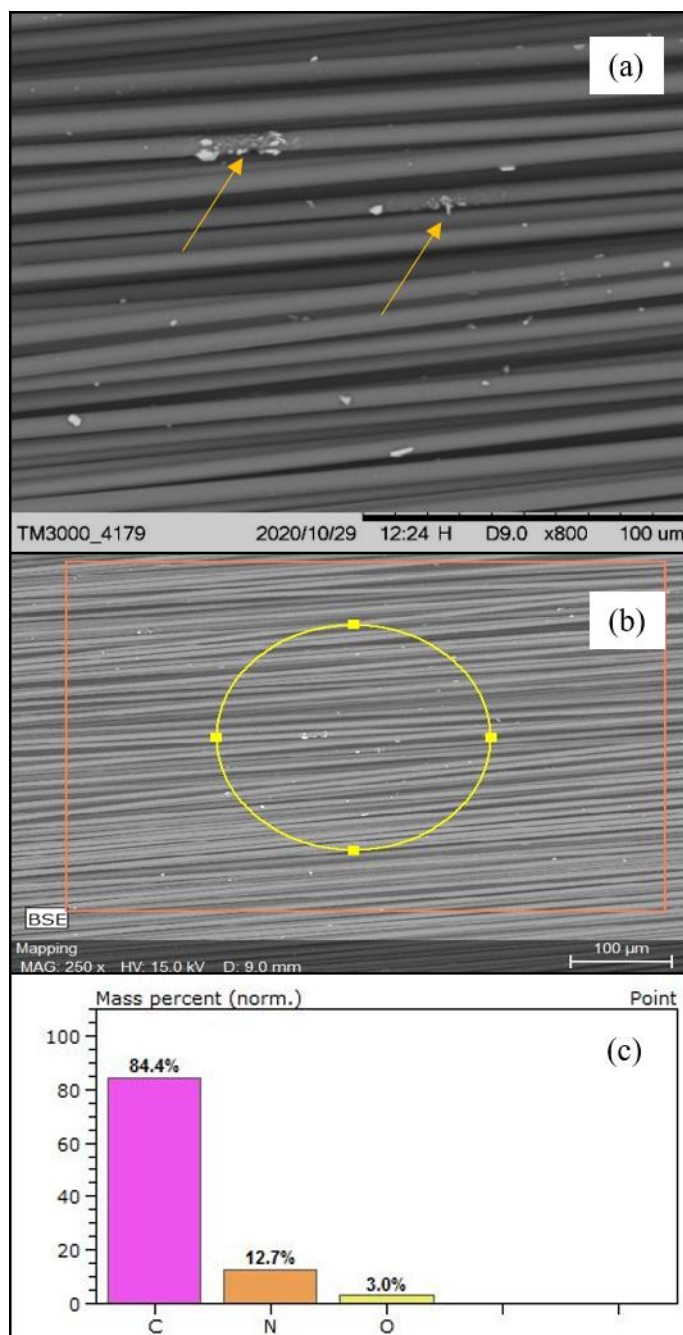
Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 48 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): (a) ampliação de 800x, (b) região onde foi feita a análise e (c) resultados da análise em EDS do tecido de fibras de carbono submetido ao tratamento térmico a 500°C (FC-500)**



Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 49 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): (a) ampliação de 800x, (b) região onde foi feita a análise de EDS e (c) resultados da análise em EDS do tecido de fibras de carbono submetido ao tratamento térmico a 600°C (FC-600)**



Fonte: Autoria própria (2024)

A partir das Figuras 47(a-c), 48(a-c) e 49(a-c) é possível observar que as três temperaturas aos quais os preregs foram submetidos foram capazes de remover a resina epóxi. Os tratamentos realizados a 450°C (Figura 47) e 500°C (Figura 48) apresentaram resultados semelhantes quanto à integridade das fibras, embora à 500°C as fibras apresentem menor quantidade de partículas não degradadas e, que poderiam estar influenciando em menor estabilidade térmica, como visto nos resultados de TG. As

análises em EDS mostram que após o tratamento térmico maiores quantidades do elemento carbono são encontrados nas amostras FC-450, FC-500 e FC-600 e uma diminuição da quantidade de nitrogênio e oxigênio é esperado, uma vez que a fibra de carbono comercial pode conter em sua composição 95-99% de carbono, ou seja, a remoção da resina epóxi ocorre de forma efetiva com o aumento da temperatura.

No caso da amostra FC-600 foi possível observar que o tratamento a 600°C (Figura 49) causou pequenas degradações nas fibras, conforme destacado com seta amarela na imagem de MEV. A análise em EDS mostra um aumento no teor de carbono (84,4%) e diminuição do elemento oxigênio (3,0%), sugerindo que a remoção de resina epóxi ainda ocorre nesta temperatura. Entretanto, alguns autores também obtiveram resultado similar, sugerindo que o tratamento térmico dos pré-impregnados não deve ultrapassar 500°C para preservar a integridade e, conseqüentemente, as propriedades das fibras de carbono (RODRIGUES *et al.*, 2014).

Yatim *et al.* (2020) reportam que o mecanismo para degradar a resina epóxi se inicia em aproximadamente 300°C no qual há decomposição incompleta da resina epóxi, pois as fibras ainda estão firmemente ligadas umas às outras. Em seguida, no intervalo de temperatura entre 420°C e 500°C as fibras de carbono já estão mais claras e mais soltas, mas ainda com partículas, denominadas *sizing*, na superfície. Então, em aproximadamente 540°C é possível obter fibras de carbono com a superfície limpa e com suas dimensões preservadas. Assim, os autores reportaram que até a temperatura de 540°C ocorreu a queima completa da resina epóxi sem comprometer o dimensionamento das fibras (YATIM *et al.*, 2020).

Deste modo, mesmo que a temperatura não seja a mais baixa, o tratamento a 500°C por 2 horas, realizado neste trabalho, foi a melhor condição para obter fibras livres de impurezas e não causar decomposição que poderia afetar as propriedades e impossibilitar o reaproveitamento da fibra reciclada. Assim, através do tratamento térmico na temperatura de 500°C foram obtidos tecidos de fibras de carbono reciclados em quantidade suficiente para a realização da moldagem de compósitos poliméricos.

A Figura 50 apresenta os tecidos FC-450, FC-500 e FC-600 após o tratamento térmico.

**Figura 50 - Fotografia dos tecidos de fibras de carbono obtidas após o tratamento térmico para a remoção da resina epóxi nos pré-impregnados. Da esquerda para a direita: FC-450, FC-500 e FC-600**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagem fora de escala.

As temperaturas empregadas possibilitaram a obtenção de tecidos isentos de resina epóxi, resultando em tecidos mais flexíveis. Entretanto observa-se que o tecido recuperado com tratamento térmico a 600°C aparentemente sofreu mais decomposição por conta da alta temperatura e, conseqüentemente, as fibras não se mantiveram alinhadas ao longo do tecido. Já no tecido tratado a 450°C foi possível observar uma aparência mais rígida, em comparação com o tecido tratado a 500°C, o que pode ser justificado pela presença de resina epóxi no tecido.

#### 4.4.3. *Propriedades mecânicas*

Após a moldagem de compósitos de ABS reciclado (rABS) contendo uma e duas camadas de tecido de fibras de carbono recicladas foram realizados os ensaios de flexão para analisar as propriedades do material. As Figuras 51(a-b) apresenta os corpos de prova após o ensaio de flexão do compósito rABS/1rFC e rABS/2rFC, respectivamente, na qual é possível observar que nenhum corpo de prova sofreu ruptura, e as amostras apresentaram deformações consideráveis. No caso dos compósitos contendo duas camadas do tecido rFC, pode ser observado que a maioria dos corpos de prova apresentou delaminação na região entre os tecidos e a matriz, indicando falta de adesão interfacial. Na Tabela 15 estão citados os resultados médios e desvio padrão da resistência à flexão, deformação máxima e módulo de elasticidade do compósito de ABS reciclado contendo uma e duas camadas de tecidos de fibras de carbono reciclado.

**Figura 51 - Fotografias dos 10 corpos de prova do: (a) compósito contendo uma camada do tecido rFC (rABS/1rFC); (b) compósitos contendo duas camadas do tecido rFC (rABS/2rFC) após o ensaio de flexão**



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

**Tabela 15 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de flexão do rABS e dos compósitos rABS/1rFC e rABS/2rFC**

<b>Material</b>	<b>Resistência à flexão (MPa)</b>	<b>Deformação máxima (mm)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
rABS	$80,14 \pm 1,01^B$	$6,54 \pm 0,34^B$	$3,37 \pm 0,44^B$
rABS/1rFC	$90,62 \pm 4,58^A$	$8,86 \pm 0,50^A$	$3,19 \pm 0,15^A$
rABS/2rFC	$63,87 \pm 8,52^B$	$6,68 \pm 2,03^B$	$2,79 \pm 0,44^B$

\*Médias que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes (Teste de Tukey com p-valor < 0,05).

De acordo com os resultados da Tabela 15, pode ser observado que a incorporação dos tecidos de fibras de carbono reciclados promoveu um aumento de até 13% na resistência à flexão dos compósitos rABS/1rFC ( $90,62 \pm 4,59$  MPa) em relação ao rABS ( $80,14 \pm 1,00$  MPa). Além disso, o tecido rFC aumentou significativamente a energia absorvida no processo de fratura, permitindo maior deformação dos compósitos em relação ao rABS, cujos valores foram  $8,86 \pm 0,50$  mm e  $6,54 \pm 0,34$  mm, respectivamente.

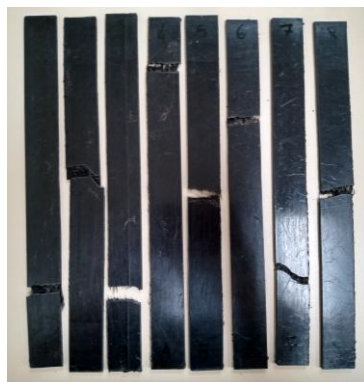
Resultados semelhantes foram reportados na literatura (ALLAWI *et al.*, 2020), na qual foram avaliados os efeitos da incorporação de partículas de fibras de carbono recicladas nas propriedades de polímeros termoplásticos como o PP e o ABS. Os autores observaram que amostras com 10% em peso de fibras de carbono promoveram aumento na resistência à flexão em compósitos com matrizes de PP (43,21MPa) e de ABS (92,25MPa) em comparação com as matrizes sem o reforço. Os autores sugeriram,

também, que maiores quantidades de fibras de carbono poderiam melhorar ainda mais as propriedades de flexão do compósito (ALLAWI *et al.*, 2020).

Entretanto, neste trabalho, o compósito contendo duas camadas do tecido de fibras de carbono reciclado (rABS/2rFC) apresentou o menor valor de resistência a flexão ( $63,87 \pm 8,5$  MPa), uma diminuição de 20% em relação ao rABS. Este decréscimo na resistência à flexão pode estar associado a baixa molhabilidade das fibras pela matriz, o que pode ter contribuído para a delaminação do material durante os ensaios de flexão. Adicionalmente, os resultados obtidos para a resistência à flexão dos compósitos rABS/1rFC foram superiores aos obtidos para os compósitos contendo fibras vegetais como a juta e algodão (apresentados no capítulo 3), nos quais os valores variaram entre 70,8MPa e 76,9MPa.

A Figura 52 apresenta os corpos de prova após os ensaios de tração. Os resultados médios e desvio padrão da resistência a tração, deformação máxima e módulo de elasticidade do rABS e do compósito contendo uma camada do tecido de fibras de carbono reciclado estão descritos na Tabela 16.

**Figura 52 - Fotografia dos corpos de prova de compósitos contendo uma camada do tecido rFC após o ensaio de tração**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagem fora de escala.

**Tabela 16 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de flexão do rABS e dos compósitos rABS/1rFC e rABS/2rFC**

<b>Material</b>	<b>Resistencia à flexão (MPa)</b>	<b>Deformação máxima (mm)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
rABS	$32,56 \pm 1,14^{B*}$	$5,04 \pm 0,18^A$	$1,21 \pm 0,09^B$
rABS/ 1rFC	$39,12 \pm 6,16^A$	$4,31 \pm 0,38^B$	$1,76 \pm 0,16^A$
rABS/ 2rFC	$33,11 \pm 7,13^{AB}$	$3,73 \pm 0,68^C$	$1,83 \pm 0,31^A$

\*Médias que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes (Teste de Tukey com p-valor < 0,05).

A Tabela 16 mostra que a resistência à tração do compósito rABS/1rFC foi de  $39,12 \pm 6,16$  MPa, um aumento de 20% em relação ao rABS, que apresentou resistência a tração de  $32,56 \pm 1,14$  MPa. Já em relação ao compósito rABS/2rFC não houve aumento significativo na resistência à tração. Resultados superiores são reportados por Allawi *et al.* (2020), que investigaram as propriedades de tração de compósitos de ABS reforçados com fibras curtas de carbono recicladas e obtiveram valores de resistência à tração de 45,09 MPa para o ABS virgem e de 50,96 MPa para compósitos contendo 10% de fibras de carbono recicladas (ALLAWI *et al.*, 2020). Vale ressaltar que neste estudo tanto a matriz como o reforço são reciclados. Considerando o tipo de reforço utilizado, neste caso, um tecido bidirecional, o comportamento isotrópico das fibras de carbono auxiliam na distribuição uniforme de tensões devido ao arranjo alinhado do tecido plano na direção do esforço (HECKADKA *et al.*, 2015).

O módulo de elasticidade (Tabela 16) dos compósitos contendo tecido de fibras de carbono reciclado foi 45 a 51% maior do que no rABS, cujos valores foram de  $1,76 \pm 0,16$  GPa (rABS/1rFC),  $1,83 \pm 0,31$  GPa (rABS/2rFC) e  $1,21 \pm 0,09$  GPa (rABS), indicando que a adição de um reforço resulta no aumento significativo da rigidez do compósito polimérico.

A ductilidade dos compósitos diminuiu aproximadamente 14% com a incorporação do tecido de fibras de carbono. Esse resultado já era esperado devido à natureza frágil das fibras de carbono em comparação com a matriz. Assim, as propriedades de tração dependem da distribuição uniforme da tensão da matriz polimérica para a fase dispersa e, por isso, a adesão interfacial entre as fibras e a matriz devem ser efetivas para dificultar o deslizamento das cadeias poliméricas durante o esforço (ALLAWI *et al.*, 2020). Geralmente, compósitos de fibras de carbono recicladas utilizando polímeros termoplásticos como matriz como, por exemplo o ABS, tendem a apresentar baixa adesão interfacial. A adesão poderá ser verificada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) que será realizada posteriormente.

Por fim, os valores de resistência à tração obtidos nos compósitos de rABS/1rFC são semelhantes aos valores de resistência à tração dos compósitos contendo as fibras vegetais de juta e algodão (apresentados no capítulo 3), nos quais os valores variaram entre 31,00 MPa e 39,41MPa.

Desta forma, o processo de remanufatura desses materiais demonstra ser uma alternativa para o reaproveitamento de resíduos sólidos de alto valor agregado e inserindo-os, novamente, na cadeia produtiva de modo a incentivar a economia circular.

#### **4.5. Conclusão Parcial**

De acordo com as análises realizadas, a condição mais favorável para a recuperação dos tecidos de fibras de carbono impregnados com resina epóxi foi o tratamento a 500°C por 2 horas, de forma que resina epóxi possa ser removida sem degradar as fibras.

Foi possível desenvolver compósitos utilizando matriz e fase dispersa (tecidos de fibras de carbono), ambos reciclados, através de um processo de moldagem simples como a compressão a quente. A incorporação de uma camada de tecido de fibras de carbono reciclado resultou na melhor composição para reforçar o rABS, promovendo aumento nas propriedades de tração e flexão. No caso do compósito rABS/2rFC, apesar de não ter promovido o aumento das propriedades mecânicas como era esperado, os resultados foram satisfatórios, uma vez que se trata de um resíduo e que pode ser aproveitado para uma nova aplicação, ao invés de ser descartado gerando acúmulo desse tipo de resíduo.

Nessas condições, este estudo propôs uma alternativa para recuperar as fibras de carbono em forma de tecido, o qual pode ser reaproveitado como matéria-prima para a confecção de novos materiais e, assim, ser reintroduzido na cadeia produtiva.

## **CAPÍTULO 5 – COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE ACRILONITRILA-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS) RECICLADO COM FIBRAS VEGETAIS E FIBRAS DE CARBONO RECICLADAS**

### **5.1. Introdução**

Os compósitos são amplamente utilizados em aplicações onde a resistência mecânica é um dos principais parâmetros para o seu desenvolvimento. Várias áreas e indústrias como aeroespacial, automotiva, marítima, energia eólica e outras, tem investido em pesquisa para conseguir um equilíbrio entre resistência mecânica, térmica, leveza e baixo custo (RAVISHANKAR; NAYAK; KADER, 2019).

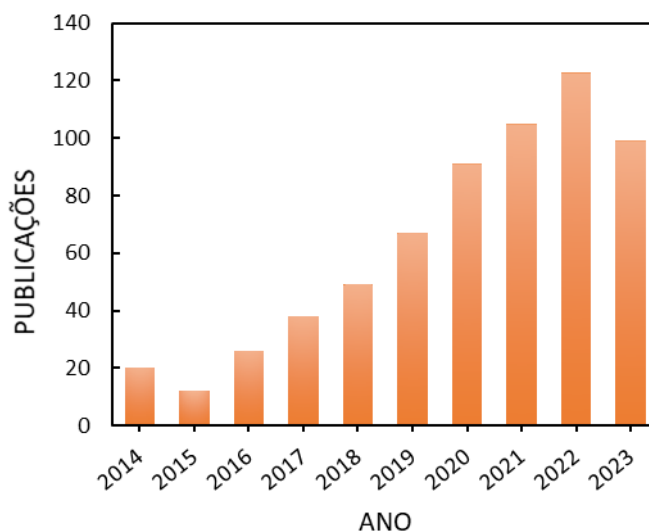
Neste contexto, os materiais compósitos híbridos utilizam mais de um tipo de reforço na mesma matriz com o objetivo de aproveitar as melhores características de cada material, combiná-las e obter um material com desempenho que atenda o projeto. As propriedades dos compósitos híbridos são influenciadas por fatores como a natureza química da matriz, composição estrutural das fibras, comprimento das fibras e interação entre as fibras e a matriz (NURAZZI *et al.*, 2020).

A demanda por consciência ambiental, preservação da natureza e benefícios para a economia social tem atraído a atenção de pesquisadores para investigar o potencial das fibras vegetais e utilizá-las em compósitos híbridos poliméricos (SURIANI *et al.*, 2021). Como visto no capítulo 3, as fibras vegetais apresentam baixa massa específica, são menos abrasivas aos equipamentos e apresentam menor custo quando comparadas com algumas fibras bastante utilizadas como reforço de compósitos como, por exemplo, as fibras de carbono. Além disso, as fibras vegetais são facilmente obtidas e consomem menos energia para a sua produção (KARIMAH *et al.*, 2021). Assim, as fibras vegetais, principalmente as fibras de juta, tem sido utilizada como reforço em compósitos poliméricos com o intuito de substituir alguns tipos de fibras sintéticas (OVALI; SANCAK, 2022; SAJIN *et al.*, 2021; SHAHINUR *et al.*, 2020).

Todavia, as fibras vegetais também apresentam algumas desvantagens em relação às fibras sintéticas, tais como: propriedades mecânicas modestas, alta absorção de umidade, entre outras. Uma alternativa para melhorar as propriedades dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais é substituir uma parte dessas fibras vegetais por fibras sintéticas, aproveitando as melhores propriedades de cada tipo de fibra (vegetal e sintética) resultando em um efeito sinérgico (RANGASAMY *et al.*, 2021).

Há vários anos, muitos pesquisadores se concentram em melhorar propriedades dos compósitos poliméricos por meio da hibridização, principalmente nos últimos quatro anos, como mostrado na Figura 53.

**Figura 53 - Número de publicações sobre compósitos híbridos reforçados com fibras vegetais na última década (dados anuais)**



Fonte: Autoria própria (2024). Dados obtidos da base Web of Science em 30 de abril de 2024, usando as palavras-chave (“hybrid composites”) AND (“natural fiber”) AND (“lignocellulosic fiber”)

Além disto, para manter as questões ambientais é possível considerar a utilização de matriz ou fibras recicladas em compósitos híbridos poliméricos, substituindo parte das fibras vegetais por uma fibra sintética reciclada e, neste caso, os resultados poderão beneficiar, também, o crescimento do mercado de reciclagem e reduzir a geração de toneladas de resíduos em fim de vida (KARUPPANNAN GOPALRAJ; KÄRKI, 2020). Neste contexto, este capítulo tem como objetivos: I) realizar uma revisão bibliográfica relacionada aos compósitos híbridos e II) reportar o desenvolvimento de compósitos híbridos utilizando como fase dispersa os tecidos de fibras de juta e algodão e tecidos de fibras de carbono recicladas em matriz de ABS reciclado.

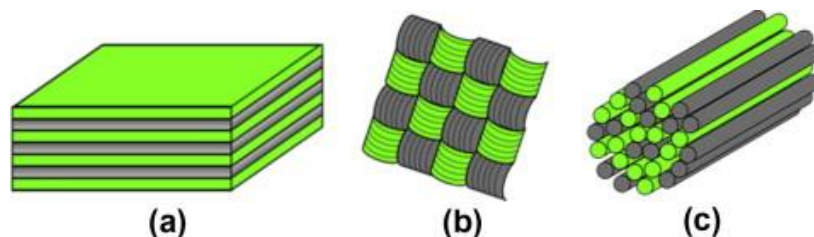
## **5.2. Revisão bibliográfica**

Há alguns anos, tem aumentado o interesse no desenvolvimento de compósitos com reforços híbridos, ou seja, contendo em sua composição dois ou mais tipos de fase dispersa. As fibras vegetais, por exemplo, têm sido utilizadas devido à abundante

disponibilidade, não toxicidade e baixo custo. As fibras sintéticas, por outro lado, apresentam propriedades mecânicas e térmicas que superam as das fibras vegetais (GUPTA; RAMESH; THOMAS, 2021). Assim, a combinação dessas fibras como fase dispersa oferece novas oportunidades para a produção de novos materiais para aplicações diversas (KHALID *et al.*, 2021).

A hibridização ocorre quando há combinação de dois ou mais tipos de matriz ou reforço diferentes entre si em relação às propriedades físicas, mecânicas, formato ou composição química. Conforme mostrado na Figura 54, os constituintes podem estar dispostos em várias camadas (estrutura do tipo laminado), com diferentes tipos de fibras ou não, e a distribuição de cada constituinte pode ser categorizada em três tipos principais: intercamada (do inglês, *interply*), intracamada (do inglês, *intraply*) ou intrafio (do inglês, *inrayarn*) (AKMAR; KRAMER; RABCZUK, 2018).

**Figura 54 - Esquema de três configurações para o desenvolvimento de compósitos híbridos: (a) intercamada ou *interply*, (b) intracamada ou *intraply*; (c) intrafio ou *inrayarn***



Fonte: Adaptado de (AKMAR; KRAMER; RABCZUK, 2018)

Assim, as fibras podem formar tecidos com um único tipo de fibra a cada camada (intercamada ou *interply*), estarem combinadas na mesma camada, no caso dos tecidos híbridos (intracamada ou *intraply*), ou podem estar misturadas aleatoriamente na mesma fibra que forma o tecido (intrafio ou *inrayarn*). Desta forma, os compósitos híbridos podem ser projetados com quantidade de camadas, formas e diferentes orientações do reforço para que as propriedades finais deste compósito híbrido atenda as demandas de cada projeto (AKMAR; KRAMER; RABCZUK, 2018).

Algumas propriedades mecânicas dos compósitos híbridos poliméricos podem ser influenciadas pelo comprimento e fração volumétrica de fibra (SEYDIBEYOĞLU *et al.*, 2023). No estudo realizado por Prakash, *et al.* (2021), em compósitos de resina epóxi reforçados com tecido de fibras de vidro S, fibras de caule de bananeira e folhas

de abacaxi, foi investigada a influência do comprimento das fibras (20cm, 30cm e 40cm) e do volume de fibra (30%, 40% e 50%) nas propriedades de flexão. Os resultados mostraram que à medida que o comprimento das fibras do compósito híbrido aumenta, a resistência à flexão também aumenta em 3-6%. Em relação ao volume de fibra, a resistência a flexão não é linear, ou seja, apresentou tendência crescente de 30% para 40%, e na fração volumétrica de 50% começou a diminuir (PRAKASH *et al.*, 2021).

Karthi *et al.* (2021) estudaram a o efeito da fração volumétrica nas propriedades mecânicas de tração, flexão, impacto e cisalhamento interlaminar de compósitos híbridos de resina epóxi reforçados com fibras de linho e fibras de juta nas proporções 0/40, 10/30, 20/20, 30/10 e 40/0. Os resultados apresentados mostraram que a incorporação de até 30% em peso (ou massa, m/m) de fibras de linho podem ocasionar aumento de até 137% na resistência a tração, 80% na resistência a flexão, 82% na resistência ao impacto e 60% na resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos híbridos em comparação com o compósito contendo somente fibras de juta (KARTHI *et al.*, 2021).

Uma das grandes diferenças entre as fibras vegetais e sintéticas é a interação com a água. O alto grau de hidrofiliabilidade associada a baixa ligação interfacial pode comprometer o uso de fibras vegetais como reforços em algumas matrizes termoplásticas. Isso ocorre devido à fraca afinidade entre as fibras celulósicas hidrofílicas (caráter polar) com os termoplásticos apolares. Além disso, a água na superfície da fibra funciona como um agente separador na interface com essa matriz hidrofóbica. Isso porque as energias superficiais da fibra e da matriz são significativamente diferentes, o que dificulta o molhamento e produz uma distribuição não uniforme dessas fibras dentro da matriz, reduzindo a interação entre a fibra e a matriz e diminuindo também a força de adesão (PALACIOS HINESTROZA *et al.*, 2019).

Na literatura, Sathiyamoorthy e Senthilkumar (2020) investigaram o efeito na hibridização e sequência de empilhamento (J-J-J-J, C-C-C-C, J-C-C-J e C-J-J-C) nas propriedades de tração, impacto, microdureza, absorção de água e comportamento térmico de compósitos híbridos de resina epóxi reforçados com tecidos de fibras de juta (J) e carbono (C). Os resultados revelaram que os compósitos híbridos (J-C-C-J) obtiveram melhores resultados de resistência à tração com aumento de até 48% em

relação a (C-J-J-C). O arranjo C-J-J-C apresentou melhor resistência ao impacto, melhor resistência à umidade e maior estabilidade térmica (SATHIYAMOORTHY; SENTHILKUMAR, 2020). Desta forma, a hibridização e a sequência que os tecidos são empilhados têm influência nas propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos híbridos.

Embora apresentem grande potencial, ainda são poucos os estudos relacionados ao desenvolvimento de compósitos híbridos utilizando tecidos reciclados combinados com fibras vegetais em matriz de ABS reciclado. Por isso, este capítulo apresenta nas próximas seções o desenvolvimento de compósitos híbridos de ABS reciclado proveniente de resíduos elétricos e eletrônicos reforçados com tecidos de fibras de juta e algodão e tecidos de fibras de carbono reciclados.

### **5.3. Parte experimental**

#### *5.3.1. Materiais*

Neste estudo foi utilizada como matriz o terpolímero acrilonitrila butadieno estireno reciclado (rABS), já descrito no capítulo 3. Como fase dispersa foram utilizados dois tipos de reforços: um sintético e um de origem vegetal. Como reforço sintético foram utilizados tecidos de fibras de carbono reciclados (rFC) que foram obtidos a partir de resíduos de compósitos reforçados com tecidos de fibras de carbono submetidos a tratamento térmico a 500°C por 2 horas, para degradar a resina e recuperar os tecidos de fibras de carbono bidirecionais (capítulo 4). Além disso, os tecidos de fibras vegetais também foram utilizados como reforços nos compósitos: o tecido T1 (Juta, gramatura 365 g.m<sup>-2</sup>); o tecido T2 (Juta, gramatura 445 g.m<sup>-2</sup>); e o tecido T3 (Juta/Algodão, gramatura 360 g.m<sup>-2</sup>), vistos no capítulo 2.

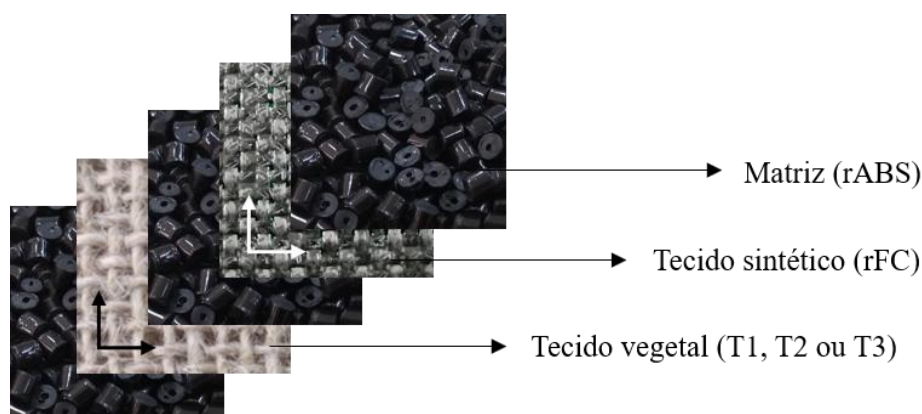
#### *5.3.2. Moldagem dos compósitos híbridos*

Para a moldagem, os tecidos de fibras de carbono reciclados e os tecidos vegetais foram cortados nas dimensões dos moldes (confeccionados em liga de alumínio) para o ensaio de flexão/ impacto (79 mm x 130 mm) e tração (127 mm x 248 mm). No caso do molde para tração, os tecidos de fibras de carbono apresentavam largura menor que a do molde e, por isso, foi necessário utilizar duas partes do tecido

reciclado para formar uma camada. Para facilitar a extração da placa moldada, um desmoldante a base de cera de carnaúba e derivados de petróleo foi aplicado nos moldes antes da moldagem dos compósitos.

Em seguida, o ABS reciclado (rABS) foi pesado em uma balança analítica e dividido em três partes iguais. A primeira parte foi inserida no molde e, em sequência, foram acomodados o tecido de fibra vegetal, a segunda parte do rABS, o tecido de fibras de carbono reciclado, completando o molde com o restante do rABS, e formando uma estrutura do tipo “sanduíche” (Figura 55). A sequência de empilhamento dos compósitos híbridos moldados está descrita na Tabela 17.

**Figura 55 - Esquema de preparação dos compósitos híbridos de rABS com tecido de fibras de carbono reciclado e tecidos de fibras vegetais**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagem fora de escala.

**Tabela 17 - Códigos utilizados para os compósitos fabricados e suas quantidades de tecidos**

Nomenclatura	rFC	T1	T2	T3
rABS/1rFC/1T1	1 camada	1 camada	-	-
rABS/1rFC/1T2	1 camada	-	1 camada	-
rABS/1rFC/1T3	1 camada	-	-	1 camada

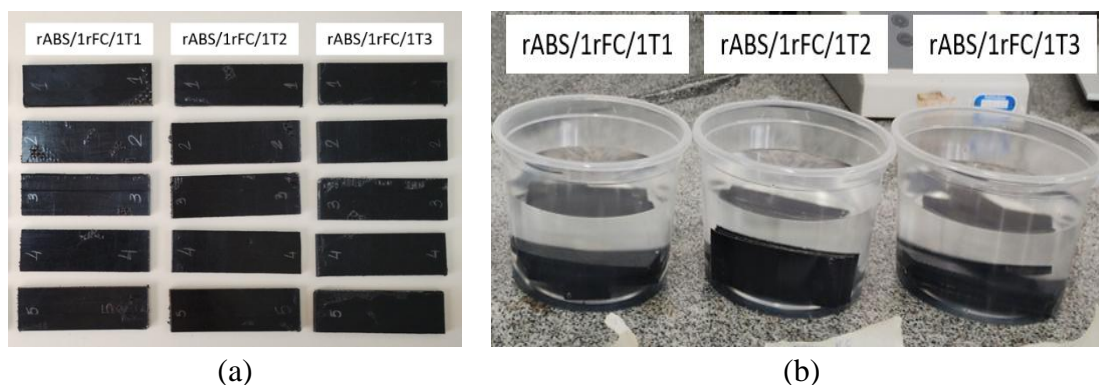
Os compósitos híbridos foram moldados pelo método de compressão a quente, utilizando uma prensa hidráulica com aquecimento a 200°C, por 30 minutos com força de moldagem de 6 toneladas. Na sequência, foram deixados resfriar até atingir a

temperatura ambiente, quando as placas foram desmoldadas. As espessuras das placas moldadas foram de 3,4 mm para o ensaio de flexão, tração e impacto.

### 5.3.3. Ensaio de absorção de água

Para a realização do ensaio de absorção de água foram confeccionados corpos de prova, conforme a norma ASTM D570, com as dimensões: 25 mm de largura x 76,2 mm de comprimento x 3,4 mm de espessura (Figura 56a). Inicialmente, os corpos de prova foram secos em estufa da marca Nova Ética, a 105°C por 24 horas. Após a secagem, os corpos de prova foram pesados em balança analítica e, em seguida, imersos em água destilada a temperatura ambiente (Figura 56b). Em tempos pré-determinados os corpos de prova foram retirados da água, secos com papel toalha, pesados na balança analítica e novamente colocados no banho. Esse processo foi repetido por 63 dias, quando se observou que não houve mais variação de massa significativa.

**Figura 56 - Fotografia dos corpos de prova dos compósitos híbridos rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3: (a) antes do ensaio de absorção de água; (b) durante o ensaio, imersos em água destilada, segundo a norma ASTM D570**



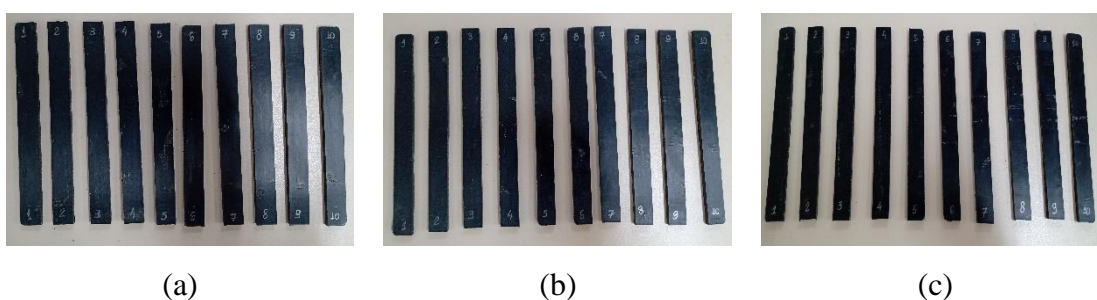
Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

Com o desenvolvimento deste ensaio, foi realizado um comparativo do perfil de absorção de água levando em consideração a matriz (rABS), os compósitos contendo somente os tecidos de fibras vegetais (rABS/1T1, rABS/1T2 e rABS/1T3), os compósitos contendo somente os tecidos de fibras de carbono recicladas (rABS/1rFC e rABS/2rFC) e os compósitos híbridos (rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3).

### 5.3.4. Ensaios mecânicos

Para os ensaios de flexão de três pontos foram confeccionados corpos de prova nas dimensões de 12,7 mm de largura x 127 mm de comprimento (Figura 57), de acordo com a norma ASTM D790. Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina para ensaios mecânicos (EMIC DL 10000). A célula de carga utilizada foi de 500kgf, a distância entre os apoios foi de 54,4 mm e a velocidade do ensaio foi de 1,45 mm.min<sup>-1</sup>, a qual foi calculada a partir da Equação 4 apresentada no capítulo 3.

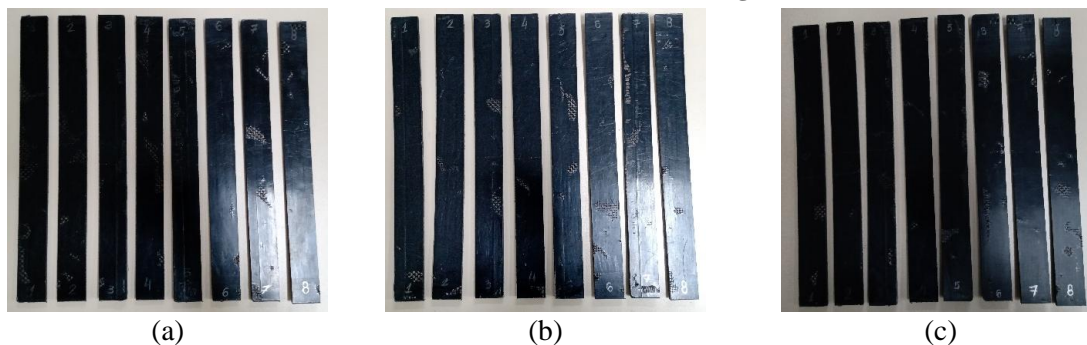
**Figura 57 - Fotografia dos corpos de prova para ensaio de flexão dos compósitos híbridos: (a) rABS/1rFC/1T1; (b) rABS/1rFC/1T2; (c) rABS/1rFC/1T3, seguindo a norma ASTM D790**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

Os ensaios de tração dos compósitos híbridos rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3 foram realizados em temperatura ambiente. Os corpos de prova (Figura 58) foram cortados nas dimensões de 25mm de largura x 250 mm de comprimento, segundo a norma ASTM D3039 e testados em máquina universal para ensaios mecânicos (EMIC DL 30000), utilizando célula de carga de 2000 kgf e velocidade de ensaio de 2,0 mm.min<sup>-1</sup>. Para garantir que todos os corpos de prova tivessem os tecidos bidirecionais, apenas corpos de prova das extremidades foram considerados aptos para o ensaio de tração.

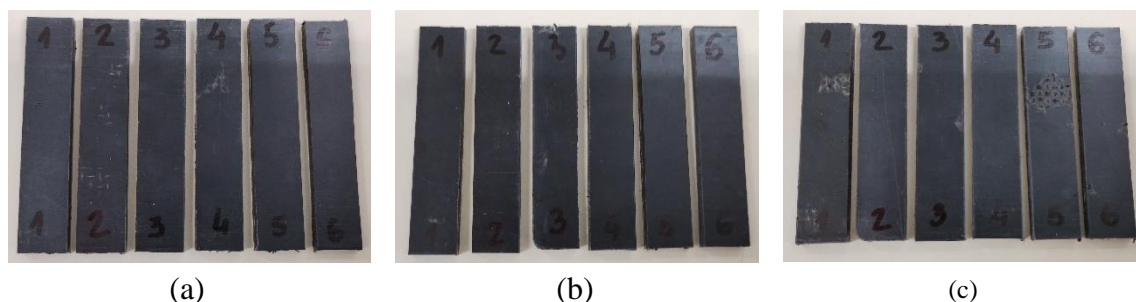
**Figura 58 - Fotografia dos corpos de prova para ensaio de tração dos compósitos híbridos: (a) rABS/1rFC/1T1; (b) rABS/1rFC/1T2; (c) rABS/1rFC/1T3, seguindo a norma ASTM D3039**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagens fora de escala.

A avaliação das propriedades de impacto dos materiais foi realizada de acordo com a norma ASTM D256, cujas dimensões dos corpos de prova foram de 63,5 x 12,7 x 4 mm<sup>3</sup> (Figura 59) e entalhe em “V” de 2,54 mm. O ensaio de impacto foi realizado em um equipamento de impacto pendular da marca Instron modelo CEAST 9050, com pêndulo de 1J na configuração de impacto Izod.

**Figura 59 - Fotografia dos corpos de prova para ensaio de impacto dos compósitos híbridos: (a) rABS/1rFC/1T1; (b) rABS/1rFC/1T2; (c) rABS/1rFC/1T3, seguindo a norma ASTM D256**



Fonte: Autoria própria (2024). Imagem fora da escala.

Posteriormente, foram realizados a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey para avaliar o efeito da hibridização nos compósitos híbridos de rABS contendo tecidos de fibras de carbono reciclados e a influência da combinação com diferentes tecidos de fibras de juta nas propriedades mecânicas. Foi realizada uma comparação dos resultados obtidos nos ensaios de flexão, tração e impacto dos rABS, dos compósitos contendo somente tecidos vegetais (rABS/1T1, rABS/1T2 e rABS/1T3, compósitos contendo somente tecidos de fibras de carbono reciclado (rABS/1rFC e rABS/2rFC) e dos compósitos híbridos (rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3). Assim, os resultados foram considerados estatisticamente significativos se os valores de  $p$  fossem  $<0,05$ .

### 5.3.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Após os ensaios de tração, as superfícies de fratura dos compósitos híbridos rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3 foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As imagens foram obtidas em um equipamento Hitachi, modelo TM 3000. Cada amostra foi fixada com fita de carbono no suporte. Neste trabalho não foi realizado o recobrimento metálico nas amostras. As análises

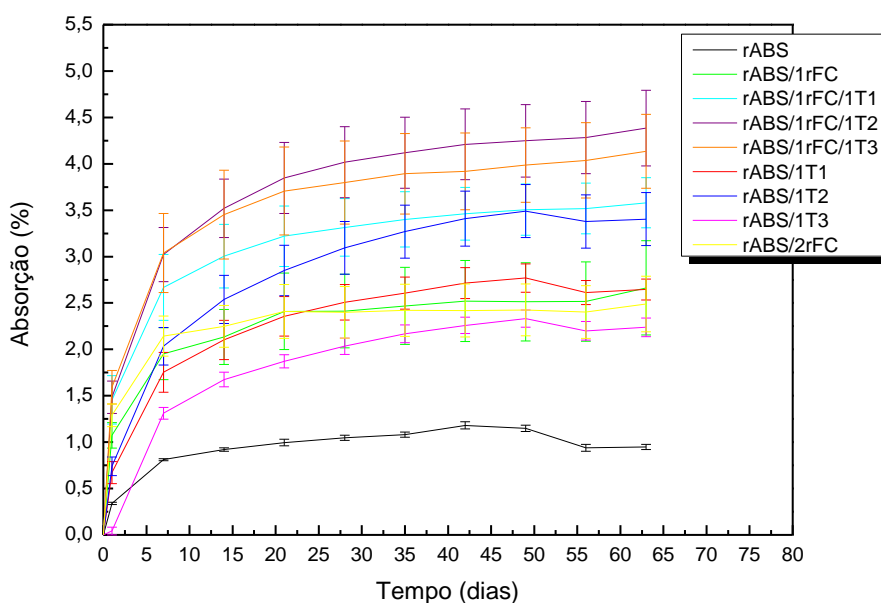
foram realizadas com uma tensão de aceleração de 5kV utilizando filamento de tungstênio.

## 5.4. Resultados e discussão

### 5.4.1 Absorção de água

A Figura 60 representa os perfil de absorção de água do rABS, dos compósitos contendo somente tecido de fibras vegetais (rABS/1T1, rABS/1T2 e rABS/1T3), compósitos contendo somente tecidos de fibras de carbono reciclado (rABS/1rFC, rABS/2rFC) e dos compósitos híbridos (rABS/1rFC/T1, rABS/1rFC/T2 e rABS/1rFC/T3).

**Figura 60 - Absorção de água (%) em função do tempo (dias) do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, e dos compósitos híbridos (rABS/1rFC/T1, rABS/1rFC/T2 e rABS/1rFC/T3)**



A partir dos resultados (Figura 60) observou-se que todos os materiais apresentaram absorção de água mais significativa nos primeiros sete dias, tendendo a se estabilizarem após 40 dias. O material que apresentou menor porcentagem de absorção de água foi o rABS (0,95%, após 63 dias), o qual possui em sua estrutura química grupos polares e apolares. A absorção ocorre pela movimentação de partículas de água para dentro da estrutura do material, se aloca entre as cadeias do polímero e como a

afinidade do ABS com água não é alta, o rABS não reage com a água, suas moléculas permanecem não ligadas podendo mover-se livremente. Nesses casos, é possível simplesmente retirar a umidade do material secando-o, e não se observa o inchamento do material (HAMROL *et al.*, 2023).

Considerando os compósitos contendo somente tecidos de fibras de carbono reciclado (rABS/1rFC e rABS/2FC), a absorção de água foi maior quando comparado com o rABS, atingindo percentuais de 2,49% e 2,66%, após 63 dias, respectivamente. A quantidade de camadas (uma e duas) de tecidos de fibras de carbono reciclados não influenciou no aumento significativo da absorção de água no compósito. As fibras de carbono são resistentes à umidade, solventes, substâncias ácidas e básicas a temperatura ambiente (KORKEES, 2023). A porcentagem de água absorvida nos compósitos rABS/1rFC e rABS/2FC pode ter ocorrido por capilaridade nos espaços vazios entre a interface fibra-matriz. Esses espaços são produzidos pela baixa molhabilidade da matriz por toda a extensão do tecido de fibras de carbono (ALMUDAIHESH *et al.*, 2021).

Já em relação aos compósitos contendo tecidos de fibras vegetais foi observado que as fibras de vegetais influenciaram na absorção de água. Como já discutido no capítulo 3, a absorção de água nesse tipo de fibra ocorre devido ao caráter hidrofílico das fibras vegetais (BALAN; RAVICHANDRAN, 2020). E, a composição de cada fibra vegetal pode influenciar em sua afinidade com a água, pois deve ser considerada a quantidade de celulose, hemiceluloses e lignina, uma vez que a água reage com a região não cristalina das fibras vegetais (LIVANI *et al.*, 2023; SAHU; GUPTA, 2020). Por isso, compósitos contendo o tecido T2 tendem a apresentar a maior absorção de água, pois contém maior teor de hemiceluloses em sua estrutura em comparação com o compósito contendo o tecido T3, o qual também contém fibras de algodão.

Em relação aos compósitos híbridos, foi observado que os materiais que apresentaram maior absorção de água, com percentuais de 3,58%, 4,38% e 4,13% após 63 dias, foram os compósitos rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3, respectivamente. Isso pode estar associado ao fato de que as fibras vegetais são mais susceptíveis a água e, também, devido à baixa molhabilidade da matriz nas fibras de carbono e entre as fibras de carbono e as fibras vegetais. Isso pode ter aumentado a quantidade de microfissuras no material promovendo a entrada de maior quantidade de água por capilaridade nos materiais (SUJON; HABIB; ABEDIN, 2020).

### 5.4.2 Ensaios mecânicos

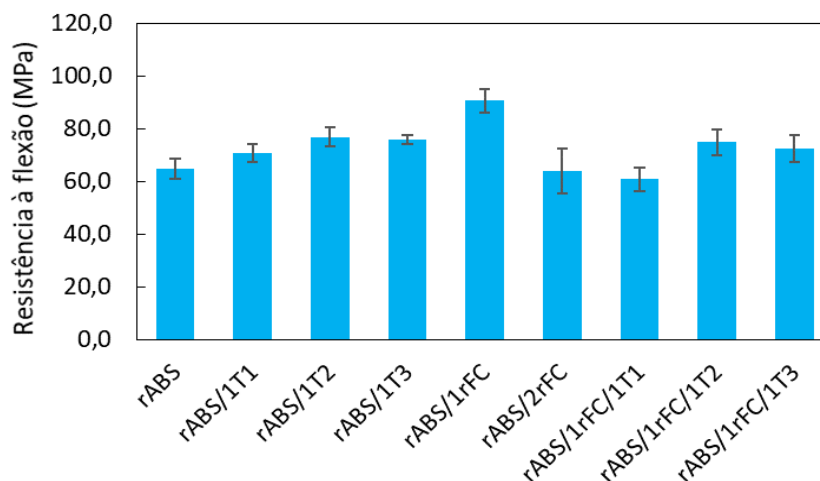
Na Tabela 18 e nas Figuras 61, 62 e 63 estão apresentados os resultados dos ensaio de flexão realizados no rABS, nos compósitos contendo somente tecidos de fibras vegetais (rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3), nos compósitos contendo somente tecidos de fibras de carbono reciclado (rABS/1rFC, rABS/2rFC) e nos compósitos híbridos (rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3).

**Tabela 18 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de flexão do rABS dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3.**

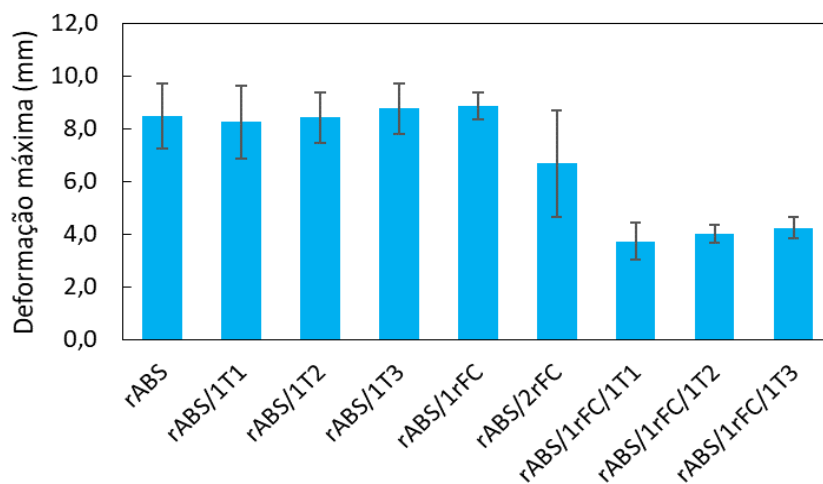
Material	Resistência à flexão (MPa)	Deformação máxima (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
rABS	64,80 ± 3,75 <sup>CD</sup>	8,50 ± 1,23 <sup>A</sup>	2,63 ± 0,18 <sup>D</sup>
rABS/1T1	70,82 ± 3,48 <sup>BC</sup>	8,27 ± 1,38 <sup>A</sup>	3,01 ± 0,16 <sup>CD</sup>
rABS/1T2	76,90 ± 3,66 <sup>B</sup>	8,43 ± 0,97 <sup>A</sup>	3,20 ± 0,20 <sup>C</sup>
rABS/1T3	76,02 ± 1,62 <sup>B</sup>	8,77 ± 0,95 <sup>A</sup>	3,15 ± 0,15 <sup>C</sup>
rABS/1rFC	90,62 ± 4,58 <sup>A</sup>	8,86 ± 0,50 <sup>A</sup>	3,18 ± 0,15 <sup>C</sup>
rABS/2rFC	63,86 ± 8,52 <sup>D</sup>	6,68 ± 2,03 <sup>B</sup>	2,79 ± 0,44 <sup>CD</sup>
rABS/1rFC/1T1	60,88 ± 4,50 <sup>D</sup>	3,73 ± 0,70 <sup>C</sup>	3,92 ± 0,74 <sup>B</sup>
rABS/1rFC/1T2	74,89 ± 4,85 <sup>B</sup>	4,03 ± 0,35 <sup>C</sup>	4,44 ± 0,37 <sup>A</sup>
rABS/1rFC/1T3	72,54 ± 5,04 <sup>B</sup>	4,24 ± 0,40 <sup>C</sup>	4,37 ± 0,24 <sup>AB</sup>

\*Médias que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes (Teste de Tukey com p-valor < 0,05).

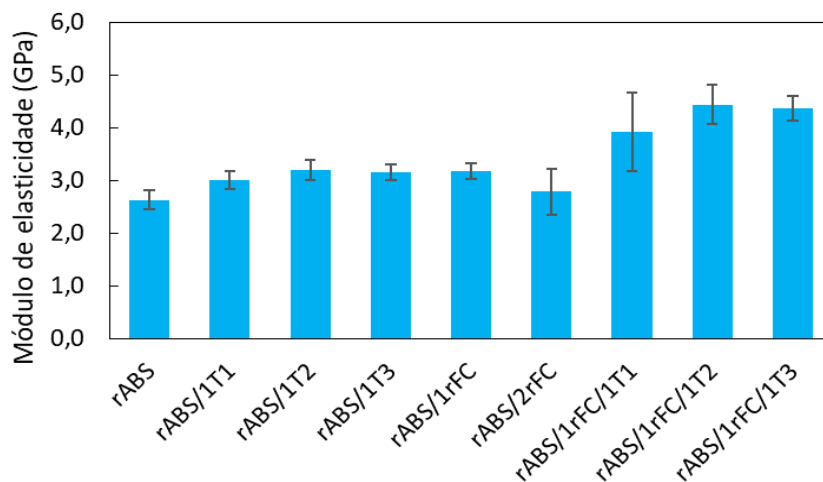
**Figura 61 - Gráfico da resistência à flexão do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3**



**Figura 62 - Gráfico da deformação em flexão do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3**



**Figura 63 - Gráfico do módulo de elasticidade em flexão do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3**



A partir da Tabela 18 e Figuras 61, 62 e 63 é possível observar que os compósitos híbridos rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3 apresentaram valores de resistência de  $60,88 \pm 4,50$  MPa,  $74,89 \pm 4,85$  MPa e  $72,54 \pm 5,04$  MPa, respectivamente. Com exceção do rABS/1rFC/1T1, a combinação de fibras de carbono recicladas e fibras vegetais promoveram aumento que variou de 12 a 16% na resistência à flexão comparado com o rABS.

Durante o ensaio de flexão, há indução de tensões de tração abaixo do corpo de prova e tensões de compressão na face onde o carregamento ocorre, induzindo tensões

de cisalhamento. Então, a resistência à tração das fibras irá influenciar na resistência à flexão dos compósitos. E, como visto no capítulo 2, os tecidos vegetais que apresentaram os melhores resultados de resistência à tração foram os tecidos T2 e T3, o que corrobora com os melhores resultados obtidos tanto para os compósitos contendo somente as fibras vegetais quanto os compósitos híbridos rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3. Além disso, a interação interfacial também influencia na resistência à flexão e, quando essa interação é fraca pode ocorrer falha na interface devido às tensões de cisalhamento (FONG; MARIATTI; TAKAGI, 2012).

Dentre os materiais estudados, o que apresentou melhor resultado de resistência à flexão foi o compósito rABS/1rFC. No estudo de Fong *et al.* (2012), foram produzidos laminados híbridos de ABS reforçados com fibras de juta e fibras de carbono na forma de tecido, com diferentes sequências de empilhamento dos tecidos. Os resultados obtidos mostraram que os compósitos contendo quatro camadas de tecido de carbono (CCCC) promoveu aumento de 312% na resistência à flexão do ABS. Quando combinado com tecido de fibras de juta em uma configuração carbono-juta-juta-carbono houve aumento de 192% em relação ao ABS e na configuração juta-carbono-juta-carbono o aumento foi de 42%. Os autores sugerem que a sequência de empilhamento dos tecidos têm influência sobre as propriedades finais dos compósitos (FONG; MARIATTI; TAKAGI, 2012).

No caso deste trabalho, a incorporação de apenas uma camada de tecido de fibras de carbono reciclado promoveu o aumento de 40% na resistência à flexão comparado com o rABS. Todavia, quando foram incorporadas duas camadas de tecido de fibras de carbono recicladas não houve aumento da resistência do rABS. Isso pode estar associado à baixa adesão interfacial entre as fibras e a matriz.

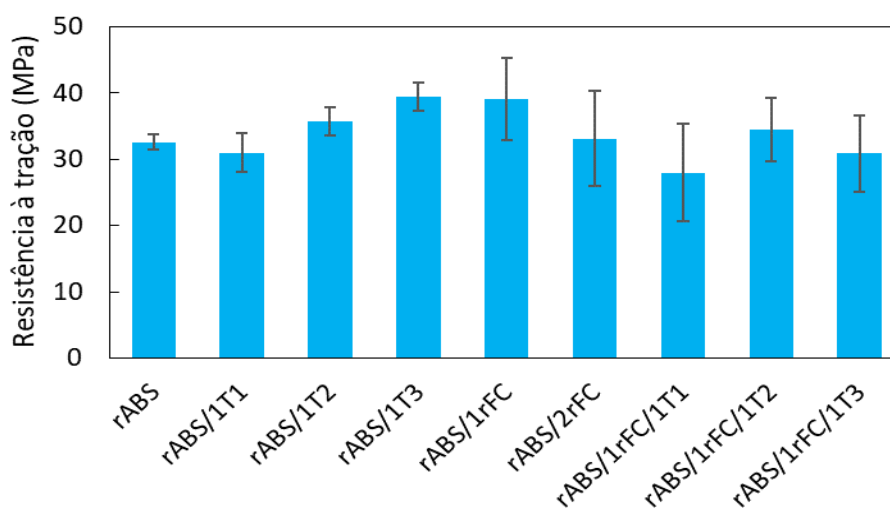
Na Tabela 19 e Figuras 64, 65 e 66 estão apresentados os resultados dos ensaio de tração realizados no rABS, nos compósitos contendo somente tecidos de fibras vegetais (rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3), nos compósitos contendo somente tecidos de fibras de carbono reciclado (rABS/1rFC, rABS/2rFC) e nos compósitos híbridos (rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3).

**Tabela 19 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de tração do rABS dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3**

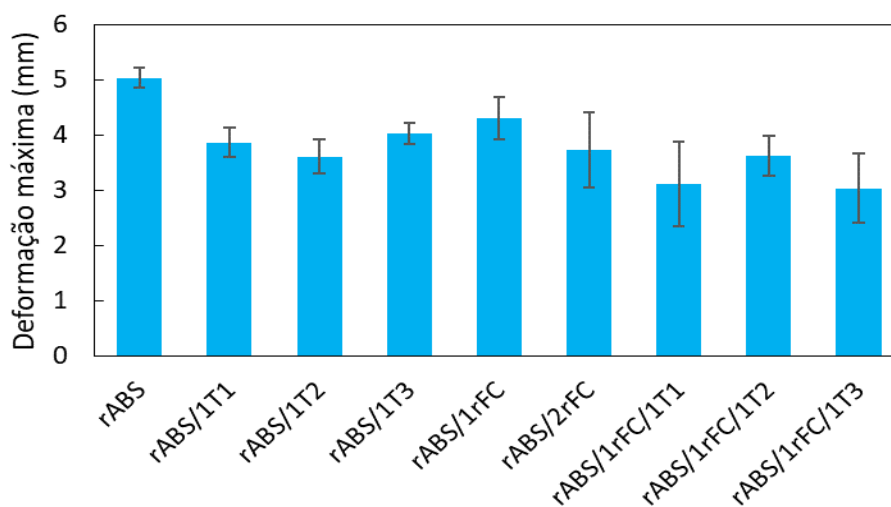
Material	Resistência à tração (MPa)	Deformação máxima (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
rABS	32,56 ± 1,14 <sup>BCD</sup>	5,04 ± 0,18 <sup>A</sup>	1,21 ± 0,09 <sup>D</sup>
rABS/1T1	31,00 ± 2,99 <sup>CD</sup>	3,87 ± 0,27 <sup>BC</sup>	1,41 ± 0,15 <sup>CD</sup>
rABS/1T2	35,65 ± 2,14 <sup>ABC</sup>	3,61 ± 0,31 <sup>CD</sup>	2,27 ± 0,20 <sup>A</sup>
rABS/1T3	39,40 ± 2,14 <sup>A</sup>	4,03 ± 0,20 <sup>BC</sup>	2,16 ± 0,35 <sup>AB</sup>
rABS/1rFC	39,12 ± 6,16 <sup>AB</sup>	4,31 ± 0,38 <sup>B</sup>	1,76 ± 0,16 <sup>BC</sup>
rABS/2rFC	33,11 ± 7,13 <sup>ABCD</sup>	3,73 ± 0,68 <sup>BCD</sup>	1,83 ± 0,31 <sup>ABC</sup>
rABS/1rFC/1T1	28,00 ± 7,41 <sup>D</sup>	3,12 ± 0,77 <sup>D</sup>	1,53 ± 0,53 <sup>CD</sup>
rABS/1rFC/1T2	34,47 ± 4,74 <sup>ABCD</sup>	3,63 ± 0,36 <sup>BCD</sup>	1,49 ± 0,39 <sup>CD</sup>
rABS/1rFC/1T3	30,86 ± 5,76 <sup>CD</sup>	3,04 ± 0,63 <sup>D</sup>	2,08 ± 0,41 <sup>AB</sup>

\*Médias que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes (Teste de Tukey com p-valor < 0,05).

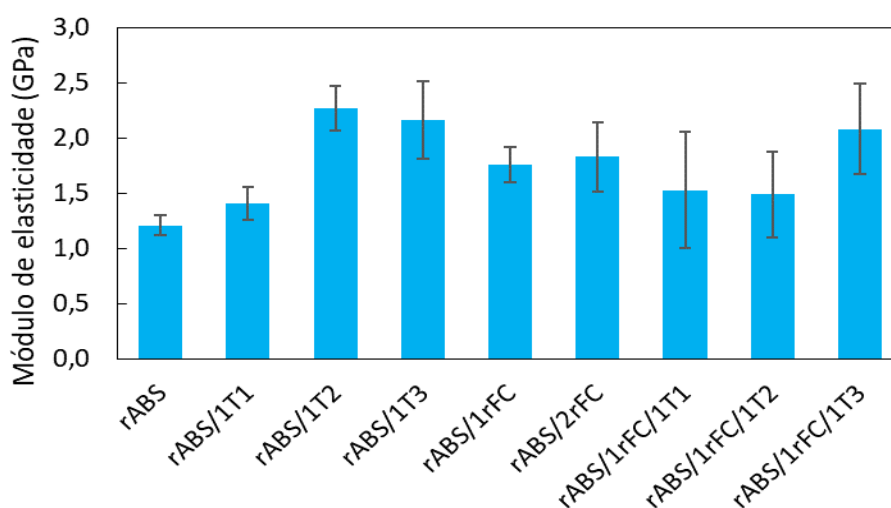
**Figura 64 - Gráfico da resistência à tração do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3**



**Figura 65 - Gráfico da deformação em tração do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3**



**Figura 66 - Gráfico do módulo de elasticidade em tração do rABS e dos compósitos rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3**



A partir da Tabela 19 e Figuras 64 e 65 pode ser observado que o material que apresentou o melhor resultado de resistência à tração foi o compósito rABS/1T3 cujo valor foi de  $39,40 \pm 2,14$  MPa, um aumento de 20% em relação ao rABS, o qual apresentou resistência à tração de  $32,56 \pm 1,14$  MPa. Isso pode estar associado ao efeito das intersecções dos fios na estrutura, uma vez que o tecido T3 apresenta o maior número de cordões/cm (7,0), como mostrado no capítulo 2. O aumento do número de fios na direção do carregamento aumenta a área de atrito e, assim, a resistência à tração é melhorada (SHERAZY *et al.*, 2015).

Já quando é adicionada uma camada de tecido de carbono reciclado no compósito contendo o tecido T2, a resistência à tração é diminuída, se assemelhando aos valores do rABS. Isso pode estar associado a baixa adesão interfacial entre as fibras utilizadas. As propriedades de tração dos compósitos são dependentes da resistência e módulo da fibra, da adesão interfacial, dos tipos de arranjo do tecido e da maneira como esses tecidos estão alocados dentro da matriz (SATHIYAMOORTHY; SENTHILKUMAR, 2020).

Em relação ao módulo de elasticidade Figura 66, os compósitos que apresentaram os maiores valores foram os compósitos rABS/1T2 e rABS/1T3 e rABS/1rFC/1T3, no qual apresentaram aumento de 87%, 78% e 71%, respectivamente, em comparação com o rABS. Portanto, embora a hibridização não tenha promovido o aumento na resistência à tração dos materiais, no caso do rABS/1rFC/1T3, a combinação das fibras promoveu a melhora na rigidez do material.

Na Tabela 20 estão os valores médios das propriedades após os ensaios de impacto do rABS, rABS/1T1, rABS/1T2, rABS/1T3, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3.

**Tabela 20 - Resultados dos valores médios dos ensaios de impacto e desvio padrão do rABS, rABS/1rFC, rABS/2rFC, rABS/1rFC/T1, rABS/1rFC/T2 e rABS/1rFC/T3**

<b>Material</b>	<b>Energia Absorvida* (%)</b>	<b>Resistência ao impacto* (J/m)</b>
rABS	28,18 ± 2,62 <sup>B</sup>	91,15 ± 8,17 <sup>B</sup>
rABS/1T1	33,79 ± 4,02 <sup>B</sup>	105,54 ± 12,56 <sup>B</sup>
rABS/1T2	33,93 ± 8,64 <sup>B</sup>	106,00 ± 27,00 <sup>B</sup>
rABS/1T3	30,85 ± 4,12 <sup>B</sup>	96,35 ± 12,85 <sup>B</sup>
rABS/1rFC	35,52 ± 2,46 <sup>B</sup>	110,87 ± 7,69 <sup>B</sup>
rABS/2rFC	50,85 ± 16,97 <sup>A</sup>	158,80 ± 53,00 <sup>A</sup>
rABS/1rFC/T1	38,50 ± 5,02 <sup>AB</sup>	120,28 ± 15,67 <sup>AB</sup>
rABS/1rFC/T2	38,81 ± 3,30 <sup>AB</sup>	121,24 ± 10,31 <sup>AB</sup>
rABS/1rFC/T3	40,35 ± 5,12 <sup>AB</sup>	126,03 ± 16,00 <sup>AB</sup>

\* Médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si no nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

Os resultados obtidos após análise de variância e teste de Tukey mostraram que a incorporação apenas de tecidos de fibra de juta não resultou em aumento na resistência

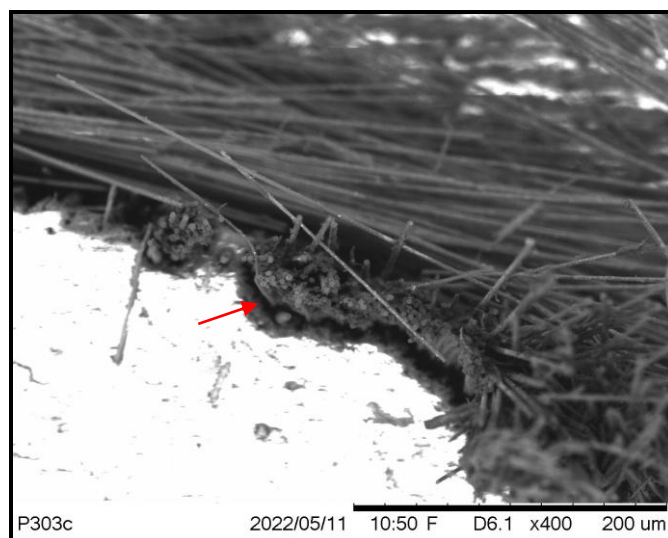
ao impacto de rABS/1T1 ( $105,54 \pm 12,56$  J/m), rABS /1T2 ( $106,00 \pm 27,00$  J/m), rABS/1T3 ( $96,35 \pm 12,85$  J/m) em comparação com rABS ( $91,15 \pm 8,17$  J/m). Situação semelhante ocorreu em compósitos contendo apenas uma camada de tecido de fibras de carbono reciclado (rABS/1rFC), o qual apresentou resistência ao impacto de  $110,87 \pm 7,69$  J/m. Entretanto, a hibridização possibilitou um acréscimo percentual variando de 32 a 38% na resistência ao impacto de rABS/1rFC/1T1 ( $120,28 \pm 15,67$  J/m), rABS/1rFC/1T2 ( $121,24 \pm 10,31$  J/m) e rABS/1rFC/ 1T3 ( $126,03 \pm 16,00$  J/m). O melhor resultado foi obtido para o compósito contendo duas camadas de tecido de fibras de carbono reciclado (rABS/2rFC), com resistência ao impacto de  $158,80 \pm 53,00$  J/m, um aumento de 74% em relação ao rABS.

Em estudo da literatura, Sathiyamoorthy *et al.* (2020) avaliaram compósitos híbridos de fibras de juta e carbono quanto ao efeito da hibridização do tecido e a sequência de empilhamento nas propriedades mecânicas em tração, impacto, microdureza, absorção de água e comportamento térmico dos materiais. Os resultados revelaram que compósitos híbridos são termicamente mais estáveis em temperaturas mais elevadas quando comparados com compósitos contendo somente fibras de juta. Compósitos híbridos empilhados de forma que os tecidos sintéticos permaneçam no meio do corpo de prova, ou seja, no padrão juta-carbono-carbono-juta apresentaram os melhores resultados de resistência a tração. Já a configuração carbono-juta-juta-carbono, exibiu maior resistência ao impacto ( $108,45 \text{ kJ/m}^2$ ) e melhor resistência a absorção de água quando comparado com compósitos contendo somente tecido de fibras de juta (SATHIYAMOORTHY; SENTHILKUMAR, 2020). Deste modo, os compósitos híbridos possibilitam combinações que podem resultar em diferentes propriedades dos materiais.

#### 5.4.3 Microscopia eletrônica de varredura - MEV

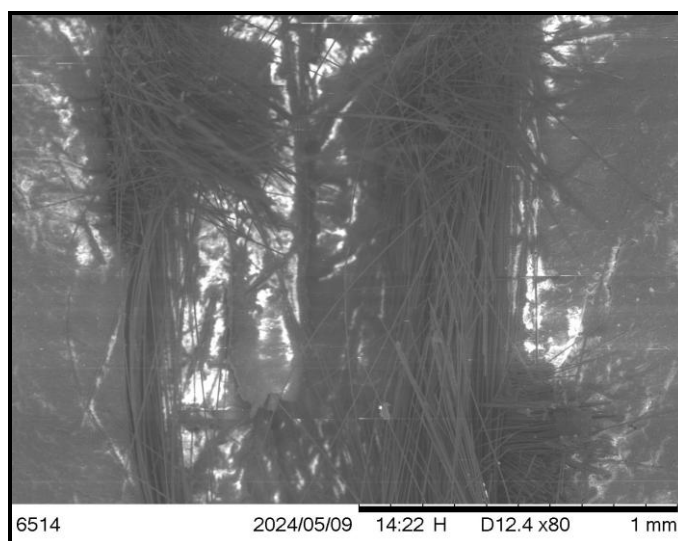
Na Figura 67 e 68 estão apresentadas as imagens de MEV obtidas da superfície da fratura após os ensaios de tração realizados nos compósitos contendo somente fibras de carbono recicladas (rABS/1rFC e rABS/2rFC).

**Figura 67 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração rABS/1rFC. Aumento de 400x**



Fonte: Aatoria própria (2024)

**Figura 68 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração rABS/2rFC. Aumento de 80x.**



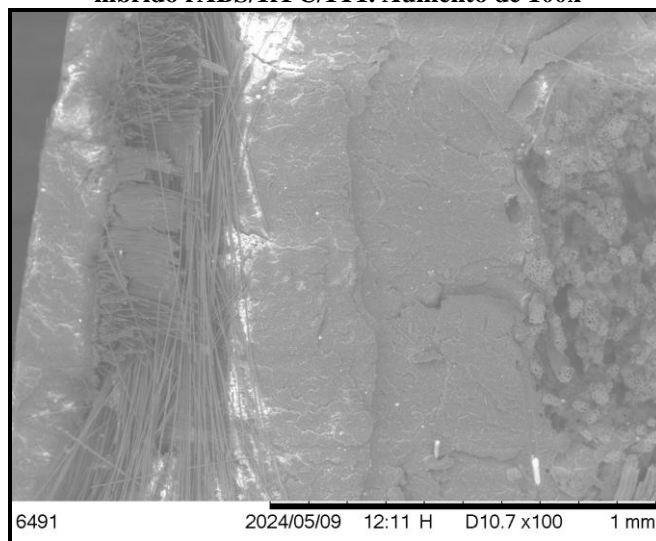
Fonte: Aatoria própria (2024)

Na figura 67 é possível observar mecanismos de falhas mecânicas como a quebra de fibras e lacunas entre a matriz e as fibras (indicada pela seta na cor vermelha). Essas lacunas estão associadas a baixa adesão superficial. Em geral, os polímeros termoplásticos, como o ABS, são polares, enquanto as fibras de carbono são apolares, o que resulta na baixa molhabilidade entre os materiais, ou seja, há baixa . Já na Figura 68 é possível verificar as duas camadas de tecido de fibras de carbono recicladas no compósito rABS/2rFC. As fibras estão dispostas paralelamente à superfície de fratura e, também, transversalmente à superfície, comprovando ser um tecido bidirecional.

Observa-se, também que no compósito rABS/2rFC houve dificuldade da resina permear no tecido de fibras de carbono, principalmente no centro, o que pode justificar o não aumento na resistência a tração do material contendo duas camadas de tecidos de fibras de carbono.

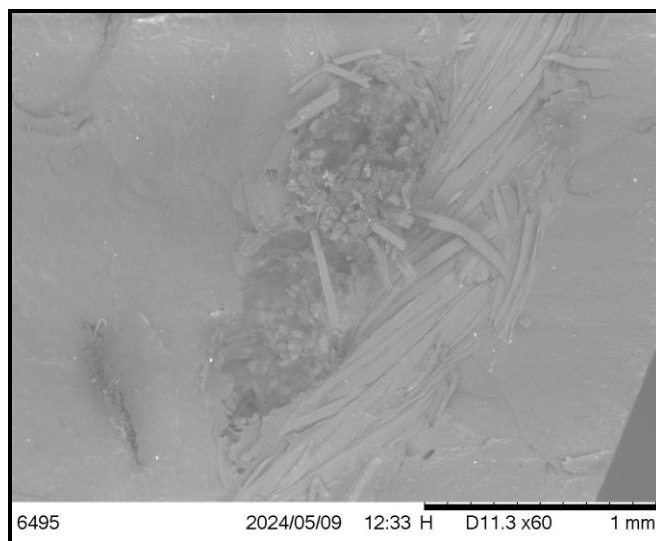
Nas Figuras 69, 70 e 71 estão apresentadas as imagens de MEV obtidas da superfície após os ensaios de tração dos compósitos híbridos rABS/1rFC/1T1, rABS/1rFC/1T2 e rABS/1rFC/1T3.

**Figura 69 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do compósito híbrido rABS/1rFC/1T1. Aumento de 100x**



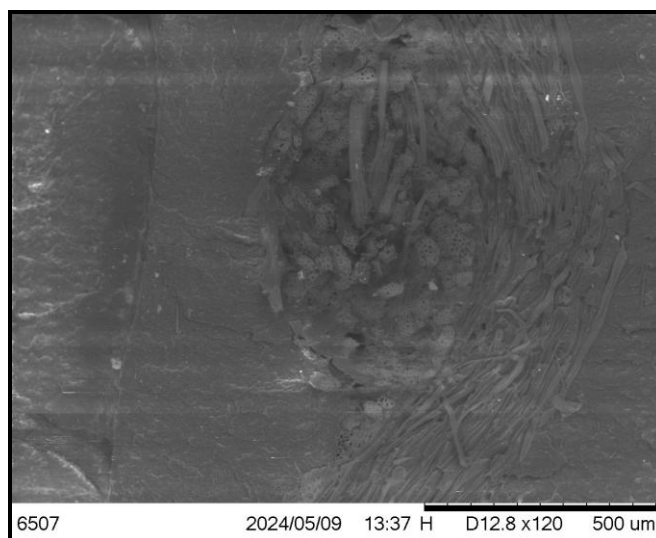
Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 70 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do compósito híbrido rABS/1rFC/1T2. Aumento de 100x.**



Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 71 - Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração do compósito híbrido rABS/1rFC/1T3. Aumento de 120x**



Fonte: Autoria própria (2024)

Em relação aos compósitos híbridos é possível visualizar na Figura 69 (?) o tecido de fibras de carbono reciclado bem como o tecido de fibras de juta no compósito rABS/1rFC/1T1. A seta na cor vermelha indica que houve arrancamento de fibra. Além disso, nota-se que as fibras de carbono não estão muito aderidas à matriz, indicando baixa adesão interfacial.

Na Figura 70 é possível observar o desalinhamento das fibras de carbono (indicado pela seta na cor vermelha). Isso pode ocorrer durante o processamento devido ao fechamento do molde ou durante a aplicação de pressão no processo de moldagem. Na imagem de MEV observa-se, também, os fios duplos da trama do tecido T2 onde há indícios de arrancamento de fibras. Já na Figura 71 é possível verificar fibras mais finas orientadas paralelamente às superfícies da fratura, que são as fibras de algodão do tecido T3.

## **CONCLUSÕES FINAIS**

A partir dos resultados obtidos verificou-se que a fase dispersa na forma de tecido é uma opção interessante para utilizar como elemento de reforço em compósitos, podendo o tecido ser de fibras vegetais ou sintéticas. Como visto no capítulo 2, é importante realizar uma avaliação das propriedades dos tecidos que serão utilizados como reforço em compósitos, principalmente no caso de tecido de fibras vegetais, uma

vez que características dos tecidos como a arquitetura (arranjo), composição, gramatura influenciam significativamente nos valores das propriedades finais dos compósitos.

Os polímeros reciclados provenientes de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos podem ser utilizados como matéria prima para o desenvolvimento de novos materiais. Como visto no capítulo 3, as propriedades mecânicas podem ser melhoradas com a incorporação de tecidos de fibras vegetais de diferentes arranjos. Os compósitos rABS/1T2 e rABS/1T3 são as melhores opções quando se trata de resistência mecânica e apesar de absorverem água, a porcentagem é baixa, visto que as amostras não foram seladas para simular uma condição mais drástica.

A recuperação de tecidos de fibras de carbono através do tratamento térmico se mostrou uma alternativa para a diminuição da quantidade gerada de compósitos de resina epóxi reforçados com tecidos de fibras de carbono, como mostrado no capítulo 4. Quando incorporada à matriz de ABS reciclado, os compósitos rABS/1rFC contendo uma camada de tecido de fibras de carbono recicladas apresentaram resultados de propriedades mecânicas que superaram as expectativas. E, apesar do compósito rABS/2rFC não ter alcançado resultado em propriedades mecânicas com maiores valores o resultado foi positivo, uma vez que seus valores se mantiveram nas mesmas médias que o rABS.

No caso da hibridização, vista no capítulo 5, seus efeitos sinérgicos devem ser avaliados para resultar nas melhores combinações. Embora não tenha promovido o aumento das propriedades mecânicas de forma expressiva, seus resultados foram promissores para viabilizar a utilização de um tecido sintético reciclado e um tecido de fibras vegetais como fase dispersa em um polímero reciclado.

O reaproveitamento de matérias-primas provenientes de resíduos é um assunto relevante como verificado no levantamento bibliográfico apresentado nos vários capítulos deste trabalho, uma vez que há uma tendência no aumento da produção de resíduos contendo materiais de alto valor agregado, e que podem ser aproveitados para o desenvolvimento de novos produtos, promovendo também uma gestão adequada e relacionada à economia circular.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD-MUTALIB, H. et al. E-Waste Practices Post-Pandemic Covid-19: The Case Of Malaysian Technology and Telecommunication Companies. **International Journal of Business and Management**, v. 7, n. 1, p. 1–7, 28 fev. 2023.

ABDALLAH, R. et al. A Critical Review on Recycling Composite Waste Using Pyrolysis for Sustainable Development. **Energies**, v. 14, n. 18, p. 5748, 13 set. 2021.

ABDOU, T. R. et al. Recycling of polymeric composites from industrial waste by pyrolysis: Deep evaluation for carbon fibers reuse. **Waste Management**, v. 20, p. 1-9, 1 fev. 2021.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em 31 de jan. 2022.

AISYAH, H. A. et al. A comprehensive review on advanced sustainable woven natural fibre polymer composites. **Polymers**, v. 13, n. 3, p. 1–45, 2021.

AKHYAR et al. The influence of different fiber sizes on the flexural strength of natural fiber-reinforced polymer composites. **Results in Materials**, v. 21, p. 100534, mar. 2024.

AKMAR, A. B. I.; KRAMER, O.; RABCZUK, T. Probabilistic multi-scale optimization of hybrid laminated composites. **Composite Structures**, v. 184, p. 1111–1125, jan. 2018.

ALLAWI, A. N. et al. Mechanical properties and environmental assessment of recycled carbon fibre reinforced polypropylene and acrylonitrile butadiene styrene products. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 932, n. 1, p. 012102, 1 set. 2020.

ALMUDAIHESH, F. et al. An Assessment of the Effect of Progressive Water Absorption on the Interlaminar Strength of Unidirectional Carbon/Epoxy Composites Using Acoustic Emission. **Sensors**, v. 21, n. 13, p. 4351, 25 jun. 2021.

ANANDH, G. et al. Reuse assessment of WEEE: Systematic review of emerging themes and research directions. **Journal of Environmental Management**, v. 287, p. 112335, 1 jun. 2021.

ANGULO, C. et al. Development of hemp fiber composites with recycled high density polyethylene grocery bags. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 40, n. 4, 28 jan. 2021.

ANSELL, M. P.; MWAIKAMBO, L. Y. The structure of cotton and other plant fibres. **Handbook of Textile Fibre Structure**, p. 62–94, 1 jan. 2009.

ARPITHA, G. R.; SANJAY, M. R.; YOGESHA, B. Review on Comparative Evaluation of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites. **Advanced Engineering and Applied Sciences: An International Journal**, v. 4, n. 4, p. 44–47, 1 out. 2014.

ARUN, M.; VINCENT, S.; KARTHIKEYAN, R. Development and characterization of sisal and jute cellulose reinforced polymer composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 28, p. 556–561, 25 jan. 2020.

ARUNAVATHI, S.; EITHIRAJ, R. D.; VELURAJA, K. Physical and mechanical properties of jute fiber and jute fiber reinforced paper bag with tamarind seed gum as a binder - An eco-friendly material. In: **DAE Solid State Physics Symposium 2016. AIP Conf. Proc.** 1832, p. 040026. 19 mai. 2017.

ATHIJAYAMANI, A. et al. Mechanical properties of unidirectional aligned bagasse fibers/vinyl ester composite. **Journal of Polymer Engineering**, v. 36, n. 2, p. 157–163, 1 mar. 2016.

BAJPAI, S. K.; MARY, G.; CHAND, N. The use of cotton fibers as reinforcements in composites. **Biofiber Reinforcements in Composite Materials**. p. 320–341, 2015.

BALAN, G. S.; RAVICHANDRAN, M. Study of moisture absorption characteristics of jute fiber reinforced waste plastic filled polymer composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 712–717, 23 jun. 2020.

BALDÉ, C. P. et al. Global E-waste Monitor 2024. Geneva/Bonn: International Telecommunication Union (ITU); United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2024. Disponível em: <https://www.globalewaste.org>. Acesso em: 20 ago. 2024.

BALLA, V. K. et al. Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 106956, out. 2019.

BAPTISTA, C. et al. Microstructure of Thermoplastic Composites Reinforced with Wool and Wood. **Applied Mechanics and Materials**, v. 890, p. 98–112, abr. 2019.

BEIGBEDER, J. et al. Study of the physico-chemical properties of recycled polymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE) sorted by high resolution near infrared devices. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 78, p. 105–114, set. 2013.

BHATT, P.; GOE, A. Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use. **Material Science Research India**, v. 14, n. 1, p. 52–57, 28 jun. 2017.

BLEDZKI, A. K. et al. Recycling of carbon fiber reinforced composite polymers—review—part 1: Volume of production, recycling technologies, legislative aspects. **Polymers**, v. 13, n. 13 p. 1-13, 19 jan. 2021.

BOLDIZAR, A.; MÖLLER, K. Degradation of ABS during repeated processing and accelerated ageing. **Polymer Degradation and Stability**, v. 81, n. 2, p. 359–366, jan. 2003.

BONGARDE, U. S.; SHINDE, V. Review on natural fiber reinforcement polymer composites. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)**, v. 3, n. 2, p. 431–436, 2014.

BOURMAUD, A. et al. Relationships between micro-fibrillar angle, mechanical properties and biochemical composition of flax fibers. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p. 343–351, jan. 2013.

BRENNAN, L. B.; ISAAC, D. H.; ARNOLD, J. C. Recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene from waste computer equipment. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 86, n. 3, p. 572–578, 2002.

BUDIN, S. et al. Investigation on mechanical properties of blend virgin and recycled acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) in injection molding. **Key Engineering Materials**, v. 833, p. 8–12, 6 mar. 2020.

CAMPO, E. A. Polymeric Materials and Properties. In: **Selection of Polymeric Materials**. [s.l.] Elsevier, p. 1–39, 2008.

CHACÓN, J. M. et al. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical

properties. **Composites Science and Technology**, v. 181, p. 107688, set. 2019.

CHAINED, C. et al. Recycling Plastics from WEEE: A Review of the Environmental and Human Health Challenges Associated with Brominated Flame Retardants. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 2, p. 766, 11 jan. 2022.

CHARITOPOULOU, M. A. et al. Novel trends in the thermo-chemical recycling of plastics from WEEE containing brominated flame retardants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 42, p. 59190–59213, 2021.

CHATTERJEE, A.; KUMAR, S.; SINGH, H. Tensile strength and thermal behavior of jute fibre reinforced polypropylene laminate composite. **Composites Communications**, v. 22, p. 100483, dez. 2020.

CHAUHAN, V.; KÄRKI, T.; VARIS, J. Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, 2019.

CHEN, M. et al. Handling trace elements in WEEE recycling through copper smelting-an experimental and thermodynamic study. **Minerals Engineering**, v. 173, p. 107189, nov. 2021.

CHEN, Y. et al. Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 348–357, nov. 2019.

CHOTIRAT, L.; CHAOCHANCAIKUL, K.; SOMBATSOMPOP, N. On adhesion mechanisms and interfacial strength in acrylonitrile–butadiene–styrene/wood sawdust composites. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 27, n. 8, p. 669–678, dez. 2007.

CHOWDHURY, I. R.; SUMMERSCALES, J. Woven Fabrics for Composite Reinforcement: A Review. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 7, p. 280, 18 jul. 2024.

COÊLHO, J. D. Algodão: Produção e Mercados. **Caderno Setorial**, v. 6, n. 166, p. 1–11, 2021.

COSTA, M. L. et al. Characterization of cure of carbon/epoxy prepreg used in aerospace field. **Materials Research**, v. 8, n. 3, p. 317–322, 2005.

DA CRUZ DEMOSTHENES, L. C. et al. Thermal and structural characterization of buriti fibers and their relevance in fabric reinforced composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 1, p. 115–123, 2020.

DE PAIVA, J. M. F. et al. Effect of hygrothermal conditioning on compressive strength after impact in carbon fiber/epoxy composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 141, n. 16, 20 abr. 2024.

DENG, J. et al. Efficient method of recycling carbon fiber from the waste of carbon fiber reinforced polymer composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 182, p. 109419, dez. 2020.

DIAS, P. et al. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 7–16, fev. 2018.

DÍAZ-LÓPEZ, C. et al. Analyzing the Scientific Evolution of the Sustainable Development Goals. **Applied Sciences**, v. 11, n. 18, p. 8286, 7 set. 2021.

DUTRA, G. B. et al. Avaliação da utilização da pós cura nas propriedades térmicas e mecânicas

de um sistema epóxi de cura à temperatura ambiente. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, 2019.

ELFALEH, I. et al. A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. **Results in Engineering**, v. 19, p. 101271, set. 2023.

FONG, K. Y.; MARIATTI, M.; TAKAGI, H. Effect of matrix and staking sequence of recycled jute/ carbon fiber hybrid laminated composites. **Journal of Polymer Materials**, v. 29, n. 4, p. 437–449, 2012.

FONSECA, L. P.; WALDMAN, W. R.; DE PAOLI, M. A. ABS composites with cellulose fibers: Towards fiber-matrix adhesion without surface modification. **Composites Part C: Open Access**, v. 5, p. 100142, jul. 2021.

FORTI, V.; BALDÉ, C.P.; KUEHR, R.; KUEHR, R.; BEL, G. The Global E-waste Monitor 2020. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/> Acesso em: 16 nov. 2021.

FREYMOND, C. et al. Reprocessing of polymer blends from WEEE: A methodology for predicting embrittlement. **Polymer Testing**, v. 106, n. October 2021, p. 107458, 2021.

GARCIA FILHO, F. C. et al. Influence of rigid brazilian natural fiber arrangements in polymer composites: Energy absorption and ballistic efficiency. **Journal of Composites Science**, v. 5, p. 201, 1 ago. 2021.

GUILHERME, F. et al. Evaluation of Out-of-Autoclave (OOA) epoxy system. **Polímeros**, v. 27, n. 4, p. 353–361, dez. 2017.

GUPTA, M. K.; RAMESH, M.; THOMAS, S. Effect of hybridization on properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites (2001–2020): A review. **Polymer Composites**, v. 42, n. 10, p. 4981–5010, 2 out. 2021.

HAMROL, A. et al. The Natural Moisture of ABS Filament and Its Influence on the Quality of FFF Products. **Materials**, v. 16, n. 3, p. 938, 19 jan. 2023.

HARIPRASAD, K. et al. Acoustic and mechanical characterisation of polypropylene composites reinforced by natural fibres for automotive applications. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 14029–14035, 1 nov. 2020.

HECKADKA, S. S. et al. Chopped Strand/Plain Weave E-Glass as Reinforcement in Vacuum Bagged Epoxy Composites. **Journal of Materials**, v. 2015, p. 1–7, 13 set. 2015.

HOSOKAWA, M. N. et al. Compósitos de acrilonitrila-butadienoestireno (ABS) reciclado com fibras vegetais visando economia circular. In: **Engenharia de produção: novas fronteiras, soluções, problemas e desafios**. AYA Editora, p. 8–23, 2021.

HU, L. et al. Hemicellulose-Based Polymers Processing and Application. **American Journal of Plant Sciences**, v. 11, n. 12, p. 2066–2079, 2020.

HU, W. et al. An improved method for single fiber tensile test of natural fibers. **Polymer Engineering & Science**, v. 50, n. 4, p. 819–825, abr. 2010.

HUANG, L.-Z. et al. Recent Developments and Applications of Hemicellulose From Wheat Straw: A Review. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, 22 jun. 2021.

INÁCIO, A. L. N.; NONATO, R. C.; BONSE, B. C. Mechanical and thermal behavior of aged

composites of recycled PP/EPDM/talc reinforced with bamboo fiber. **Polymer Testing**, v. 72, n. September, p. 357–363, 2018.

ISLAM, F. et al. Investigation of tensile strength and dimensional variation of T700 carbon fibres using an improved experimental setup. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 39, n. 3–4, p. 144–162, 24 fev. 2020.

JAIBEE, S. et al. Review on Current Status of Waste Electric and Electronic Product in Malaysia. **Applied Mechanics and Materials**, v. 773–774, p. 898–907, mai. 2015.

JASSO-GASTINEL, C. F.; SOLTERO-MARTÍNEZ, J. F. A.; MENDIZÁBAL, E. Introduction: Modifiable Characteristics and Applications. **Modification of Polymer Properties**, p. 1–21, 2017.

JERÔNIMO, J. F. et al. Qualidade da semente e fibra de algodão na caracterização do descaroçador de 25 serras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 664–671, jun. 2014.

JEYAGURU, S. et al. Effect of various weaving architectures on mechanical, vibration and acoustic behavior of Kevlar-Hemp intra-ply hybrid composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 176, p. 107845, jan. 2024.

KALIAPPAN, S.; NATRAYAN, L. **Polypropylene Composite Materials with Natural Fiber Reinforcement: An Acoustic and Mechanical Analysis for Automotive Implementations**. In: **International Conference on Trends in Automotive Parts Systems and Applications**. 23 fev. 2024

KAMBLE, Z.; BEHERA, B. K. Mechanical properties and water absorption characteristics of composites reinforced with cotton fibres recovered from textile waste. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 15, p.1-8, 28 jan. 2020.

KANNAN, G. et al. Effect of drilling process parameters on agro-waste-based polymer composites reinforced with banana fiber and coconut shell filler. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, p. 13719–13732, 19 set. 2024.

KARIMAH, A. et al. A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 2442–2458, jul. 2021.

KARTHI, N. et al. Effect of weight fraction on the mechanical properties of flax and jute fibers reinforced epoxy hybrid composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 8006–8010, 2021.

KARUPPANNAN GOPALRAJ, S.; KÄRKI, T. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 3, p. 433, 18 mar. 2020.

KHALID, M. Y. et al. Mechanical characterization of glass and jute fiber-based hybrid composites fabricated through compression molding technique. **International Journal of Material Forming**, v. 14, n. 5, p. 1085–1095, 2021.

KHAN, F. et al. Advances of natural fiber composites in diverse engineering applications—A review. **Applications in Engineering Science**, v. 18, p. 100184, jun. 2024.

KHAN, G. M. A. et al. Studies on the mechanical properties of woven jute fabric reinforced

poly(l-lactic acid) composites. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 28, n. 1, p. 69–74, jan. 2016.

KHAN, T.; HAMEED SULTAN, M. T. BIN; ARIFFIN, A. H. The challenges of natural fiber in manufacturing, material selection, and technology application: A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 37, n. 11, p. 770–779, 16 jun. 2018.

KIM, H. H.; KIM, B. J. Recovery of carbon fibers from carbon fiber-reinforced epoxy-isophorone diamine composites via step thermolysis. **Composites Part B: Engineering**, v. 260, p. 110757, abr. 2023.

KIM, Y. N. et al. Application of supercritical water for green recycling of epoxy-based carbon fiber reinforced plastic. **Composites Science and Technology**, v. 173, p. 66–72, mar. 2019.

KORKEES, F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review. **Polymer-Plastics Technology and Materials**, v. 62, n. 14, p. 1789–1822, 22 set. 2023.

KUREK, A. P. et al. DECAPAGEM DE PEÇAS EM ABS EM SOLUÇÃO DE ÁCIDOS SULFÚRICO E LÁTICO E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO E RECICLAGEM POR INJEÇÃO. In: 11º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 2018, Disponível em <http://www.abes-rs.uni5.net/> Acesso em: 31 jan. 2024.

LAVORATTI, A. et al. Influence of fibre treatment on the characteristics of buriti and ramie polyester composites. **Polymers and Polymer Composites**, v. 25, n. 4, p. 247–255, 2017.

LEMONS, A. L. DE; MAUSS, C. J.; SANTANA, R. M. C. Characterization of natural fibers: Wood, sugarcane and babassu for use in biocomposites. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 51, n. 7–8, p. 711–718, 2017.

LI, J. et al. FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 184, p. 361–367, 2017.

LIU, X. et al. Recycled WEEE plastics in China: Generation trend and environmental impacts. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 177, 2022.

LIU, Y.; KUMAR, S. Recent progress in fabrication, structure, and properties of carbon fibers. **Polymer Reviews**, v. 52, n. 3–4, p. 234–258, 2012.

LIVANI, M. A. et al. A 3D multi-scale hygro-mechanical model of oak wood. **Wood Science and Technology**, v. 57, n. 6, p. 1215–1256, 7 nov. 2023.

MA, X. et al. Closed-Loop Recycling of Both Resin and Fiber from High-Performance Thermoset Epoxy/Carbon Fiber Composites. **ACS Macro Letters**, v. 10, n. 9, p. 1113–1118, 21 set. 2021.

MACEDO, J. R. N.; CARMONA, V. N.; ROSA, D. S. Estudo da superfície de compósitos PLA-Amido-Algodão para a degradação do compósito. In **Conference: XIV Simpósio Latino Americano de Polímeros (SLAP)**. Porto de Galinhas, Pernambuco, 2014.

MARGOTO, O. H. et al. Mechanical and Thermal Characterization of Jute Fabric-Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Maleic Anhydride. **Journal of Natural Fibers**, p. 1–13, 27 ago. 2020.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e tecnologia**. São

Paulo – SP: Artliber Editora Ltda, 2019.

MARQUES, M. B. L. et al. Análise da produção nacional de juta (*Corchorus capsularis*) e a sua variação com o mercado internacional. **XVII Semana da Agronomia/I Encontro Regional dos Estudantes de Agronomia**, p. 1–4, out. 2020.

MARTINHO, G. et al. Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1213–1217, 1 jun. 2012.

MCKEEN, L.W., **Styrenic Plastics**, In: The Effect of Creep and Other Time Related Factors on Plastics and Elastomers. London: Elsevier Ltd., 2010.

MENDES CAMPOLINA, J. et al. A study on the environmental aspects of WEEE plastic recycling in a Brazilian company. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 12, p. 1957–1968, 2017.

MENG, F. et al. Environmental Aspects of Use of Recycled Carbon Fiber Composites in Automotive Applications. **Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 21, p. 12727–12736, 2017.

MENG, F. et al. Comparing Life Cycle Energy and Global Warming Potential of Carbon Fiber Composite Recycling Technologies and Waste Management Options. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 6, n. 8, p. 9854–9865, 2018.

MORENO, D. D. P.; HIRAYAMA, D.; SARON, C. Accelerated aging of pine wood waste/recycled LDPE composite. **Polymer Degradation and Stability**, v. 149, n. October 2017, p. 39–44, 2018.

MOUDOOD, A. et al. Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 38, n. 7, p. 323–339, 11 abr. 2019.

NAYAK, S. et al. Mechanical and thermal properties of *Careya arborea* bast fiber–reinforced chitosan composites for packaging industries. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 17, p. 20397–20404, 16 set. 2024.

NEGRÃO, A. G.; PINTO, E. M.; SILVA, L. B. DA. Material compósito de fibra da folha do abacaxizeiro (*Ananas comosus*) para uso no ambiente construído. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 627–645, jul. 2020.

NUNES, J. V. DA S. et al. Caracterização mecânica e morfológica de fibras de coco tratadas superficialmente para utilização como reforço em polímeros. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 2, 2022.

NURAZZI, N. M. et al. Thermal properties of treated sugar palm yarn/glass fiber reinforced unsaturated polyester hybrid composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 1606–1618, mar. 2020.

OLONGAL, M. et al. Effect of poly(ethylene-co-vinyl acetate) additive on mechanical properties of maleic anhydride-grafted acrylonitrile butadiene styrene for coating applications. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, v. 25, n. 3, p. 287–295, 2019.

OUSHABI, A. The pull-out behavior of chemically treated lignocellulosic fibers/polymeric matrix interface (LF/PM): A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 107059, out. 2019.

OVALI, S.; SANCAK, E. Investigation of Mechanical Properties of Jute Fiber Reinforced Low Density Polyethylene Composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 8, p. 3109–3126, 3 ago. 2022.

OWEN, M. M. et al. Mechanical properties of epoxy-coated sodium hydroxide and silane treated kenaf/recycled polyethylene terephthalate (RPET) composites: Effect of chemical treatment. **AIP Conference Proceedings**, v. 1985, 2018.

PALACIOS HINESTROZA, H. et al. Isolation and Characterization of Nanofibrillar Cellulose from Agave tequilana Weber Bagasse. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, p. 1–7, 12 fev. 2019.

PALANISAMY, S. et al. The prospects of natural fiber composites: A brief review. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 7, n. 4, p. 496–506, jul. 2024.

PALMER, J. et al. Successful closed-loop recycling of thermoset composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 4, p. 490–498, abr. 2009.

PARDINI, L. C. Tecnologia de Fabricação de Pré-Impregnados para Compósitos Estruturais Utilizados na Indústria Aeronáutica. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, v. 6, n. 2, p. 32–42, 1996.

PATEL, R. V.; YADAV, A.; WINCZEK, J. Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Natural Fiber-Reinforced Epoxy Composites for Construction and Automotive Applications. **Applied Sciences**, v. 13, n. 8, p. 5126, 20 abr. 2023.

PENDER, K. et al. Feasibility of Natural Fibre Usage for Wind Turbine Blade Components: A Structural and Environmental Assessment. **Sustainability**, v. 16, n. 13, p. 5533, 28 jun. 2024.

PETRAKLI, F. et al. End-of-Life Recycling Options of (Nano)Enhanced CFRP Composite Prototypes Waste—A Life Cycle Perspective. **Polymers**, v. 12, n. 9, p. 2129, 18 set. 2020.

PIRES, E. N. et al. Efeito do Tratamento Alcalino de Fibras de Juta no Comportamento Mecânico de Compósitos de Matriz Epóxi. **Polímeros**, v. 22, n. 4, p. 339–344, 2012.

POHLKEMPER, F. et al. Market analysis of carbon fiber production with reference to the oxidation ovens used. **Applied Research**, v. 3, n. 4, 21 ago. 2024.

PRAKASH, K. B. et al. Influence of Fiber Volume and Fiber Length on Thermal and Flexural Properties of a Hybrid Natural Polymer Composite Prepared with Banana Stem, Pineapple Leaf, and S-Glass. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, p. 1–11, 7 out. 2021.

PRASAD, V. et al. A Comprehensive Review of Sustainability in Natural-Fiber-Reinforced Polymers. **Sustainability**, v. 16, n. 3, p. 1223, 31 jan. 2024.

QUACH, T. H. Y. et al. Determination of the tensile residual properties of a wound carbon/epoxy composite first exposed to fire. **Journal of Composite Materials**, v. 51, n. 1, p. 17–29, 28 jan. 2017.

RAGHAVENDRA, G. et al. Moisture absorption behavior and its effect on the mechanical properties of jute-reinforced epoxy composite. **Polymer Composites**, v. 38, n. 3, p. 516–522, mar. 2017.

RAHMAN, R.; PUTRA, S. Z. F. S. **Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites**. Elsevier Ltd, 2018.

- RANGASAMY, G. et al. An extensive analysis of mechanical, thermal and physical properties of jute fiber composites with different fiber orientations. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 28, p. 101612, dez. 2021.
- RAVISHANKAR, B.; NAYAK, S. K.; KADER, M. A. Hybrid composites for automotive applications – A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 38, n. 18, p. 835–845, 14 set. 2019.
- REDDY, R. A.; YOGANANDAM, K.; MOHANAVEL, V. Effect of chemical treatment on natural fiber for use in fiber reinforced composites – Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 2996–2999, 2020.
- RIBEIRO, V. F.; DOMINGUES JR., N. S.; RIEGEL, I. C. Estudo da recuperação das propriedades de poliestireno de alto impacto (HIPS) através da incorporação de borracha termoplástica tipo estireno-butadieno-estireno (SBS). **Polímeros**, v. 22, n. 2, p. 186–192, 10 abr. 2012.
- ROCHA, T. B.; PENTEADO, C. S. G. Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: Case study in the Campinas Area, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, n. June, 2021.
- RODRIGUES, G. G. M. et al. Recycling of carbon fibers inserted in composite of DGEBA epoxy matrix by thermal degradation. **Polymer Degradation and Stability**, v. 109, p. 50–58, 2014.
- RODRIGUES, V. E. et al. Recycling of carbon fibers from structural composites of epoxy matrix by thermal pyrolysis and application as electrode materials in supercapacitors. **Revista Materia**, v. 26, n. 2, 2021.
- RODRÍGUEZ-ANDA, R. et al. Composite based on recycled high-density polyethylene-sugarcane bagasse-tire rubber waste: formulation, mechanical and workability evaluation. **Interciencia Journal**, v. 45, n. 9, p. 80–103, 2020.
- ROKBI, M. et al. Effect of processing parameters on tensile properties of recycled polypropylene based composites reinforced with jute fabrics. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 3, n. 2, p. 144-149, jun. 2020.
- SABA, N. et al. Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 35, n. 6, p. 447–470, 2016.
- SAHU, P.; GUPTA, M. Water absorption behavior of cellulosic fibres polymer composites: A review on its effects and remedies. **Journal of Industrial Textiles**, v. 51, n. 5, p. 7480-7512, 26 nov. 2020.
- SAJIN, J. B. et al. Influence of fiber length on mechanical properties and microstructural analysis of jute fiber reinforced polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, p. 398–402, 2021.
- SAMYKANO, M. et al. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9–12, p. 2779–2796, 2019.
- SANCHEZ, E. M. S.; FERREIRA, M. M. C.; FELISBERTI, M. I. Avaliação da degradação térmica e fotooxidativa do ABS Automotivo. **Polímeros**, v. 9, n. 4, p. 116–122, 1999.

SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.

SATHIYAMOORTHY, M.; SENTHILKUMAR, S. Mechanical, thermal, and water absorption behaviour of jute/carbon reinforced hybrid composites. **Sādhanā**, v. 45, n. 1, p. 278, 6 dez. 2020.

SEYDIBEYOĞLU, M. Ö. et al. Review on Hybrid Reinforced Polymer Matrix Composites with Nanocellulose, Nanomaterials, and Other Fibers. **Polymers**, v. 15, n. 4, p. 984, 16 fev. 2023.

SHAHINUR, S. et al. Effect of Chemical Treatment on Thermal Properties of Jute Fiber Used in Polymer Composites. **Journal of Composites Science**, v. 4, n. 3, p. 132, 9 set. 2020.

SHERAZY, E. et al. Characterization of the Tensile Strength Properties of Hybrid Sandwich Composites. **International Design Journal**, v. 5, n. 3, p. 1285–1292, 1 jul. 2015.

SHITTU, O. S.; WILLIAMS, I. D.; SHAW, P. J. Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. **Waste Management**, v. 120, p. 549–563, 2021.

SILVA, E. R.; COELHO, J. F. J.; BORDADO, J. C. Strength improvement of mortar composites reinforced with newly hybrid-blended fibres: Influence of fibres geometry and morphology. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 473–480, mar. 2013.

SILVA, I. C. R.; OLIVEIRA, A. K. F. DE. Ecocompósito de matriz polimérica vegetal reforçada por resíduos de fibras de piaçava : Possibilidades de aplicações no design  
Ecocomposite of vegetal polymeric matrix reinforced by residues of piassava fibers : Possibilities of applications in design. **Revista Design & Tecnologia**. v. 11, n. 23, p. 24–37, 2021.

SILVA, R. et al. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 661–671, 2009.

SINGH, H. et al. A Brief Review of Jute Fibre and Its Composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 14, p. 28427–28437, 2018.

SINGH, J. I. P.; SINGH, S.; DHAWAN, V. Effect of alkali treatment on mechanical properties of jute fiber-reinforced partially biodegradable green composites using epoxy resin matrix. **Polymers and Polymer Composites**, v. 28, n. 6, p. 388–397, 9 jul. 2020.

SINGH, R.; KUMAR, R.; RANJAN, N. Sustainability of Recycled ABS and PA6 by Banana Fiber Reinforcement: Thermal, Mechanical and Morphological Properties. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, v. 100, n. 2, p. 351–360, 2019.

SOARES, F. I. L. et al. Sustentabilidade na agricultura familiar: um estudo na cadeia produtiva da juta (*Corchoruscapsularis*) em Alenquer/PA. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 16652–16663, 2020.

SOUTO, F.; CALADO, V.; JUNIOR, N. P. Fibras de carbono a partir de lignina: Uma revisão da literatura. **Revista Materia**, v. 20, n. 1, p. 100–114, 2015.

SUJON, M. A. S.; HABIB, M. A.; ABEDIN, M. Z. Experimental investigation of the mechanical and water absorption properties on fiber stacking sequence and orientation of jute/carbon epoxy hybrid composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 10970–10981, set. 2020.

SUMESH KR et al. Mechanical properties of ramie/flax hybrid natural fiber composites under different conditions. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 23, p. 29579–29590, 21 dez. 2024.

SUMITHRA, G. et al. Review on composite classification, manufacturing, and applications. **Materials Today: Proceedings**, maio 2023.

SURESH, S.; SUDHAKARA, D.; VINOD, B. Investigation on Industrial Waste Eco-Friendly Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites. **Journal of Bio- and Tribo-Corrosion**, v. 6, n. 2, p. 40, 27 jun. 2020.

SURIANI, M. J. et al. Critical Review of Natural Fiber Reinforced Hybrid Composites: Processing, Properties, Applications and Cost. **Polymers**, v. 13, n. 20, p. 3514, 13 out. 2021.

TAURINO, R.; POZZI, P.; ZANASI, T. Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling. **Waste Management**, v. 30, n. 12, p. 2601–2607, 2010.

TODOR, M. P.; BULEI, C.; KISS, I. Composite materials manufacturing using textile inserts with natural origins fibres. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 393, n. 1, 2018.

TSAI, W. T. Recycling waste electrical and electronic equipment (WEEE) and the management of its toxic substances in Taiwan-A case study. **Toxics**, v. 8, n. 3, p. 1-12, 7 jul. 2020.

VAN YKEN, J. et al. **E-waste recycling and resource recovery: A review on technologies, barriers and enablers with a focus on oceania**. **Metals**, v. 11, n. 8, p. 1-40, 19 ago. 2021.

VIGNESHWARAN, S. et al. Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 124109, 2020.

VOUTETAKI, M. E.; MPALASKAS, A. C. Natural Fiber-Reinforced Mycelium Composite for Innovative and Sustainable Construction Materials. **Fibers**, v. 12, n. 7, p. 57, 9 jul. 2024.

WANG et al. Flexure Behaviors of ABS-based Composites Containing Carbon and Kevlar Fibers by Material Extrusion 3D Printing. **Polymers**, v. 11, n. 11, p. 1878, 13 nov. 2019a.

WANG, H. et al. Effect of Jute Fiber Modification on Mechanical Properties of Jute Fiber Composite. **Materials**, v. 12, n. 8, p. 1226, 15 abr. 2019b.

WANG, S. et al. Preparation and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposite. **Polymer Degradation and Stability**, v. 77, n. 3, p. 423–426, jan. 2002.

WATKINS, D. et al. Extraction and characterization of lignin from different biomass resources. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 4, n. 1, p. 26–32, jan. 2015.

WIDMER, R. et al. Global perspectives on e-waste. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 25, n. 5, p. 436–458, jul. 2005.

WILLGERT, M. et al. Cellulose nanofibril reinforced composite electrolytes for lithium ion battery applications. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 2, n. 33, p. 13556, 17 jun. 2014.

WILLIAMS, I. D. Global Metal Reuse, and Formal and Informal Recycling from Electronic and Other High-Tech Wastes. **Metal Sustainability: Global Challenges, Consequences, and Prospects**, p. 23–51, 2016.

- YANG, X. et al. Pyrolysis and dehalogenation of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review. **Waste Management**, v. 33, n. 2, p. 462-473, fev. 2013.
- YATIM, N. M. et al. Recovery of carbon fiber from carbon fiber reinforced polymer waste via pyrolysis. **Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 14, n. 1, p. 37–48, 2020.
- YEH, C. H.; YANG, T. C. Utilization of waste bamboo fibers in thermoplastic composites: Influence of the chemical composition and thermal decomposition behavior. **Polymers**, v. 12, n. 3, 2020.
- YU, D. E. C.; YU, K. D. S.; TAN, R. R. Implications of the pandemic-induced electronic equipment demand surge on essential technology metals. **Cleaner and Responsible Consumption**, v. 1, n. November, p. 100005, 2020.
- YUHAZRI, M. Y. et al. The Effect of Various Weave Designs on Mechanical Behavior of Lamina Intraply Composite Made from Kenaf Fiber Yarn. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 160, p. 012021, nov. 2016.
- ZHAI, Z.; GRÖSCHEL, C.; DRUMMER, D. Tensile behavior of quasi-unidirectional glass fiber/polypropylene composites at room and elevated temperatures. **Polymer Testing**, v. 54, p. 126–133, set. 2016.
- ZHANG, M.; CHEN, M.; NI, Z. Epoxy polymer toughening using dendritic spherulites microstructure formed by the self-assembly of alkyl branched tri-carbamates with a spacer of isocyanurate ring. **Polymer**, v. 186, p. 122009, jan. 2020.
- ZHANG, Q. et al. Green-composites produced from waste residue in pulp and paper industry: A sustainable way to manage industrial wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121251, jul. 2020.
- ZHAO, X.; BAI, X. How to motivate the producers' green innovation in WEEE recycling in China? – An analysis based on evolutionary game theory. **Waste Management**, v. 122, p. 26–35, mar. 2021.