



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**USO DO RESÍDUO DE PEAD REFORÇADO COM FIBRAS DA FOLHA DO  
ABACAXIZEIRO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NA ELABORAÇÃO DE  
MÓDULOS DE COBOGÓ**

THALITA BESERRA DO VALE

JOÃO PESSOA - PB

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS

**USO DO RESÍDUO DE PEAD REFORÇADO COM FIBRAS DA FOLHA DO  
ABACAXIZEIRO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NA ELABORAÇÃO DE  
MÓDULOS DE COBOGÓ**

THALITA BESERRA DO VALE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.  
Área de concentração: Desenvolvimento e propriedades de materiais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Itamara Farias Leite

Agência Financiadora: CAPES

JOÃO PESSOA - PB

2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Ata da defesa de dissertação de mestrado apresentada pela aluna  
THALITA BESERRA DO VALE, no dia 27 de setembro de 2023.

Às 09 horas do dia 27 de setembro de 2023, no Centro de Tecnologia da UFPB, reuniram-se os membros da banca examinadora composta pelos Professores: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> ITAMARA FARIAS LEITE - UFPB/PPCEM (Presidente, Orientadora), Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. RENATE MARIA RAMOS WELLEN - UFPB/PPCEM (Examinadora Interna), Prof. Dr. MARCIO JOSE BATISTA CARDOSO - (Examinador Externo ao Programa), a fim de avaliarem a dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, com título "USO DO RESÍDUO DE PEAD REFORÇADO COM FIBRAS DA FOLHA DO ABACAXIZEIRO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NA ELABORAÇÃO DE MÓDULOS DE COBOGÓ" de autoria da aluna THALITA BESERRA DO VALE, matrícula 20211013210. A reunião foi aberta pelo Presidente da banca, que deu início aos trabalhos autorizando o candidato a iniciar sua apresentação. Concluídos os trabalhos de apresentação e de arguição, a Comissão Examinadora emitiu o seguinte parecer:

A banca examinadora juntamente com o presidente da referida banca, decidiram que a mestranda Thalita Bezerra do Vale terá um tempo de 30 dias contados a partir da data da defesa para realizar as correções conforme sugestões atribuídas para melhoria da Dissertação de mestrado. A versão final deverá ser entregue dia 27/10/2023

A aluna é obrigada a realizar as sugestões da banca. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora além da referida discente que apresentou a defesa de seu mestrado.

Itamara Farias Leite  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> ITAMARA FARIAS LEITE - UFPB/PPCEM  
(Presidente, Orientadora)

Renate Maria Ramos Wellen  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. RENATE MARIA RAMOS WELLEN - UFPB/PPCEM  
(Examinadora Interna)

Marcio Jose Batista Cardoso  
Prof. Dr. MARCIO JOSE BATISTA CARDOSO  
(Examinador Externo ao Programa)

Thalita Beserra do Vale  
THALITA BESERRA DO VALE  
(Discente)

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

V149u Vale, Thalita Beserra do.

    Uso do resíduo de PEAD reforçado com fibras da folha do abacaxizeiro como alternativa sustentável na elaboração de módulos de Cobogó / Thalita Beserra do Vale. - João Pessoa, 2023.

    119 f. : il.

    Orientação: Itamara Farias Leite.  
    Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

    1. Engenharia de materiais - Materiais alternativos.  
    2. Polietileno - Alta densidade. 3. PEAD - Reciclado.  
    4. Fibra vegetal - Folha do abacaxizeiro. 5. Cobogó. I. Leite, Itamara Farias. II. Título.

UFPB/BC

CDU 620.1(043)

Dedico a Raphael Filipe Marques de Lucena (*In Memoriam*).

Sem você não existiria esse tema, essa dissertação e nem parte de quem sou.

“A Estrela Polar pode morrer, mas a luz que eu vi em seus olhos queimará lá sempre acesa pelo amor que nós compartilhamos antes do tempo”.

Gratidão e admiração eterna. Amo-te.

“Não tenhas medo”. IS 41:10.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por Sua Misericórdia.

À Nossa Senhora das Graças pela proteção divina.

Aos meus pais Washtane e Marcos, minha fonte de admiração, força, fé, resiliência e coragem. Agradeço pelo cuidado, amor, carinho, dedicação e pela formação continuada e bela de minha existência em cima dessa Terra. Gratidão eterna, amo vocês.

À minha orientadora Itamara por toda paciência e dedicação, dando-me força para continuar e finalizar esse trabalho.

A Jairzinho que surgiu na valsa do ABC e voltou quase 30 anos depois para bailar a valsa da vida comigo. Não seria fácil te esquecer, pois você nunca saiu de mim, então te reconheci com os meus olhos de 5 anos de idade. Você é brisa leve acolhedora ao mesmo tempo que é vendaval de novidade, aventura, afeto e cuidado. Amo-te. Aos seus pais Jair e Josiene.

À minha irmã Thaís, meus sobrinhos Petrus e Heitor, ao meu cunhado Rodrigo e à querida Cristiane que há tantos anos cuida de nós.

À minha vovó Terezinha (*In Memoriam*), que tinha 1,15m de altura mas era um mulherão de muita força, coragem, resiliência e amor.

Às minhas amigas Ivana e Paulina por todo apoio, carinho, choros e risadas (altas).

À minha amiga Carol, uma querida de algumas décadas e de coração maravilhoso. Obrigada!

A Raphael Lucena (*In Memoriam*) por dedicar os seus dias a ajudar o próximo e ser um belo presente em minha vida. A quem lembro com doçura de ter a ideia de trazer a FFA para o pré-projeto de seleção desse mestrado, segurando as fibras em suas mãos, em meio à tensão da minha cirurgia de coração. Infelizmente ele não soube da minha aprovação final, já havia partido dessa vida, mas tenho certeza que está feliz por nossa conquista. Aos seus pais Edward e Ana Paula, e aos seus irmãos Pedro e Paulo.

À amiga Luciana que me ajudou a cortar as FFA's e por estar presente em tudo que preciso. Muito obrigada!

Às amigas Mariane e Thaysla.

Ao apoio na cidade de Itapororoca/PB, em especial à Fazenda Santa Rosa que cedeu as folhas do abacaxizeiro. Principalmente à querida amiga Edilane Meneses e a Júlio Tratores.

Muito obrigada.

Ao apoio na cidade de Pocinhos/PB pelo desfibramento da FFA. Em especial a Fernando e equipe.

Às queridas colegas do IFPB Campus Patos: Thamires, Renata, Jordânia, Luísa, Raíssa e Hannah.

Ao PPCEM pela oportunidade, aos professores pelos ensinamentos e aos colegas, muito obrigada.

Aos técnicos dos laboratórios que passei: André, Breno, Alana, Rivaildo, Renê, Maristela, Adriana e Meyson.

À CAPES pelo apoio financeiro para que essa dissertação conseguisse ser concluída.

Este trabalho foi construído sob o peso do luto, das incertezas, dos medos e das lágrimas, mas também foi enriquecido pela leveza da fé, da oração, do companheirismo, da paciência e da serenidade.

Eu tenho uma linda rede de apoio! Esta conquista é nossa!

## RESUMO

Nesse estudo, foi investigada a viabilidade do uso do polietileno de alta densidade reciclado (PEADrec) reforçado com fibras da folha do abacaxizeiro (FFA) como componente arquitetônico não estrutural de Cobogó, como uma alternativa sustentável no ambiente construído. As FFA's foram extraídas utilizando a máquina paraibana ou motor de agave, e o processamento para incorporação da FFA com o PEADrec, envolveu o método de extrusão. Sendo utilizadas duas concentrações de FFA: 0,5% e 1%. Posteriormente, foram realizadas avaliações das propriedades físicas, mecânicas e térmicas do material. Os resultados revelaram que o teor de cinzas de 0,54% da FFA, indicaram um alto grau de pureza e qualidade da fibra, contribuindo positivamente nas propriedades do elemento final. Quanto a resistência à tração, a amostra com PEADrec+1% FFA, demonstrou um desempenho superior, sugere-se então, que a fibra vegetal atua como uma carga, influenciando na compactação da mistura, conseqüentemente, influenciando positivamente nas propriedades mecânicas. Para tanto, a incorporação de 1% de FFA ocasionou em resultados mais satisfatórios para o uso em ambiente construído e para elementos arquitetônicos, sendo então selecionada para a elaboração do protótipo de cobogó. Isso exposto, esta pesquisa destaca as possibilidades de aproveitamento da FFA, frequentemente descartada e com ótimas propriedades mecânicas, combinada com o PEADrec, material comumente utilizado, contribuindo para a criação de materiais sustentáveis.

**Palavras-chave:** PEAD reciclado, Fibra da folha do abacaxizeiro, FFA, Cobogó, elemento arquitetônico, material alternativo.

## ABSTRACT

In this study, the feasibility of using recycled high-density polyethylene (HDPE<sub>rec</sub>) reinforced with pineapple leaf fibers (PALF) as a non-structural architectural component for "Cobogó" was investigated as a sustainable alternative in the built environment. PALFs were extracted using a machine called the "paraibana" or agave fiber extractor, and the processing for PALF incorporation with HDPE<sub>rec</sub> involved the extrusion method. Two PALF concentrations, 0.5% and 1%, were utilized. Subsequently, evaluations of the material's physical, mechanical, and thermal properties were conducted. The results revealed that the 0.54% ash content of PALF indicated a high degree of fiber purity and quality, positively influencing the final element's properties. Concerning tensile strength, the sample with HDPE<sub>rec</sub>+1%PALF demonstrated superior performance, suggesting that the plant fiber acts as a filler, influencing the mixture's compaction and, consequently, positively impacting mechanical properties. Therefore, the incorporation of 1% PALF resulted in more satisfactory outcomes for use in the built environment and architectural elements, and was selected for the development of the Cobogó prototype. In conclusion, this research highlights the potential for utilizing PALF, often discarded despite its excellent mechanical properties, in combination with HDPE<sub>rec</sub>, a commonly used material, to create sustainable materials.

**Keywords:** Recycled HDPE, pineapple leaf fiber, PALF, recycled, cobogó, architectural element, alternative material.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Materiais recuperados pelos programas de logística reversa de embalagens em geral no ano de 2022 (t/ano e %)	<b>28</b>
<b>Figura 2.</b> Índice de reciclagem de plástico pós-consumo	<b>29</b>
<b>Figura 3.</b> a) Revestimento de banco de carro com FFA; b) Textura imitando couro, feito de FFA; c) Filmes e revestimentos feitos por processos industriais utilizando a FFA	<b>31</b>
<b>Figura 4.</b> Papel usado reforçado com fibra da folha do abacaxizeiro	<b>32</b>
<b>Figura 5.</b> Produção de resina reciclada por tipo de material	<b>37</b>
<b>Figura 6.</b> a) Separação do resíduo de PEAD; b) PEAD reciclado em <i>pellets</i> .	<b>38</b>
<b>Figura 7.</b> Estrutura de uma fibra vegetal	<b>39</b>
<b>Figura 8.</b> a) Pannel de porta de carro feito com fibra de linho; b) Ponte composta com blocos de estrutura fabricados em sanduíche de fibra de linho e corrimão de filamento biocomposto linho	<b>44</b>
<b>Figura 9.</b> Plantação de abacaxi	<b>45</b>
<b>Figura 10.</b> Muda vegetativa do abacaxizeiro	<b>47</b>
<b>Figura 11.</b> a) Carretel de linhas feitas de FFA; b) FFA para cordas; c) Tecidos de FFA	<b>48</b>
<b>Figura 12.</b> Fibra da folha do abacaxizeiro (FFA) secando em varais ao ar livre	<b>49</b>
<b>Figura 13.</b> Ciclo de vida da Piñatex	<b>51</b>
<b>Figura 14.</b> a) Tijolos elaborados com adobe e FFA; b) Revestimento para banheiro feitos com PEBD e FFA.	<b>53</b>
<b>Figura 15.</b> PEADrec puro de cor verde	<b>55</b>
<b>Figura 16.</b> Folhas do abacaxizeiro no local de colheita	<b>57</b>
<b>Figura 17.</b> Fluxograma das etapas de processo realizadas nessa dissertação	<b>58</b>
<b>Figura 18.</b> Máquina Paraibana para desfibramento das folhas do abacaxizeiro	<b>59</b>
<b>Figura 19.</b> Motor da máquina paraibana e configuração da desfibradora paralela	<b>59</b>
<b>Figura 20.</b> a) Fibras da folha do abacaxizeiro (FFA) após o desfibramento mecânico, embaraçadas; b) FFA secando ao ar livre; c) FFA desembaraçadas.	<b>60</b>
<b>Figura 21.</b> Fibras FFA´s cortadas	<b>61</b>
<b>Figura 22.</b> Pré-mistura dos grânulos de PEADrec com FFA	<b>61</b>

<b>Figura 23.</b> Extrusora monorosca usada no processamento das misturas. a) visão completa da máquina extrusora e b) representação dos “macarrões” saindo da matriz e passando na baneira de resfriamento	<b>62</b>
<b>Figura 24.</b> PEADrec (a); PEADrec+0,5%FFA (b) e PEADrec+1%FFA (c)	<b>63</b>
<b>Figura 25.</b> Corpos de prova para ensaio de tração (a) e flexão (b)	<b>63</b>
<b>Figura 26.</b> Molde para corpos de prova tração (a) e para flexão (b)	<b>64</b>
<b>Figura 27.</b> Molde e placa prensada	<b>64</b>
<b>Figura 28.</b> Fluxograma das caracterizações realizadas nessa pesquisa	<b>65</b>
<b>Figura 29.</b> Ilustração do ensaio de absorção de água das fibras FFA´s	<b>66</b>
<b>Figura 30.</b> Amostra de FFA nos cadinhos (a), cadinhos na chapa aquecida (b), Forno elétrico - muffla (c) e cinzas (d)	<b>68</b>
<b>Figura 31.</b> Aparelhagem de extração	<b>69</b>
<b>Figura 32.</b> a) FFA macerada com ácido sulfúrico; b) Balão com água e a lignina insolúvel; c) filtro com lignina insolúvel seca	<b>70</b>
<b>Figura 33.</b> a) Bioespectrômetro; b) Lignina solúvel	<b>71</b>
<b>Figura 34.</b> Equipamento Plastômetro usado nas medidas de MFI	<b>73</b>
<b>Figura 35.</b> Equipamento usado no ensaio de tração	<b>74</b>
<b>Figura 36.</b> Equipamento usado no ensaio de flexão	<b>75</b>
<b>Figura 37.</b> Limbo com nervuras	<b>76</b>
<b>Figura 38.</b> Desenho do protótipo	<b>78</b>
<b>Figura 39.</b> Protótipo referência do cobogó	<b>79</b>
<b>Figura 40.</b> Imagens do diâmetros das fibras FFA obtidas por microscopia ótica	<b>81</b>
<b>Figura 41.</b> Espectro de FTIR da fibra FFA <i>in natura</i>	<b>86</b>
<b>Figura 42.</b> Espectros de FTIR para o PEADrec e suas misturas PEADrec/FFA	<b>87</b>
<b>Figura 43.</b> Gráfico de MFI das amostras	<b>88</b>
<b>Figura 44.</b> Material após escoamento no MFI do PEADvirgem (a), PEAD rec (b), PEAD rec 0,5%FFA (c) e PEAD rec + 1%FFA (d), respectivamente.	<b>89</b>
<b>Figura 45.</b> Corpos de prova de PEADrec+1%FFA após ensaio de tração	<b>91</b>
<b>Figura 46.</b> Resistência à tração (MPa) do PEADrec e do PEAD/FFA	<b>92</b>

<b>Figura 47.</b> Módulo Elástico (MPa) do PEADrec e do PEAD/FFA	<b>93</b>
<b>Figura 48.</b> Deformação na ruptura (%) do PEADrec e do PEADrec/FFA	<b>94</b>
<b>Figura 49.</b> Resistência à Flexão (N/mm <sup>2</sup> ) do PEADrec e as misturas PEADrec/FFA	<b>96</b>
<b>Figura 50.</b> Máxima Deformação (%) do PEADrec e as misturas PEADrec/FFA	<b>96</b>
<b>Figura 51.</b> Micrografias do PEADrec	<b>97</b>
<b>Figura 52.</b> Micrografias do PEADrec + 0,5% FFA	<b>99</b>
<b>Figura 53.</b> Micrografias do PEADrec + 1% FFA	<b>100</b>
<b>Figura 54.</b> Curvas TG da FFA e misturas PEADrec/FFA	<b>102</b>
<b>Figura 55.</b> Curvas TG/DTG da FFA	<b>103</b>
<b>Figura 56.</b> Curvas TG/DTG do PEADrec	<b>104</b>
<b>Figura 57.</b> Curvas TG/DTG do PEADrec+0,5% FFA	<b>105</b>
<b>Figura 58.</b> Curvas TG/DTG do PEADrec+1% FFA	<b>105</b>
<b>Figura 59.</b> Análise térmica da FFA, PEADrec e PEADrec/FFA	<b>107</b>
<b>Figura 60.</b> Croquis do cobogó	<b>109</b>
<b>Figura 61.</b> Desenho dos protótipos	<b>109</b>
<b>Figura 62.</b> Volumetria do cobogó	<b>110</b>
<b>Figura 63.</b> Protótipo do cobogó	<b>110</b>

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1.</b> Correlatos de Cobogós: mercado e pesquisa.	<b>35</b>
<b>Tabela 2.</b> Valores médios de algumas propriedades mecânicas de fibras vegetais.	<b>42</b>
<b>Tabela 3.</b> Características e propriedades da fibra da folha do abacaxizeiro.	<b>49</b>
<b>Tabela 4.</b> Propriedades mecânicas e físicas das FFA's.	<b>51</b>
<b>Tabela 5.</b> Propriedades do PEAD reciclado usado na pesquisa.	<b>56</b>
<b>Tabela 6.</b> Croquis dos cobogós	<b>77</b>
<b>Tabela 7.</b> Características físicas e de absorção de água das fibras FFA <i>in natura</i>	<b>80</b>
<b>Tabela 8.</b> Composição centesimal da fibra FFA	<b>83</b>
<b>Tabela 9.</b> Valores do índice de fluidez para o PEADrec e suas misturas PEADrec/FFA	<b>88</b>
<b>Tabela 10.</b> Propriedades de tração do PEADrec, PEADrec + 0,5% FFA e PEADrec + 1% FFA	<b>90</b>
<b>Tabela 11.</b> Propriedades de flexão das amostras	<b>94</b>
<b>Tabela 12.</b> Dados das etapas de perdas de massa, temperatura máxima e temperaturas de perda de massa a 40%	<b>106</b>
<b>Tabela 13.</b> Dados das curvas DSC das amostras no primeiro aquecimento	<b>108</b>

**LISTA DE EQUAÇÕES**

<b>Equação 1.</b> Absorção de água	<b>66</b>
<b>Equação 2.</b> Teor de umidade	<b>67</b>
<b>Equação 3.</b> Teor de cinzas	<b>67</b>
<b>Equação 4.</b> Teor de extrativos totais	<b>69</b>
<b>Equação 5.</b> Lignina insolúvel	<b>70</b>
<b>Equação 6.</b> Lignina solúvel	<b>71</b>
<b>Equação 7.</b> Teor de holocelulose	<b>72</b>
<b>Equação 8.</b> Medida do índice de fluidez - MFI	<b>73</b>
<b>Equação 9.</b> Erro (%) - MFI	<b>73</b>
<b>Equação 10.</b> Grau de cristalinidade	<b>76</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ABRELPE** – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

**AGRAER** – Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Rural

**ASTM** – *American Society for Testing and Materials*

**CNC** – Controle Numérico Computadorizado

**CT** – Centro de Tecnologia

**DEMAT** – Departamento de Engenharia de Materiais

**DTG** – Termogravimetria Derivada

**DSC** – Calorimetria Exploratória Diferencial

**EMBRAPA** – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

**EUA** – Estados Unidos da América

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**ISO** – *International Organization for Standardization*

**FABLAB** – Laboratório de Fabricação Digital

**FAO** – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

**FFA** – Fibra da Folha do Abacaxizeiro

**FTIR** – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

**LAMPOL** – Laboratório de Materiais Poliméricos

**LSR** – Laboratório de Solidificação Rápida

**MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura

**MFI** – Medida de Índice de Fluidez

**NBR** – Norma Brasileira

**PEAD** – Polietileno de Alta Densidade

**PEBD** – Polietileno de Baixa Densidade

**PGRS** – Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

**PHR** – *Parts per hundred resin*

**PNRS** – Plano Nacional de Resíduos Sólidos

**RCC** – Resíduos da Construção Civil

**RCD** – Resíduos de Construção e Demolição

**RSU** – Resíduo Sólido Urbano

**TAPPI** – *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*

**TG** – Termogravimetria

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	21
2.	OBJETIVO GERAL.....	24
2.1.	Objetivos Específicos .....	24
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
3.1.	Meio ambiente e seus impactos .....	25
3.2.	Elementos arquitetônicos, Design e Materiais Sustentáveis.....	33
3.3.	Cobogó .....	34
3.4.	Polietileno de Alta Densidade Reciclado (PEADrec) .....	36
3.5.	Fibras Vegetais, Abacaxizeiro e Fibras da folha do abacaxizeiro (FFA).....	38
3.5.1.	Fibras Vegetais .....	38
3.5.2.	Abacaxizeiro .....	44
3.5.3.	Fibra da Folha do Abacaxizeiro (FFA).....	48
3.6.	Misturas de resíduos poliméricos reforçados com a FFA .....	52
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
4.1.	Materiais .....	55
4.2.	Métodos .....	57
4.2.1.	Etapas do processo de preparação das FFA.....	57
4.2.2.	Tratamento químico realizado nas FFA´s .....	60
4.2.3.	Misturas de PEADrec com FFA .....	61
4.2.4.	Moldagem dos corpos de prova para os ensaios de tração e flexão .....	63
4.2.5.	Moldagem das placas para obtenção do Cobogó protótipo .....	64
4.3.	Caracterizações .....	65
4.3.1.	Diâmetro e comprimento das fibras (características físicas). .....	65

4.3.2.	Ensaio de absorção de água das fibras .....	66
4.3.3.	Composição centesimal das FFA's .....	66
4.3.3.1.	Determinação do teor de umidade.....	67
4.3.3.2.	Determinação do teor de cinzas.....	67
4.3.3.3.	Extrativos totais .....	68
4.3.3.4.	Lignina insolúvel.....	70
4.3.3.5.	Lignina solúvel.....	71
4.3.3.6.	Holocelulose .....	72
4.3.4.	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier - FTIR .....	72
4.3.5.	Medida do índice de fluidez - MFI.....	72
4.3.6.	Ensaio de tração.....	73
4.3.7.	Ensaio de flexão .....	74
4.3.8.	Microscopia eletrônica de varredura - MEV .....	75
4.3.9.	Análise Térmica – Análise termogravimétrica (TG/DTG) e Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	75
4.4.	Criação do protótipo - Cobogó.....	76
5.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>80</b>
5.1.	Caracterizações das FFA's .....	80
5.1.1.	Diâmetro, comprimento e absorção de água – características físicas .....	79
5.1.2.	Composição centesimal.....	83
5.1.3.	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) .....	85
5.1.4.	Medida índice de fluidez (MFI) .....	88
5.1.5.	Ensaio mecânicos .....	90
5.1.5.1.	Ensaio de tração. ....	90
5.1.5.2.	Ensaio de flexão.....	94

5.1.6.	Microscopia eletrônica de varredura - MEV.....	97
5.1.7.	Análises térmicas .....	102
5.1.7.1	Análise termogravimétrica – TG/DTG.....	102
5.1.7.2	Calorimetria exploratória diferencial - DSC.....	107
5.2.	Criação do protótipo - Cobogó.....	109
6.	CONCLUSÃO.....	111
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
8.	REFERÊNCIAS .....	113

## 1. INTRODUÇÃO

O modelo hegemônico predominante em diversas sociedades contemporâneas vem sendo caracterizado por um aumento gradativo no consumo e acúmulo de bens. Para dar conta dessa crescente demanda, cada vez mais recursos são retirados da natureza para a produção deste, e devolvidos em forma de resíduos ao meio ambiente quando esses produtos já não satisfazem mais. Essa problemática foi o que norteou a presente pesquisa, que investiga como mitigar o elevado descarte em ambientes naturais, de acordo com o modelo de Baudrillard (1995).

Alternativas sustentáveis vêm sendo estudadas para redução do impacto ambiental, dentre elas, estão pesquisas e a utilização no mercado, de materiais oriundos de fontes renováveis, a exemplo das fibras naturais para diversos fins industriais e de materiais reciclados. Compósitos ou misturas à base de material polimérico reforçado com fibras naturais, a exemplo das fibras de sisal, abacaxizeiro, dentre outras, trazem vantagens e propriedades mecânicas superiores, que estão atreladas ao alto teor de celulose, resistência nos feixes das fibras, capacidade de suportar altas tensões, sendo altamente resistentes ao desgaste abrasivo (MISHRA *et al*, 2004).

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) está aumentando de forma exponencial, para atender a demanda da sociedade. Essa geração foi de aproximadamente 82 milhões de toneladas no ano de 2022, equivalente a 381 kg/habitante. Para tanto, o Brasil possui um sistema de coleta seletiva, recuperados por programas de logística reversa de embalagens, tendo o papel e papelão ocupando primeiro lugar, metal em segundo e em terceiro lugar o plástico (70.932 t/ano – 23,2%). (ABRELPE, 2022).

De acordo com a Abrelpe (2022), dentre os plásticos pós-consumo, referente ao índice de reciclagem no Brasil, encontra-se o PET em primeiro lugar (54%), o EPS (34,5%) e o PEAD (29%), material em estudo nessa dissertação. O PEAD é um dos termoplásticos mais consumidos do mundo, tendo em vista suas boas propriedades físicas, químicas, mecânicas, térmicas e ópticas, indicando que o seu reaproveitamento e reciclagem é de extrema importância (KUMAR, RAMESH e DODDAMANI, 2021).

Dado o exposto, o abacaxizeiro é uma planta de fácil acesso devido à sua produção ser espalhada por diversos países da América do Sul, seu local de origem. É uma cultura interessante para ser utilizada além das finalidades agrícolas. Sendo a segunda fruta mais industrializada do mundo, servindo para diversas finalidades: polpas, sucos, geleias, cachaças e outras, o abacaxi é uma cultura que se adapta facilmente em longas faixas de temperaturas,

cerca de 5°C a 40°C, requerendo solos bem drenados e com pH entre 4,5 e 5,5, Junghans (2013).

A planta precisa de 12 a 30 meses para frutificar, em média, possuindo entre 70 e 80 folhas em formato de calha e podem atingir até 1,50 m de comprimento, a propagação vegetativa se dá por meio de mudas produzidas pela planta em três partes: na coroa da infrutescência, abaixo da infrutescência (filhote) e saindo do caule (rebentão e filhote-rebentão) (AQUINO, 2006).

O Brasil ocupa a terceira posição na produção de abacaxi do mundo, sendo 36,13 (t/ha), perdendo apenas para Costa Rica (83,20 t/ha) e Filipinas (41,60 t/ha) (EMBRAPA, 2020).

A produção brasileira do fruto em 2021 mostra o estado do Pará em primeiro lugar em área colhida (13.916 ha), de produção de frutos (361.027) e de rendimento de fruto/ ha (25.947). A Paraíba fica em segundo, com área colhida de 8.789 ha, produção de 263.370 frutos e rendimento de 29.966 frutos/ ha, sendo este último parâmetro, superior ao estado do Pará (EMBRAPA, 2021).

Verificou-se que as cidades que mais colheram abacaxi no estado da Paraíba, no ano de 2021 foram Itapororoca, com 2.100 ha e Pedras de Fogo, 2.000 ha, tendo um rendimento médio de 30.000 frutos/ha ambas as cidades, de acordo com o IBGE (2021). Tendo em vista que o resíduo gerado após a colheita do fruto é muito abundante e pouco aproveitado, além de apresentar fibras com excelentes propriedades físico-mecânicas, o emprego desse material torna-se bastante atrativo e para essa exploração, a fibra da folha do abacaxizeiro foi selecionada como resíduo para esse estudo. Suas propriedades podem variar de acordo com o dimensionamento, espessura, comprimento, tipo e idade da folha (Correia, 2011).

As fibras possibilitam uma ampla gama de aplicações, incluindo a confecção de vestuário, calçados, embalagens, aerogel, elementos de construção, dentre outros produtos Assim *et al.* (2015). No ambiente construído, pode-se destacar o uso do poli(etileno de baixa densidade)(PEBD) reforçado com fibras da folha do abacaxizeiro (FFA) na produção de azulejos para banheiros (Rotich, 2020).

Aji *et al.* (2012) estudaram compósitos de PEAD reforçados com as fibras FFA's e Kenaf e, evidenciaram melhorias nas suas propriedades mecânicas, físicas e térmicas. As duas fibras vegetais se complementaram, trazendo equilíbrio favorável, enquanto a FFA ajudou o compósito nas propriedades de tração e flexão, o kenaf aumentou a resistência ao impacto e redução na absorção de água. A sinergia entre as fibras, demonstram potencial de combinação efetiva com a matriz polimérica, reforçando-a para aplicação em diversos segmentos.

Com o intuito de promover a integração do reaproveitamento de materiais no âmbito da sustentabilidade, o uso de resíduos de PEAD reforçado com fibras da folha do abacaxizeiro

(FFA) surge como alternativa promissora para emprego no ambiente construído, cuja pesquisa busca avaliar a viabilidade da utilização dessa mistura de materiais em um projeto destinado a elaboração de elementos vazados, sem fins estruturais: o cobogó<sup>1</sup>.

Esta proposta revela-se importante devido à alta necessidade de elaboração de materiais alternativos que possuam boa escalabilidade, produção eficiente, célere, com menor impacto possível ao meio ambiente e para além de valorizar o produtor/catador local.

---

<sup>1</sup> Cobogó é um elemento vazado que permite a circulação da ventilação e a incidência da luz solar, além de compor a estética arquitetônica brasileira, pode ser usado no interior ou exterior das edificações. Surgiu na década de 1920 na cidade de Recife/ PE, criado por três engenheiros, em que as iniciais dos seus sobrenomes unidas deram surgimento ao nome do elemento (DELAQUA, 2015).

## 2. OBJETIVO GERAL

Esse trabalho tem como objetivo fazer uso do PEAD reciclado reforçado com fibras da folha do abacaxizeiro (FFA's) para a elaboração de módulos de cobogó como alternativa sustentável para emprego no ambiente construído.

### 2.1. Objetivos específicos

- Obter a FFA por extração mecânica;
- Processar a mistura de PEADrec/FFA pelo método de extrusão;
- Confeccionar corpos de prova de acordo com normas técnicas vigentes e pesquisas científicas;
- Realizar caracterizações físicas, físico-químicas, mecânicas e térmicas da fibra da folha do abacaxizeiro (FFA) “*in natura*”, bem como da mistura do resíduo de polietileno de alta densidade (PEADrec) com FFA em diferentes concentrações, considerando os parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas vigentes para cada caso específico;
- Analisar os resultados das caracterizações/análises realizadas e correlacionar a viabilidade e recomendações de uso para a confecção de materiais alternativos, a exemplo de cobogós para ambiente construído;
- Selecionar a melhor composição PEADrec/FFA para confeccionar o protótipo em escala reduzida do cobogó.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Meio ambiente e seus impactos**

A relação entre os seres humanos e o meio ambiente tem desempenhado um papel crucial ao longo da evolução das sociedades até os dias atuais. Os diferentes estágios de desenvolvimento das civilizações humanas moldaram não apenas nossa forma de interagir com o ambiente, mas também nossa maneira de construir, exercendo um impacto significativo no planeta. Nas sociedades mais antigas, como a civilização Mesopotâmica, a construção era fortemente baseada nos recursos disponíveis localmente. Materiais como madeira, pedra e argila extraídos da região eram utilizados na construção de estruturas, resultando em um impacto ambiental relativamente limitado. Isso ocorria em parte devido à menor densidade populacional e aos métodos construtivos rudimentares utilizados na época. No entanto, durante a revolução agrícola, que ocorreu entre 10.000 a.C. e 4.000 a.C., houve o desenvolvimento de assentamentos permanentes, moradias e estruturas de armazenamento de alimentos e animais, como celeiros duráveis (MUMFORD, 1961).

A revolução industrial marcou outro ponto de transformação radical na sociedade e sua relação com o ambiente. O surgimento de máquinas e processos industriais levou a uma exploração intensiva dos recursos naturais, como minerais e combustíveis fósseis para a produção de materiais de construção em larga escala, permitindo marcante aumento na população e o crescimento exponencial da demanda por matéria-prima para a expansão das cidades (SCHMIDT, 2017).

A combinação da história, cultura, crenças e costumes das diversas sociedades impacta diretamente o comportamento humano contemporâneo, sua relação com o ambiente e as práticas cotidianas. A análise de Cavalcanti (2011) destaca que é imprescindível ressignificar os valores das sociedades e gerações anteriores, visando não comprometer a qualidade ambiental das futuras gerações. A insustentabilidade ambiental, processo oriundo dos danos causados ao meio ambiente pelo homem, bem como a desigualdade social, são fatores decorrentes do desenvolvimento humano e econômico (RAMPAZZO, 2012).

Segundo a Resolução nº1 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (1986) o impacto ambiental é definido como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, provocada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que afetem de maneira direta ou indireta a saúde, segurança ou bem-estar da sociedade; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias ambientais e; a qualidade dos recursos ambientais.

No contexto internacional contemporâneo, a preocupação com o impacto da relação entre seres humanos e o meio ambiente ganhou destaque a partir de 1972, quando entrou oficialmente na agenda internacional devido ao alto impacto do modelo de desenvolvimento adotado em grande parte do mundo. Nesse ano, ocorreu a Conferência de Estocolmo e a adoção da Declaração sobre o Ambiente Humano, também conhecida como Declaração de Estocolmo. Esse documento estabeleceu princípios para a proteção e melhoria do meio ambiente, reconhecendo a importância do desenvolvimento sustentável, que busca conciliar as necessidades ambientais, sociais e econômicas das gerações presentes e futuras.

Além disso, a conferência também levou à criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), uma agência especializada da ONU voltada para questões ambientais. Ao longo dos anos, outras conferências e acordos internacionais foram realizados para abordar questões ambientais globais, como a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92) e a Cúpula da Terra de Joanesburgo (Rio+10).

Essas reuniões serviram para fortalecer e ampliar os compromissos assumidos em Estocolmo. Destaca-se a Agenda 21, adotada por 178 governos, que estabeleceu uma visão de longo prazo para equilibrar as necessidades econômicas e sociais com os recursos naturais (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 1992). Segundo esse documento, os principais desafios da construção sustentável envolvem processos e gestão, execução, consumo de materiais, energia e água, impactos no ambiente urbano e no meio ambiente natural, bem como questões sociais, culturais e econômicas.

A Agenda 21 (1992) destaca que um dos principais objetivos das políticas de redução de impacto ambiental é alcançar um menor consumo de recursos naturais. Para isso, é necessário pesquisar toda a cadeia produtiva e todas as áreas envolvidas no processo de produção de um produto, incluindo clientes, proprietários, empreendedores, investidores, responsáveis técnicos, projetistas, produtores de insumos, empreiteiras, empresas de manutenção, usuários e profissionais de ensino e pesquisa. O documento também ressalta que o maior desafio é agir de forma preventiva imediata e preparar a cadeia produtiva para as alterações necessárias ao processo construtivo sustentável (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 1992).

Na atualização da Agenda 2030 (2015), segue o compromisso de proteger o planeta da degradação através do consumo e da produção sustentáveis, além disso, da gestão adequada de recursos naturais, com a finalidade de suportar as necessidades das gerações através das três dimensões do desenvolvimento sustentável: econômica, social e ambiental. Comprometendo-se com a redução nos impactos negativos das atividades urbanas, redução e reciclagem de

resíduos, modernizar a infraestrutura das indústrias para serem sustentáveis, maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e que sejam ambientalmente corretos. Além de fortalecer a pesquisa científica, capacidade tecnológica e o aumento dos gastos público e privado em pesquisa e desenvolvimento sustentáveis.

Nesse contexto, o estilo de vida urbano tem resultado em uma diversidade cada vez maior de produtos e resíduos, o que demanda sistemas de coleta e tratamento mais complexos e dispendiosos. Isso é considerado um dos principais problemas atuais, sendo consenso que a geração excessiva de resíduos sólidos afeta a sustentabilidade urbana. A redução desses resíduos depende de mudanças nos padrões de produção e consumo da sociedade. No entanto, a redução dos milhões de resíduos gerados é considerada um dos maiores desafios para a maioria dos países (VARGAS, 2018).

A geração de resíduos urbanos (RSU) está aumentando de forma exponencial, impulsionada pelo padrão de consumo e pela grande quantidade de produtos que circulam na sociedade para atender à demanda existente. Com base nos dados sobre resíduos sólidos no Brasil, divulgados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2022), observa-se um aumento na geração de resíduos atípicos em 2022 (máscaras descartáveis, luvas, testes, etc) influenciado pelas novas dinâmicas sociais e pela pandemia de COVID-19. A geração de RSU em 2022 foi de aproximadamente 82.000.000 toneladas por ano ou 381 quilos por habitante por ano, sendo o Sudeste a região com maior participação na geração de RSU do Brasil (49,7%), seguido pelo Nordeste (24,7%) (ABRELPE, 2022).

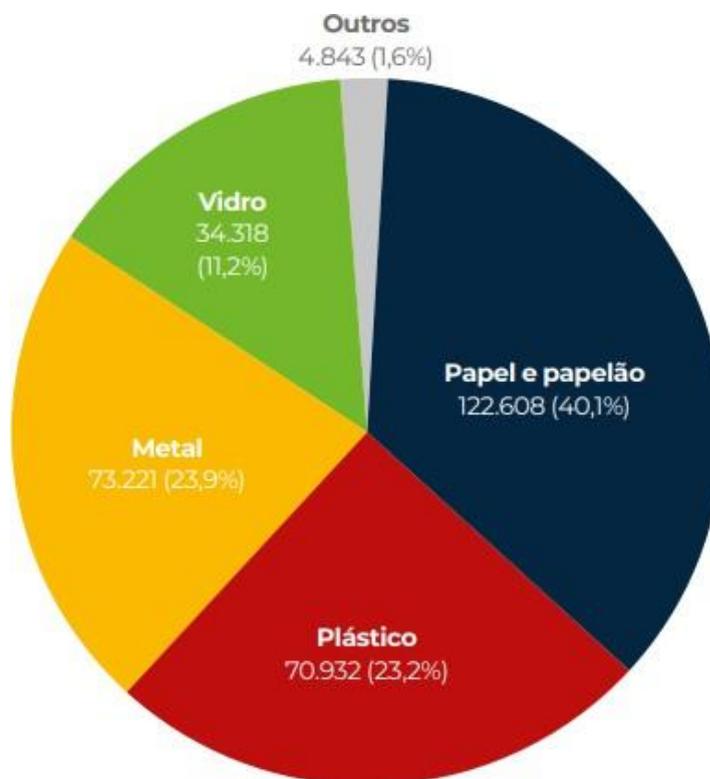
Para lidar com o gerenciamento e a destinação correta dos RSU, a ABRELPE (2022) divulgou dados sobre a coleta desses resíduos. Em 2022, foram coletadas aproximadamente 77.000.000 toneladas por ano, o equivalente a 354 quilos por habitante por ano, resultando em uma taxa de cobertura de coleta de RSU no Brasil de 93,04% em 2022.

O Brasil possui um sistema de coleta seletiva, que consiste na coleta de resíduos sólidos previamente segregados de acordo com sua composição (Lei 12.305/2010). Esse sistema abrange aproximadamente 75,1% das iniciativas de coleta seletiva no Brasil e em suas regiões. Em relação à destinação final dos RSU no Brasil, a maior parte é disposta adequadamente em aterros sanitários (61%), enquanto uma parte (39%) ainda é destinada a lixões e/ou aterros controlados inadequados (ABRELPE, 2022).

No que diz respeito aos materiais recuperados por programas de logística reversa de embalagens em geral, em 2022, o papel e papelão ocuparam o primeiro lugar, com aproximadamente 123.000 toneladas por ano (40,1%), seguidos pelo plástico, com cerca de

71.000 toneladas por ano (23,2%) (ABRELPE, 2022). Dados presentes na figura (1) abaixo:

**Figura 1** - Materiais recuperados pelos programas de logística reversa de embalagens em geral no ano de 2022 (t/ano e %)



**Fonte:** Central de Custódia da Logística Reversa de Embalagens, 2022.

Conforme mencionado, o plástico é um dos principais resíduos gerados nas cidades brasileiras. Em 2022, foram descartadas aproximadamente 13,7 milhões de toneladas desse material, o que equivale a cerca de 64 kg por pessoa por ano. Esses resíduos plásticos têm um impacto significativo nos corpos hídricos do planeta, correspondendo a 48,5% dos materiais que poluem os mares (ABRELPE, 2022).

No que diz respeito à reciclagem de plásticos pós-consumo, alguns tipos específicos são mencionados no texto. O poli(tereftalato de etileno) (PET) é destacado como o plástico com o maior índice de reciclagem, atingindo aproximadamente 55%. O poliestireno expandido (EPS) tem uma taxa de reciclagem de aproximadamente 34,5%, enquanto o polietileno de alta densidade (PEAD), que é objeto de estudo na pesquisa mencionada, apresenta uma taxa de reciclagem de 29%. Na figura (2) abaixo estão todos os plásticos pós-consumo por índice de reciclagem no Brasil em 2022 (ABIPLAST, 2022):

**Figura 2 - Índice de reciclagem de plástico pós-consumo**

**Fonte:** Associação Brasileira da Indústria do Plástico - ABIPLAST, 2022.

Para tanto, pesquisas estão intensificando em novas tecnologias e processos para melhorar a eficiência de reciclagem e reaproveitamento de materiais, visando aumentar os índices de reciclagem e reaproveitamento. A reciclagem de plásticos reforçados com fibras naturais é uma alternativa estratégica para a criação de materiais ecologicamente corretos, com propriedades aprimoradas e maior biodegradabilidade. As fibras atuam como reforço em uma matriz polimérica e são provenientes de resíduos agrícolas, que estão disponíveis em grandes quantidades. Isso pode resultar na redução do custo dos produtos, aumento da geração de renda e diminuição do descarte inadequado desses resíduos no meio ambiente (XANTHOPOULOU, 2023).

Quanto aos resíduos agrícolas, provenientes de diversas fontes biológicas e do processamento industrial, são materiais com alto potencial de nutrientes, substâncias orgânicas e facilmente biodegradáveis. Eles podem ser utilizados como matérias-primas de baixo custo

para o desenvolvimento de produtos com valor agregado. A conversão desses resíduos em produtos contribui para uma gestão eficiente de resíduos, promove a bioeconomia e oferece possibilidades de aplicações em novos produtos (SADH, 2023).

De acordo com estudos (PHIRI *et al.*, 2023), os resíduos gerados pelas atividades agrícolas representam um total de 150 bilhões de toneladas métricas anualmente, devido à intensa agricultura, colheitas, cultivos e processos industriais. No entanto, é preocupante que apenas uma pequena parcela desses resíduos seja aproveitada, enquanto a grande maioria é descartada por meio de queima ou destinada a aterros.

A maior parte dos resíduos orgânicos é originada nos setores agropecuários. No Brasil, os resíduos mais comuns encontrados em campos, lixões, aterros e no meio ambiente são os rejeitos de culturas, como café, milho, soja e abacaxi. Isso inclui cascas, palhas, folhas, raízes e sabugos, bem como dejetos e rejeitos de animais. Além disso, há também resíduos inorgânicos agrícolas, como embalagens de agrotóxicos e medicamentos, pneus usados e invólucros de silagem (ALENCAR *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022).

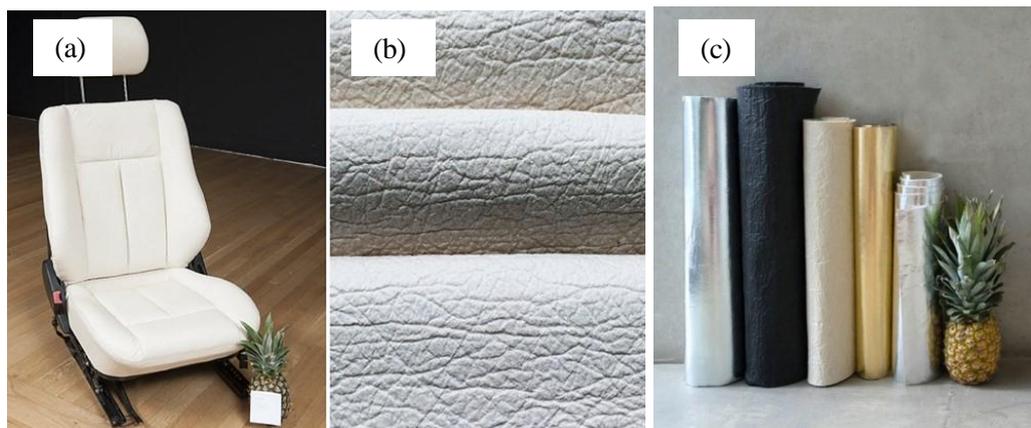
É de extrema importância buscar maneiras de promover uma economia mais consciente do ponto de vista ambiental, a fim de alcançar o desenvolvimento sustentável. Isso envolve a utilização de recursos biológicos e técnicas baseadas no conhecimento em todos os aspectos econômicos. Uma das soluções é o uso de materiais com características ecológicas, como os biocompósitos. Os biocompósitos são compostos por materiais que misturam componentes naturais e biodegradáveis, com o objetivo de substituir parcial ou totalmente materiais convencionais. Eles são aplicados em diversas áreas e contribuem para melhorar as propriedades mecânicas, físicas e térmicas dos produtos. Um exemplo de biocompósito é a mistura de materiais com fibras naturais em uma matriz, a exemplo da matriz polimérica. Essa abordagem pode aumentar a eficiência no uso de recursos e no gerenciamento de resíduos (PHIRI *et al.*, 2023).

A cultura do abacaxi é uma das principais no Brasil, ocupando uma posição de destaque entre os maiores produtores mundiais. No processo de cultivo e aproveitamento industrial dessa fruta, são gerados resíduos, como as folhas e a coroa. Esses resíduos são considerados fontes alternativas de fibras e minerais, de acordo com estudos (ANTUNES *et al.*, 2018).

As folhas do abacaxizeiro contêm fibras, denominadas nesse estudo como FFA (Fibras de Folhas de Abacaxi), que apresentam características e propriedades significativas, destacando-se por suas inúmeras aplicações. Essas fibras podem ser utilizadas na fabricação de roupas, calçados, bolsas, móveis, compósitos reforçados, construção civil, eco-aerogel, papelaria, embalagens e até mesmo carvão ativado.

Essa diversidade de aplicações demonstra o potencial das fibras das folhas de abacaxi e sua versatilidade na indústria. Além disso, o aproveitamento dessas fibras contribui para a redução de resíduos agrícolas, promovendo uma abordagem mais sustentável na utilização dos recursos disponíveis, como pode ser observada nas figuras 3 e 4 abaixo (RBUM *et al.*, 2008; ALEXANDRE, 2010; MARQUES, 2017; SILABY, 2017; LUU, *et al.*, 2020).

**Figura 3** - a) Revestimento de banco de carro com FFA; b) Textura imitando couro, feito de FFA; c) Filmes e revestimentos feitos por processos industriais utilizando a FFA



**Fonte:** followthecolours.com.br, 2016; followthecolours.com.br, 2016; yuta-shoes.gr/en/pinatex-leather-from-pineapple-leaf-fibre, 2020.

Outra pesquisa realizada na Universidade de Mauritius, localizada nas Ilhas Maurícios, por Sibaly e Jeetah (2017), usando a mistura das fibras das folhas do abacaxizeiro com bagaço de cana-de-açúcar e misturas de FFA com papel usado, resultou que o papel mais resistente à abrasão foi o composto de bagaço de cana com a FFA na proporção 40:60 m/m, respectivamente, e também o papel 100% de FFA demonstrou maior resistência à tração e à ruptura. O experimento está apresentado na Figura 4.

**Figura 4 - Papel usado reforçado com FFA**

Fonte: Sibaly e Jeetah, 2017

Diante das exigências percebidas no cotidiano global, referentes às necessidades de sobrevivência e de adequação da vivência da sociedade, é preciso estudar e aplicar estratégias voltadas para a sustentabilidade ambiental. Assim como, promover o conhecimento e a aplicabilidade de uso racional das fontes renováveis (QUINTALIANI *et al.*, 2022).

Os problemas ambientais resultantes do desperdício de recursos naturais, das práticas econômicas devastadoras e da degradação descontrolada do meio ambiente contribuem para a baixa qualidade ambiental e de vida da população. Portanto, é crucial repensar urgentemente essas questões, adotando um planejamento físico que leve em consideração as perspectivas sociais, ambientais e econômicas (RAMPAZZO, 2012).

### 3.2. Elementos Arquitetônicos, Design e Materiais sustentáveis

Buscar formas de promover o desenvolvimento sustentável é de suma importância para a sociedade. O design e a arquitetura sustentável englobam um conjunto de estratégias, conceitos e metodologias que visam à utilização de materiais reciclados e tecnologias, que seguem como uma ótima alternativa para a aplicação em elementos para o ambiente construído (CAROLINO *et al.*, 2021).

Os elementos arquitetônicos de um edifício resultam da união de volumes na concepção arquitetural, equilibrando forma e função, e não apenas visando uma composição estética, mas sim um projeto autêntico (BISELLI, 2014).

Na arquitetura, a articulação dos ambientes, apelos visuais e valorização dos elementos são primordiais, levando em consideração a sensação, percepção e apreciação contidas nos espaços. Isso proporciona condições para que os indivíduos pensem, valorizem, vivenciem e reflitam por meio dos elementos arquitetônicos, espaços, formas e materiais (TAGLIARI, 2018).

Rampas, escadas, caminhos, acessos, passarelas, pontes são exemplos de elementos arquitetônicos (TAGLIARI, 2018). Além desses, marquises, balanços, platibandas e cobogós. O último é o elemento em estudo que será abordado no próximo tópico dessa pesquisa.

De acordo com Araújo *et al.* (2018), projetos e elementos inspirados na natureza propõem o desenvolvimento responsivo ao meio ambiente, inovador e bioinspirado, reunindo conhecimento de pesquisas sobre materiais e aperfeiçoamento de design tecnológico.

Ao associar um material sustentável, é essencial considerar sua composição. Para ser sustentável, ele deve ser originado de materiais naturais ou reciclados, além de utilizar recursos não renováveis de forma limitada e ter baixo impacto ambiental. Nesse sentido, as fibras naturais são dignas de atenção, pois apresentam baixa toxicidade e seu processo de obtenção geralmente contribui para a preservação do meio ambiente. Materiais reciclados, como fibras plásticas reutilizadas e resíduos sintéticos, são considerados alternativas sustentáveis, pois reduzem a geração de resíduos e o uso de matérias-primas (ASDRUBAL; SCHIAVONI; HOROSHENKOV, 2018).

Zach *et al.* (2019) afirmam que os materiais feitos de fibras naturais provenientes de recursos renováveis estão se tornando cada vez mais populares, devido às suas excelentes propriedades de isolamento acústico e térmico, proporcionadas pela baixa densidade de massa e estrutura celular. Essas propriedades das fibras naturais são superiores e mais vantajosas do que as fibras sintéticas, além de serem renováveis e terem um impacto ambiental reduzido no isolamento térmico.

É importante ressaltar que, diante das experiências e aplicações com materiais e sistemas construtivos, o uso de fibras vegetais em materiais compósitos merece destaque. Entre as pesquisas realizadas com o uso de fibras vegetais, destaca-se o estudo das fibras provenientes do abacaxizeiro, que são objeto de pesquisa nesse estudo.

### **3.3. Cobogó**

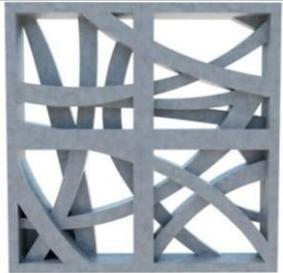
O cobogó, originário da cidade de Recife, capital de Pernambuco, foi desenvolvido por Coimbra (CO), Boeckmann (BO) e Góes (GÓ), resultando no acrônimo COBOGÓ, que se tornou o nome oficial desse elemento arquitetônico criado na década de XX. Trata-se de um elemento pré-fabricado projetado para produção em escala, composto por uma placa cimentícia com vazios que permitem a passagem de ventilação natural e reduzem a incidência direta de luz solar. Essa solução se torna uma alternativa para regiões de clima úmido e seco (VIEIRA, BORBA E RODRIGUES, 2012).

De acordo com as considerações de Vieira, Borba e Rodrigues (2012), o cobogó proporciona a circulação de ventilação natural, conferindo conforto ambiental em regiões tropicais, além de adicionar um aspecto moderno às fachadas. Patentado em 1929 no Acervo do Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI, esse elemento apresentou inovação tecnológica ao utilizar materiais alternativos em comparação aos elementos fabricados na época, oferecendo vantagens como preço acessível, facilidade de uso e segurança. A descrição original da patente é a seguinte:

Os blocos perfurados “Combogó” a que se refere este relatório foram inventados para substituir, com vantagem, o tijolo de argila comum não só quanto à resistência como quanto ao preço de aquisição e ao modo especial pelo qual serão dispostos na construção de muros e paredes, permitindo grande segurança, rapidez e economia na sua aplicação (INPI, 1929).

Atualmente, o mercado oferece uma variedade de cobogós em relação a tamanhos, formatos, cores e materiais. Eles são utilizados em paredes não estruturais, tanto em ambientes internos quanto externos, proporcionando efeitos visuais e texturas diversificadas, como segue na Tabela 1 abaixo com os correlatos de cobogós encontrados no mercado e em pesquisa:

Tabela 1- Correlatos de cobogós: mercado e pesquisa

Número	Modelo	Nome	Material	Dimensões
01		Cobogó Raízes	Concreto	29,5 x 29,5 x 8,00 cm
02		Cobogó Cana	Cerâmica	24,0 x 24,0 x 9,0 cm
03		Cobogó Estrela	Cerâmica esmaltada	18,5 x 18,5 x 8,0cm
04		Protótipo	PEAD + PET	-
05		Protótipo	Argamassa + PET	39,0 x 39,0 x 7,0 cm

**Fonte:** Tabela criada através de busca em sites. [casoca.com.br/p/cobogo-raizes-terratile](http://casoca.com.br/p/cobogo-raizes-terratile), 2022; [revestimentosoborrachao.com/produto/cobogo-cana](http://revestimentosoborrachao.com/produto/cobogo-cana), [santacruzacabamentos.com.br/produto/cobogo-estrela-do-mar](http://santacruzacabamentos.com.br/produto/cobogo-estrela-do-mar); Costeira, 2021.

Os cobogós denominados de Raízes, Cana e Estrela, identificados na tabela com os

números 01, 02 e 03, respectivamente, são elementos que estão disponíveis no mercado, bioinspirados em elementos da natureza. Os protótipos de cobogós, especificamente o número 04, foram concebidos a partir de uma pesquisa conduzida por Costeira (2021) na Universidade Federal da Paraíba - UFPB, utilizando resíduos de PEAD e PET que foram derretidos e moldados. Além disso, o protótipo número 05 empregou concreto com a substituição do agregado graúdo por resíduos de garrafas PET trituradas. Esse último estudo de protótipo, atende aos requisitos estabelecidos pela norma NBR 6136/2016, que trata de blocos vazados de concreto simples para alvenaria, resultando em um elemento vazado com peso de 3,85 kg e resistência à compressão de 4,07 MPa (COSTA *et al.*, 2022).

### **3.4. Polietileno de alta densidade reciclado (PEAD rec)**

Os polímeros podem ser classificados quanto a sua natureza, sua forma fixada por ligações químicas, rotação dos átomos da cadeia em torno das ligações, ao tipo de encadeamento, arranjo espacial dos átomos, e ainda pode ser classificado quanto ao modo de preparação e mecanismo de polimerização, quanto ao comportamento mecânico e quanto às características de fusibilidade (MANO; MENDES, 2009).

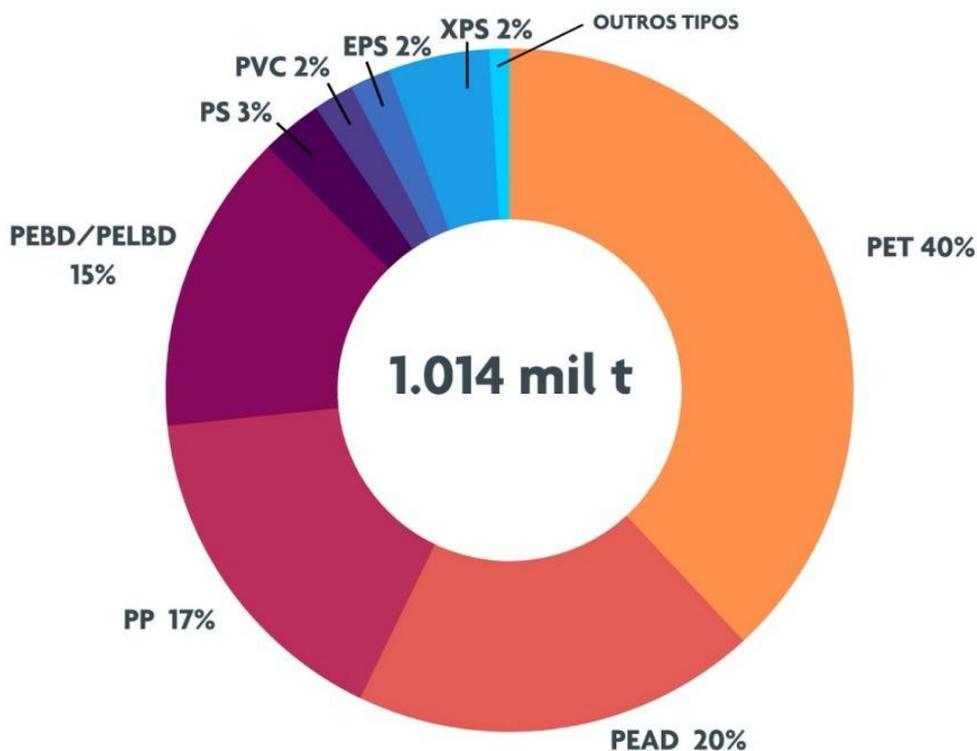
Essas características conferem ao polímero diferentes propriedades mecânicas e ópticas, podendo variar sua aplicação e utilizá-lo em diferentes áreas da indústria. Dependendo de sua classificação, as propriedades, principalmente mecânicas, podem mudar drasticamente. Nesse cenário existem os polímeros de alta produção como o polietileno de alta densidade (PEAD) e polipropileno (PP). Estes dois polímeros lideram a produção mundial (ABIBLAST, 2018).

O PEAD é um dos termoplásticos mais consumidos no mundo, tendo em vista as suas propriedades físicas e químicas, significando que o seu reaproveitamento e reciclagem é de extrema importância. Ele é largamente usado devido às suas características estruturais e suas ótimas propriedades mecânicas, térmicas e ópticas, além de ter um baixo custo. (KUMAR, RAMESH e DODDAMANI, 2021).

Portanto, para reduzir o desperdício de plástico e evitar a poluição ambiental, é necessário adotar uma abordagem de materiais circulares, baseada na reciclagem e reutilização. A reciclagem envolve o processamento dos resíduos plásticos para torná-los úteis em novas aplicações. Grande parte dos resíduos plásticos provém de embalagens. O polietileno de alta densidade reciclado (PEADrec) tornou-se uma matéria-prima fundamental para a produção de uma variedade de produtos e compostos, devido à sua capacidade de ser fusível e solúvel, sendo portanto, reciclado, conforme mencionado por Kumar, Ramesh e Doddamani (2021). Observa-

se um crescimento significativo na produção de resina reciclada a cada ano, especialmente no caso do PEAD reciclado, que registrou um aumento de 20% no Brasil em 2022, enquanto o PET liderou com 40%, de acordo com a Figura 5 (ABIPLAST, 2023).

**Figura 5** - Produção de resina reciclada por tipo de material



**Fonte:** ABIPLAST, 2023.

Com a produção de plásticos reciclados pós-consumo crescendo em 14,3% no Brasil, destaca-se o PEAD como o segundo polímero mais reciclado no país. Isso tem impulsionado o aumento de empregos em 6,3% e o surgimento de novas empresas, com um total de 16.883 empregos e 677 empresas, de acordo com a 4ª Pesquisa Anual de Índice de Reciclagem no Brasil (2021).

Para reciclar o PEAD, são aplicados diferentes processos, como moldagem por sopro, extrusão e injeção, além de procedimentos de coloração (conforme mostrado na Figura 6 b). Um dos métodos utilizados para obter o PEAD reciclado consiste na separação do material (Figura 6 a), seguida da moagem em pequenos pedaços e lavagem. Logo após, são realizados processos específicos de acordo com a finalidade do produto (SILVA e MOITA NETO, 2016).

**Figura 6** - a) Separação do resíduo de PEAD; b) PEAD reciclado em *pellets*.



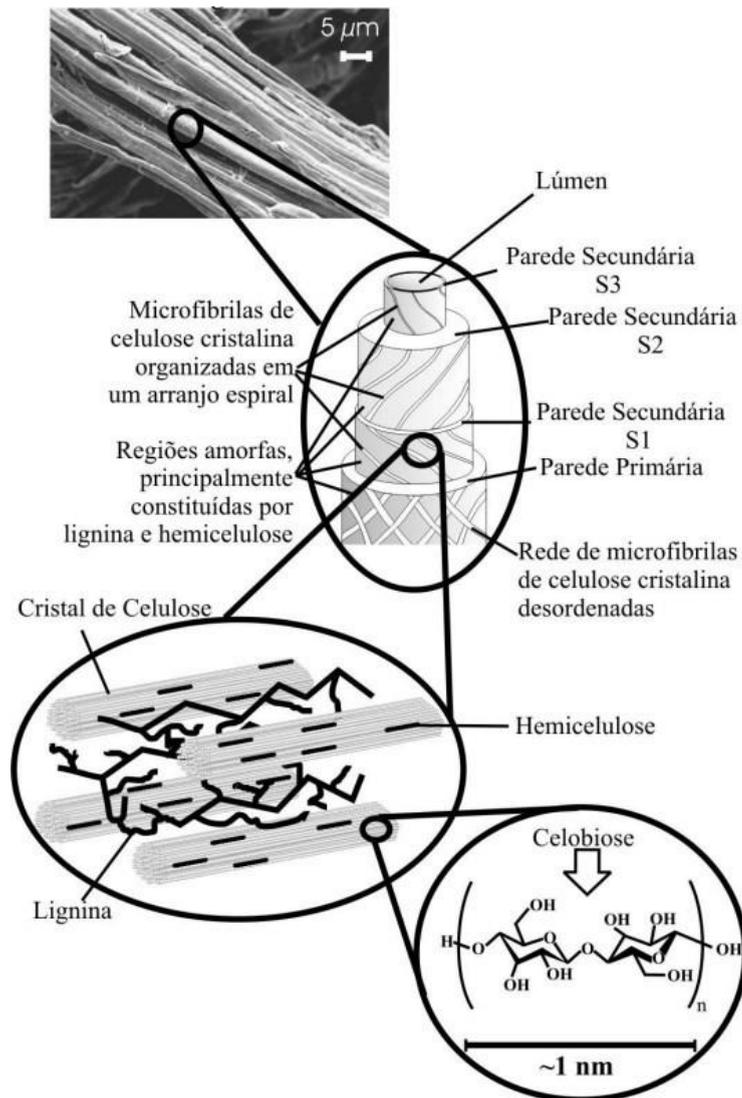
Fonte: , 2023.

### **3.5. Fibras vegetais, Abacaxizeiro e Fibras da folha do abacaxizeiro (FFA)**

#### **3.5.1. Fibras vegetais**

As plantas possuem tecidos especializados que desempenham funções estruturais mecânicas, sendo os principais o colênquima e o esclerênquima. O colênquima é um tecido vivo responsável por fornecer suporte a órgãos em crescimento ou a órgãos maduros de plantas herbáceas. Por outro lado, o esclerênquima é um tecido morto, caracterizado por células com paredes espessas e camadas de lignina, o que confere rigidez e impermeabilidade, impedindo as trocas metabólicas entre as células, conforme ilustrado na Figura 7. A presença desses tecidos vegetais é necessário para se obter o estudo morfológico e fisiológico, para a melhor aplicação na agricultura, processos de fabricação e em pesquisas científicas (SENA NETO, 2014).

**Figura 7** - Estrutura de uma fibra vegetal



**Fonte:** Adaptado Silva *et al.*, 2019.

As fibras vegetais são compostas principalmente por lignina, celulose e hemicelulose, além de outros componentes em menor quantidade, como ácidos graxos, açúcares livres, amido, pectina e compostos inorgânicos. Essas fibras são consideradas compósitos de ocorrência natural, com fibrilas de celulose incorporadas em uma matriz de lignina. Geralmente, as fibras se agrupam em feixes, com células de paredes espessas formadas por camadas sucessivas, resultando em um lúmen celular reduzido (JANDAS; MOHANTY; NAYAK, 2012).

A unidade microscópica da fibra vegetal, conhecida como célula da fibra ou "*ultimate fiber*", é formada pela união predominante de lignina e hemicelulose, formando o feixe visível popularmente denominado de fibra. As células das fibras apresentam uma estrutura composta por camadas sobrepostas, consistindo em grupos de cadeias de celulose (em escala nanométrica) chamadas fibrilas. Essas fibrilas estão dispostas helicoidalmente ao longo do eixo

da célula da fibra, interconectadas por regiões amorfas de lignina e hemicelulose (LEE; WANG, 2016).

As fibras vegetais são classificadas segundo a sua origem e podem ser provenientes de sementes, caules, folhas, frutos e raízes (MORASSI, 1994). Essas fibras têm sido amplamente utilizadas como reforço em matrizes poliméricas termorrígidas ou termoplásticas, substituindo as fibras sintéticas, devido à sua abundância, baixo impacto ambiental e boas propriedades mecânicas, físicas e térmicas (ROWEL, 2007).

Cada fibra vegetal elementar é, essencialmente, um compósito em que as microfibrilas de celulose rígidas estão envolvidas por uma matriz de lignina e hemicelulose. A lignina atua como o material de cimentação, unindo as microfibrilas, e a hemicelulose atua como interface entre a microfibrila de celulose e a lignina (SENA NETO *et al.*, 2013).

Devido às ligações de hidrogênio, as fibras vegetais possuem uma natureza hidrofílica. Essa característica é uma limitação quando as fibras vegetais são utilizadas como reforço em compósitos poliméricos, uma vez que muitos polímeros são hidrofóbicos e incompatíveis com as fibras. A natureza hidrofílica das fibras vegetais tem influência nas propriedades mecânicas e físicas das fibras, e conseqüentemente, dos compósitos em que são aplicadas. Sendo necessário o estudo de cada fibra com sua respectiva matriz polimérica, podendo sugerir melhorias para aumentar a adesão do compósito (D'ALMEIDA *et al.*, 2015).

As propriedades das fibras vegetais podem ser relacionadas a diferentes parâmetros estruturais. Um desses parâmetros está relacionado à seção transversal das fibras, onde se observa que uma menor seção resulta em um maior módulo elástico e resistência à tração, devido à redução na ocorrência de defeitos concentradores de tensão. Outro parâmetro que influencia as propriedades mecânicas das fibras vegetais, conforme mencionado por Bledzki e Gassan (2011), é a quantidade de celulose presente. A celulose forma grandes cadeias que se organizam tridimensionalmente nas microfibrilas, conferindo à fibra um grau de cristalinidade. Esse arranjo estrutural pode ser considerado uma fase ordenada, alternada com fases amorfas na estrutura celular da fibra. Estudos adicionais (JOSHI *et al.*, 2014; SAO *et al.*, 2014; BOURMAUD *et al.*, 2016) demonstraram que o grau de cristalinidade da celulose está diretamente relacionado às propriedades mecânicas das fibras.

Outro aspecto relevante nas fibras vegetais é o ângulo microfibrilar presente na parede secundária da fibra. Esse ângulo, formado entre a fibrila e o eixo da célula da fibra, mantém-se constante em toda a parede, e sua diminuição está associada ao aumento da resistência à tração, flexão e rigidez na direção da fibra (SENA NETO, 2014).

Além disso, outros fatores que influenciam as propriedades das fibras incluem a

espessura das paredes celulares, a estrutura molecular, a orientação e o grau de polimerização da celulose (MARTINS; KIYOHARA; JOEKES, 2014).

As fibras lignocelulósicas apresentam várias vantagens em relação às fibras sintéticas utilizadas como reforço mecânico em compósitos. Dentre essas vantagens estão o menor custo, ser de origem renovável, baixa densidade e abrasividade, a capacidade de usar altas frações volumétricas de fibra em relação à matriz polimérica (resultando em alta rigidez, módulos elásticos e resistência à tração e flexão específicas), ampla variedade de fibras disponíveis globalmente e geração de renda. No entanto, existem algumas limitações no uso de fibras vegetais como reforço mecânico, como a alta absorção de umidade (que pode reduzir as propriedades mecânicas), temperatura de degradação inferior à temperatura de processamento do compósito, a sazonalidade e a tendência a formar aglomerados durante o processamento (AVEROUS; BOQUILLON, 2014).

Existem diversos exemplos de fibras vegetais amplamente utilizadas como reforço mecânico, incluindo juta, linho, cânhamo, rami, kenaf, coco, sisal, algodão e fibra da folha do abacaxizeiro (MCLAUGHLIN; TAIT, 2008).

Então, para servir de reforço mecânico em compósitos poliméricos, as fibras precisam apresentar valores de resistência à tração e módulo elástico maiores do que a dos polímeros a serem usados como matriz (SANADI, 2014; SHANKS HODZIC; RIDDERHOF, 2016; CHATTOPADHYAY *et al.*, 2019).

A temperatura na qual as fibras vegetais suportam sem ocorrer degradação térmica, não comprometendo as propriedades mecânicas necessárias para o uso como reforço em compósitos, é outra propriedade essencial e um dos principais fatores limitantes no uso de fibras lignocelulósicas como reforço em materiais compósitos. A fibra vegetal selecionada como reforço mecânico deve apresentar propriedades mecânicas suficientemente superiores às da matriz polimérica, como temperaturas de degradação superiores às temperaturas de fusão da matriz polimérica ou ao processamento do compósito (DUTTA; BHOWMICK; BASE, 2019).

As fibras vegetais provenientes de folhas são originadas das folhas de certas plantas e são compostas principalmente por celulose (composta por carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H), possuindo a fórmula molecular  $C_6H_{10}O_5$ ), juntamente com substâncias incrustantes e intercelulares constituídas por hemicelulose e lignina. Alguns exemplos dessas fibras são:

- Abacá: fibra obtida das folhas da planta *Musa textilis*;
- Sisal: fibra obtida das folhas da planta *Agave sisalana*;
- FFA: fibra obtida das folhas do abacaxizeiro – *Ananas comosus*.

No Brasil, há um grande número de pesquisas sobre fibras naturais, incluindo fibras como coco, sisal, banana, caroá, abacaxi, etc. Essas fibras possuem uma ampla variedade de aplicações, devido às suas propriedades únicas e à possibilidade de produção em grande escala a preços acessíveis, contribuindo simultaneamente para a biodegradação e a renovação do ciclo ecológico. A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas e físicas dessas fibras vegetais comumente utilizadas em compósitos.

**Tabela 2** - Valores médios de algumas propriedades mecânicas de fibras vegetais

<b>Fibra vegetal</b>	<b>E (GPa)</b>	<b><math>\sigma_T</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_r</math> (%)</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Sisal	19,5	570	4,0	1,45
Abacaxi	58,5	1627	2,3	1,44
Coco	22,5	200	17,5	1,37
Bagaço da cana	17,0	250	5,11	1,25
Bambu	36,5	450	3,22	1,50
Juta	29,0	300	1,7	1,03
Algodão	9,05	442	7,5	1,55
Ramie	94,7	669	3,7	1,50
Curauá	28,0	600	3,02	1,35
Licuri	23,9	500	2,0	0,54
Folha de bananeira	20,0	550	5,5	1,35
Piaçava	5,6	140	5,0	1,05
Linho	27,6	690	2,95	1,50
Canhâmo	34,0	900	3,50	1,50

E – módulo de Young,  $\sigma_T$  – Resistência à Tração,  $\epsilon_r$  – Alongamento na Ruptura,  $\rho$  – Massa Específica

**Fonte:** Yang, 2019.

No Brasil, têm sido desenvolvidas políticas no setor agrícola que visam o aumento das áreas cultiváveis para fibras vegetais, permitindo colheitas ao longo dos anos. Além disso, há um aprimoramento das técnicas de cultivo existentes com a participação do Instituto Brasileiro de Pesquisa Agrícola (EMBRAPA). Uma característica interessante no país é a iniciativa dos próprios agricultores, por meio de cooperativas agrícolas e com o auxílio da EMBRAPA, o que tem contribuído para aumentar a produtividade de algumas culturas. Outra característica relevante é o crescimento da mecanização, que tem proporcionado uma maior disponibilidade de fibras no mercado, apesar da diminuição na quantidade total de fibras processadas em relação

à quantidade total de fibras disponíveis (SATYANARAYANA *et al.*, 2017).

As condições climáticas, a idade e o processo de deterioração, influenciam não apenas a estrutura das fibras, mas também na composição química. A água é o principal componente químico de uma árvore viva. No entanto, na base seca, todas as paredes celulares da planta consistem principalmente de polímeros à base de açúcar (celulose e hemicelulose), que são combinados com a lignina em menor teor de produtos extrativos, proteínas, amido e componentes inorgânicos (FARUK *et al.*, 2012). De maneira resumida, o Quadro 1 apresenta as vantagens e desvantagens das fibras naturais.

**Quadro 1** - Vantagens e desvantagens das fibras naturais

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixo peso específico resulta em uma maior resistência específica e rigidez do que o vidro	Menor valor de resistência, especialmente resistência ao impacto
Fontes renováveis e sustentáveis, necessitam de pouca energia e baixa emissão de CO <sub>2</sub>	Necessitam de processamento adequado
Processo não desgasta ferramentas e não irrita a pele	Baixa resistência à umidade, o que faz com que as fibras inchem
Bom isolamento acústico e térmico	Temperatura máxima de processamento restrita
Biodegradável	Menor durabilidade, baixa resistência ao fogo
Reciclagem é possível	Requerem resinas compatíveis

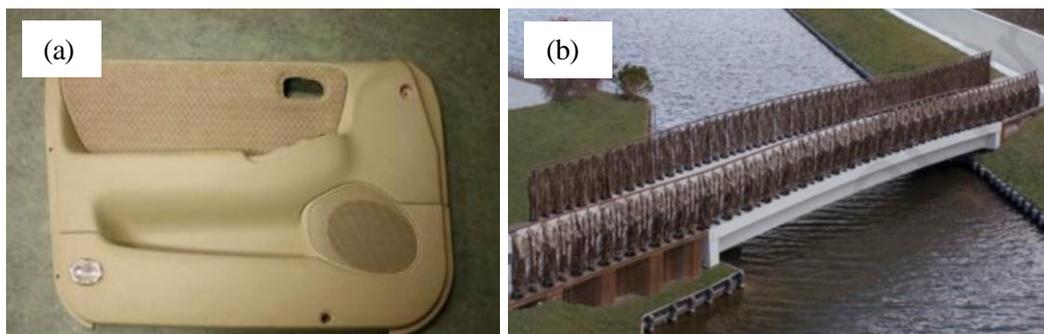
**Fonte:** Faruk *et al.*, 2012.

As fibras naturais derivadas de resíduos agrícolas têm sido amplamente utilizadas em uma variedade de aplicações, desde tecidos até materiais de construção. Embora tenham sido utilizadas há muitos anos, essas fibras perderam espaço para as fibras sintéticas, como o vidro e o carbono, que ganharam destaque no século XX. No entanto, recentemente, houve um ressurgimento do interesse pelas fibras vegetais devido às suas propriedades sustentáveis e facilidade de manipulação de suas características físicas (PHIRI *et al.*, 2023).

Além de suas vantagens sustentáveis e propriedades físicas notáveis, as fibras naturais

estão presentes em nosso cotidiano. Um exemplo de aplicação são os painéis de porta de carro feitos com fibra de linho (Figura 8a), enquanto outra aplicação é vista em uma ponte inteligente, onde os blocos de estrutura são fabricados usando um sanduíche de fibra de linho, e o corrimão é feito de um filamento biocomposto de linho (Figura 8b) (PHIRI *et al.*, 2023).

**Figura 8** - a) Painel de porta de carro feito com fibra de linho; b) Ponte composta com blocos de estrutura fabricados em sanduíche de fibra de linho e corrimão de filamento biocomposto de linho



**Fonte:** Peças *et al.*, 2018.

Considerando as diversas vantagens apresentadas pelo uso de fibras naturais, como as vegetais ou de celulose natural, como material de reforço, esses materiais atendem a requisitos essenciais para diversas aplicações na área da engenharia. Um exemplo específico é a fibra da folha do abacaxizeiro, que é o foco desse estudo. Essa fibra foi selecionada devido à sua ampla distribuição na região nordeste do Brasil, garantindo um suprimento constante e acessível, além das características positivas que a mesma apresenta. A seguir, serão detalhadas algumas dessas características.

### 3.5.2. Abacaxizeiro

O abacaxi pertence à ordem *Bromeliales*, família *Bromeliaceae*, subfamília *Bromelioideae* e ao gênero *Ananas*. É uma espécie nativa do Brasil e representa a maior importância econômica dentro da família *bromeliácea* (CABRAL *et al.*, 2014). Trata-se de uma cultura temporária, ou seja, uma cultura com curto ou médio ciclo vegetativo, geralmente inferior a um ano, que requer um novo plantio após a colheita para produção (IBGE, 2023).

A produção mundial de frutas de abacaxi em 2022, de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação - FAO (2022) foi superior a 27,02 milhões de toneladas, liderada pelas Filipinas, com uma produção de 26,24 milhões de toneladas em 2020, seguida pela Costa Rica. Os principais produtores são Tailândia, Costa Rica, Brasil, Filipinas e Indonésia (em ordem decrescente de produção), e esses cinco países representam mais de 50%

da produção mundial. Quanto à industrialização, o Havaí se destaca, mas também se verifica a presença significativa de Formosa, Malásia, África do Sul, Austrália e Costa do Marfim. Estados Unidos, Alemanha, Japão, Reino Unido, Canadá e França são grandes consumidores da fruta industrializada.

De acordo com a EMBRAPA (2021) os principais estados brasileiros produtores de abacaxi são: Pará em primeiro lugar em área colhida (13.916 ha), produção de frutos (361.027) e rendimento de fruto por hectare (25.947). A Paraíba ocupa o segundo lugar, com área colhida de 8.789 ha, produção de 263.370 frutos e rendimento de 29.966 frutos por hectare, sendo este último parâmetro superior ao do estado do Pará. Segundo dados da FAO, o Brasil é o maior produtor mundial de abacaxi, respondendo por 13,4% do total anual. No ano de 2021, a produção brasileira foi de 63.589 hectares de área colhida, produção de 1.545.036 mil frutos e rendimento de 24.297 frutos por hectare (EMBRAPA, IBGE, 2022).

Dentre os municípios paraibanos que se destacam na produção de abacaxi, estão Itapororoca, Araçagi, Santa Rita, Pedras de Fogo, Lagoa de Dentro e Curral de Cima. Esses municípios alcançaram uma produtividade média de aproximadamente 31.000 frutos por hectare e um faturamento médio de cerca de R\$ 345.000.000,00 em 2021 (IBGE, 2021).

O abacaxizeiro, cientificamente conhecido como *Ananas comosus*, é uma planta tropical originária de regiões de clima quente e seco ou com pluviometria irregular. Existem diversas variedades, como Pérola, Smooth Cayenne, Perolera e Primavera. As bromeliáceas, em geral, são plantas de alta resistência, capazes de sobreviver tanto em áreas desérticas quanto em regiões mais úmidas. Elas possuem folhas longas, rígidas e fibrosas, enquanto os frutos costumam ter formato de baga ou cápsula (EMBRAPA, 2013).

A planta do abacaxi leva em média 200 dias a 30 meses para frutificar e é propagada vegetativamente por meio de mudas produzidas pela própria planta. Ela é caracterizada por um caule curto e grosso, conhecido como talo, ao redor do qual crescem cerca de 70 a 80 folhas em formato de calha, estreitas e rígidas, podendo atingir até 1,50 metros de comprimento. O fruto do abacaxi, como ilustrado na Figura 9 (EMBRAPA, 2013)

**Figura 9** - Plantação de abacaxi

**Fonte:** Silva *et al.*, 2019.

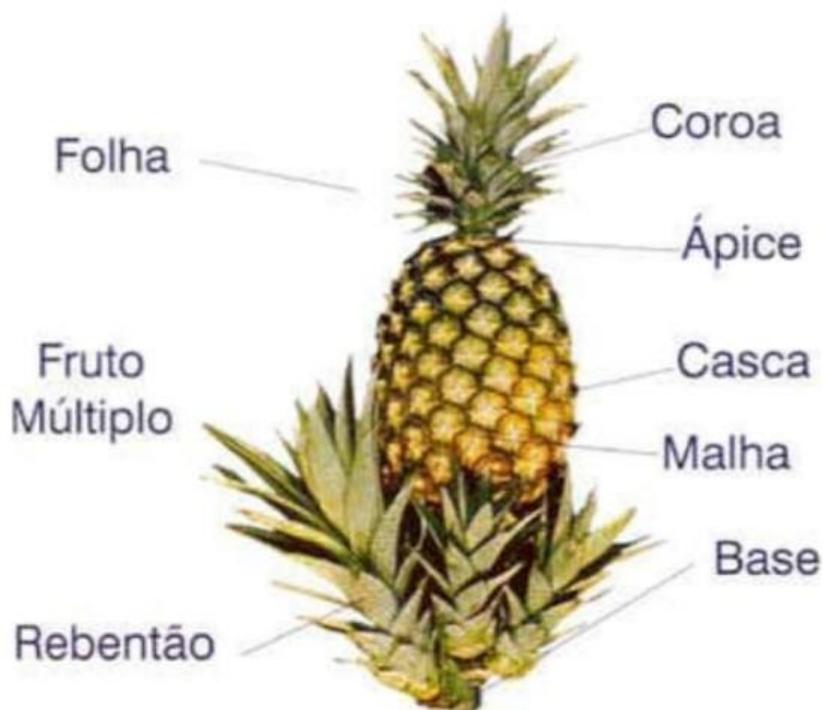
O cultivo do abacaxizeiro pode ser realizado em diferentes sistemas de fileiras, como simples, duplas, triplas, quádruplas e quádruplas, sendo as fileiras simples e duplas as mais comuns. Segundo Junghans (2021), as fileiras simples são ideais para variedades espinhosas, enquanto as fileiras duplas permitem uma maior densidade de plantas por área, proporcionando melhor sustentação.

A disseminação do abacaxizeiro é realizada de maneira vegetativa, podendo-se usar diversas partes da planta para a formação das mudas (Figura 10). De acordo com Lima *et al.* (2021); Crestani *et al.* (2010), essas partes são:

- Coroa: encontrada no ápice do fruto e é dificilmente usada pois é vendida com o fruto. Seu crescimento é mais lento e a frutificação mais tardia.
- Filhote: localizado na base do fruto e ajuda muito na sustentação. É a muda de maior disponibilidade e também a mais usada, podendo auxiliar a formação de plantios homogêneos, o que ajuda o manejo, a colheita e o controle de florescimento.
- Filhote-rebentão: é um tipo de muda com tamanho adequado e que pode ser usado para o plantio, porém é pouco produzida pela grande parte das cultivares de abacaxi.

- Rebentão: é a brotação do caule e aparece na base da planta-mãe. Dificulta a formação de plantio homogêneos, porém possibilita a produção na seca ou na segunda safra.

**Figura 10** - Muda vegetativa do abacaxizeiro



**Fonte:** AGRAER (Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Rural), 2016.

Outros tipos de mudas podem ser obtidos por meio do seccionamento do caule e através de técnicas de cultura de tecidos em laboratório.

A produção de abacaxi é direcionada principalmente para o consumo humano, seja como fruta fresca ou para a indústria de processamento de alimentos. Na Paraíba, houve um crescimento nas exportações em 2022, especialmente no segmento de sucos de abacaxi industrializados, com um aumento de 16,88%, de acordo com a Federação das Indústrias do Estado da Paraíba - FIEP (2023).

Além disso, outras aplicações podem ser exploradas considerando a diversidade genética do abacaxizeiro (CABRAL *et al.*, 2014). Essas aplicações incluem a identificação e caracterização de enzimas com atividades antioxidantes e propriedades biológicas, que possuem valor significativo para as indústrias farmacêutica, cosmética e alimentícia (SENA NETO, 2014). O abacaxizeiro também possui potencial ornamental, principalmente em suas variedades silvestres e híbridas (AMARAL *et al.*, 2018). Além disso, as fibras das folhas do

abacaxizeiro podem ser utilizadas na fabricação de linhas, cordas, tecidos (Figuras 11 a, b e c) e como reforço para compósitos poliméricos, devido às suas boas propriedades mecânicas (LEAO *et al.*, 2010; MOHANTY *et al.*, 2012; MARQUES *et al.*, 2017; LEAO *et al.*, 2017).

**Figura 11-** a) Carretel de linhas feitas de FFA; b) FFA para cordas; c) Tecidos de FFA



**Fonte:** a) saltwaterrose.com, 2016; b) the-sustainable-fashion-collective.com, 2019; c) textilevaluechain.in/news-insights/clothing-made-from-pinnacle-fibre, 2020.

### 3.5.3. Fibra da folha do abacaxizeiro (FFA)

Em alguns países, como a Índia e as Filipinas, é comum a extração das fibras das folhas do abacaxizeiro para diversos fins. Na Índia, essas fibras são utilizadas na produção de fios, tecidos e produtos artesanais. Nas Filipinas, elas são frequentemente empregadas como matéria-prima para forros de roupas, como camisas e bermudas, esteiras, capachos, bolsas, cobertores e materiais isolantes térmicos e acústicos (MUKHERJEE; SATYANARAYANA, 2006).

A obtenção da fibra da folha do abacaxizeiro pode ser realizada de forma manual ou mecânica. No procedimento manual, o processo começa com o desfibramento das folhas por meio de batimento e raspagem com um objeto de metal. As folhas são mergulhadas em água por aproximadamente 18 dias e, em seguida, são batidas e raspadas até que a camada externa seja removida, utilizando-se uma pequena faca ou pedaço de cerâmica. Após esse processo, as folhas são colocadas novamente na água, onde podem ser adicionados produtos químicos para acelerar a atividade dos microorganismos que digerem o tecido não desejado e separam as fibras (JAIN, 2021).

No processo de extração mecânica das fibras do abacaxizeiro, é possível utilizar máquinas de sisal para a retirada dessas fibras. No entanto, já existem desfibradeiras específicas desenvolvidas para a extração das fibras das folhas do abacaxizeiro, que são utilizadas principalmente na Índia, Filipinas e Brasil. Essas desfibradeiras funcionam com base nos princípios de uma máquina de sisal, garantindo um processo eficiente de separação das fibras

(SARKER, 2019).

Estima-se que, a partir de 1 kg de folhas de abacaxizeiro (aproximadamente de 22 folhas) seja possível obter de 22 a 27 gramas de fibras. Após a extração, as fibras são submetidas ao processo de secagem, que pode ser realizado em varais, como ilustrado na Figura 12.

**Figura 12** - Fibra da folha do abacaxizeiro (FFA) secando em varais ao ar livre



**Fonte:** [Textiletoday.com.br](http://Textiletoday.com.br), 2017.

A fibra obtida das folhas do abacaxizeiro apresenta excelentes características mecânicas, graças ao seu elevado teor de celulose (82%) e baixo ângulo microfibrilar (15°). As propriedades da fibra variam de acordo com diferentes aspectos, como dimensões, comprimento, espessura ou diâmetro, idade e tipo de folhas (CORREIA, 2011).

Na Tabela 2, são destacadas algumas características e propriedades da fibra da folha do abacaxizeiro "*in natura*". Essas informações oferecem uma visão sobre as propriedades físicas e mecânicas da fibra, auxiliando no entendimento de seu potencial de aplicação.

**Tabela 3** - Características e propriedades da fibra da folha do abacaxizeiro

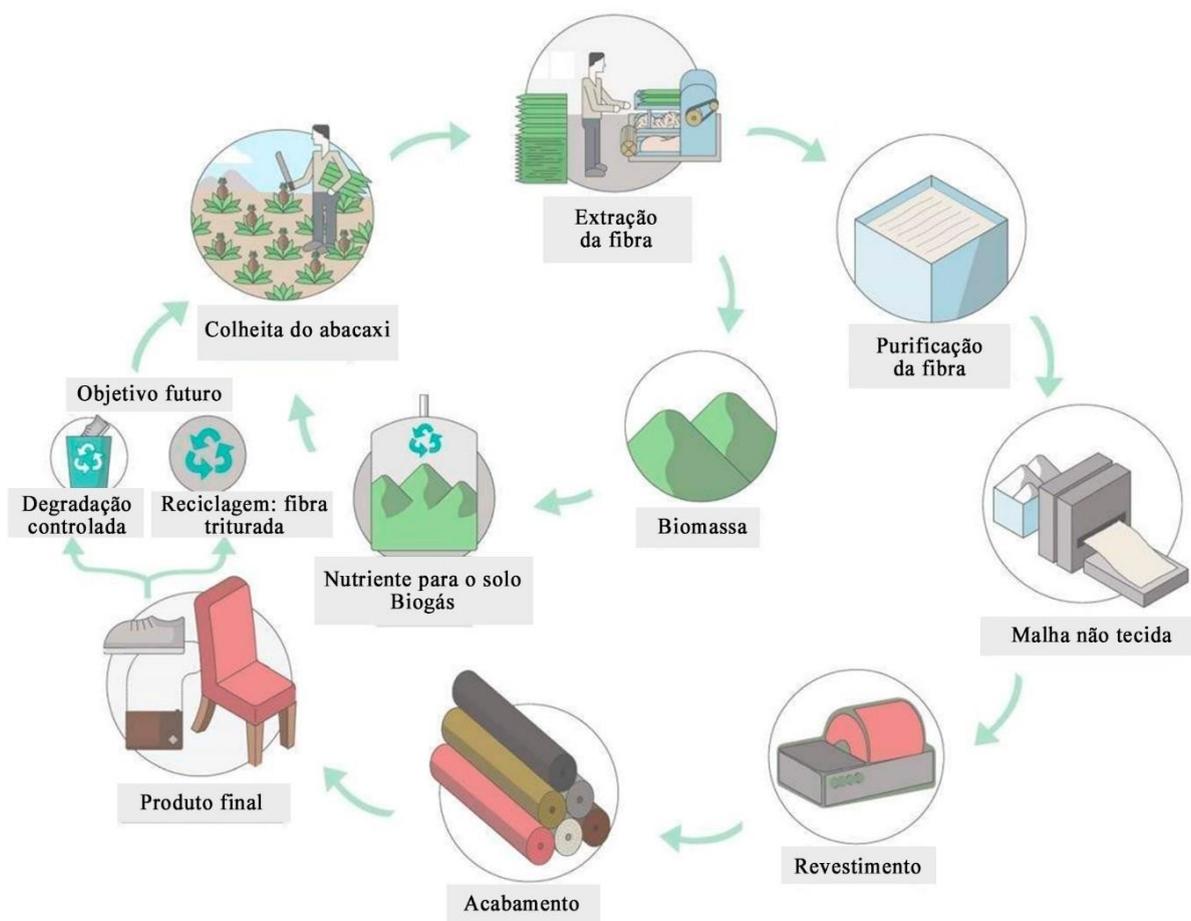
<b>Características</b>	<b>Propriedades</b>
Comprimento	Fibra técnica de 50 a 120 cm
Diâmetro	105 $\mu\text{m}$
Pureza	Ótima
Cor	Branca-creme
Brilho	Superfície lustrosa
Superfície da fibra	Lisa
Toque	Macio (fibra macia)

Teste de combustão	Chama amarela, rápida, cheiro de papel queimado
Comportamento a ácidos	Muito sensível
Densidade	1,44 g/cm <sup>3</sup>
Higroscopicidade	11%
Tingibilidade	Ótima: cores claras e luminosas

**Fonte:** Mukherjee e Satyanarayana, 2006.

Um uso recente desse tipo de fibra é na indústria têxtil, a partir de um tecido chamado Piñatex, que compreende um couro ecológico. O produto foi lançado em março de 2015 e é resultante de uma pesquisa liderada pela espanhola Carmen Hijosa, que atuou como consultora na indústria de artigos de couro nas Filipinas. Para alterar o produto em matéria-prima, a pesquisa em questão teve apoio da *Royal College of Art* em parceria com a *Puma* (HIJOSA; LOZANO, 2019; ROSA, SANTULLI, 2021).

Na Figura 13, é apresentado o ciclo de vida do Piñatex, um material inovador e sustentável. O processo tem início com a extração das fibras das folhas de abacaxizeiro, as quais são purificadas utilizando água. Os resíduos restantes das folhas são transformados em biomassa, evitando o desperdício e aproveitando ao máximo os recursos naturais. As fibras purificadas seguem para o processo de transformação em malha não tecida, onde são entrelaçadas e formam uma base resistente e flexível. Em seguida, ocorre o processo de revestimento, no qual as peças recebem acabamentos de texturas e cores, conferindo-lhes estilo e atratividade visual. Esse processo permite uma ampla gama de possibilidades de design, adaptando o material às diferentes aplicações finais. O resultado desse ciclo de vida é a criação de produtos finais, tais como bolsas, calçados, mobiliários e outros itens. Um aspecto importante do ciclo de vida do Piñatex é a sua capacidade de ser reiniciado. Após o uso dos produtos feitos com esse material, eles podem ser reciclados ou até mesmo compostados, retornando aos estágios iniciais do ciclo.

**Figura 13** – Ciclo de vida da Pinãtex

**Fonte:** ananas-anam.com/, 2017 (Adaptado: tradução das legendas).

A FFA tem grande utilidade na indústria têxtil devido a sua maciez, brilho e ótima tingibilidade. É usada ainda na produção de confecção de cordas e no artesanato. Devido as suas boas propriedades físicas e mecânicas. Essas propriedades mecânicas e físicas estão apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4** - Propriedades mecânicas e físicas das FFA's

Propriedades	Fibra de Abacaxi
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,526
Resistência à tensão (MPa)	170
Alongamento na ruptura (%)	3
Módulo de Young (MPa)	6210
Resistência específica (MPa)	110
Módulo específico	4070

**Fonte:** Tavares, 2008.

Para além da indústria têxtil, a FFA está sendo aplicada em outros setores a exemplo da indústria calçadista, setor de beleza, setor automobilístico, da construção civil, elementos arquitetônicos, absorção de som em ambientes, recuperação em edificações.

### **3.6. Misturas de resíduos poliméricos reforçados com a FFA**

Em um estudo conduzido por Singh *et al.* (2021), os compósitos de polietileno de alta densidade (PEAD) virgem e reciclado reforçados com FFA foram analisados. Foi concluído que o PEAD reciclado possui um impacto insignificante no comportamento de adesão do polímero com a fibra em comparação com o PEAD virgem, com base em testes de tração, análise termogravimétrica e cristalinidade dos compostos. Além disso, nas superfícies fraturadas após os testes de tração, foi observada a quebra da fibra no local da fratura, indicando que as fibras estavam contribuindo para o suporte de carga e apresentaram boa adesão ao PEAD, aumentando a capacidade dos compósitos de suportar carga.

Um estudo adicional realizado por Gandara *et al.* (2022) comparou sacolas plásticas de PEAD reciclado com compósitos de PEADrec reforçados com FFA, demonstrando o potencial de uso dessa combinação na fabricação de compósitos sustentáveis. Foi observado um aumento nos módulos de tração e na dureza dos compósitos.

Quanto ao uso da FFA reforçando matrizes poliméricas, destaca-se também o estudo de Gomes (2015), que analisou compósitos poliméricos de epóxi e FFA, bem como poliéster e FFA. Os compósitos foram produzidos com teores de fibras de 0, 10 e 30%, e foram realizados testes de flexão e tração. As amostras foram moldadas por compressão utilizando uma prensa hidráulica de 15 toneladas. Segundo o autor, os melhores resultados de tração foram encontrados no compósito de epóxi e FFA com teor de 30%. Quanto aos testes de flexão, os compósitos de poliéster e FFA, também reforçados com 30% de fibras, apresentaram resultados superiores aos demais. Os resultados destacaram que quanto maior a proporção de FFA nas amostras, melhores foram os resultados dos testes mecânicos, ressaltando a importância da fibra em estudo.

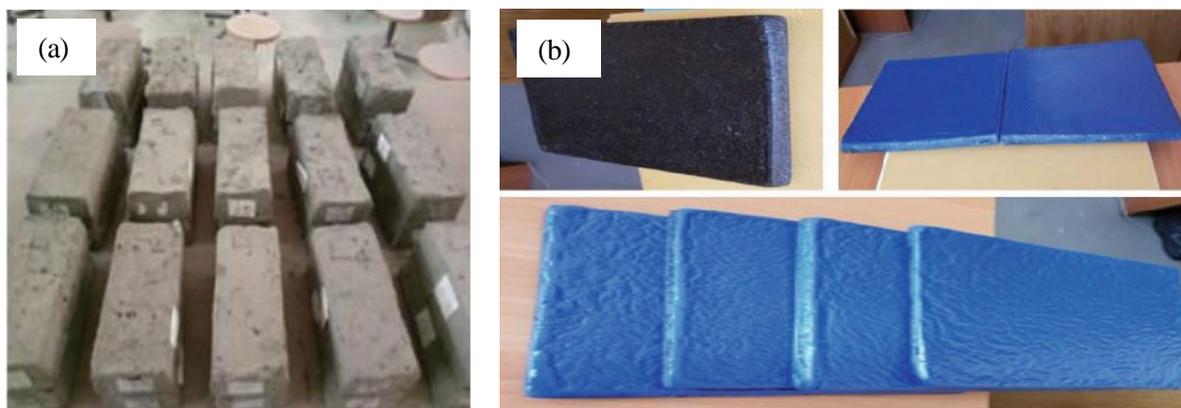
A FFA, como mencionada em outros trabalhos e nessa dissertação, apresenta propriedades vantajosas para a utilização em diversos fins comerciais e industriais. Negrão (2018) e Negrão *et al.* (2020) apresentam a viabilidade da utilização da FFA misturada com resina vegetal da mamona para painel - contribuindo para elementos arquitetônicos - e mobiliários. Em que os teores de 30 e 40% de FFA foram os valores mais recomendados para os painéis. Enfatizando a possibilidade de uso desse compósito, através de análise comparativa

entre os resultados dos ensaios físicos e mecânicos.

A utilização da fibra como reforço em argamassa ou adobe para a elaboração de tijolos ecológicos para comunidade de baixa renda localizada na Etiópia (Figura 14a) resultou no aumento da resistência à compressão e à tração, para além da melhoria eficiente na falha de ductilidade do tijolo e reduzindo os custos em até 72% em relação aos tijolos convencionais (JEBASINGH; GEBRIE, 2021).

Outro estudo de êxito com aplicação da FFA foi realizado por Rotich (2020), utilizando compósito de polietileno de baixa densidade (PEBD) reforçado com a FFA para a elaboração de revestimento para parede de banheiro (Figura 14b), apresentando alta aplicabilidade e durabilidade.

**Figura 14** – a) Tijolos elaborados com adobe e FFA; b) Revestimento para banheiro feitos com PEBD e FFA.



**Fonte:** (a) Jebasingh, 2021; (b) Rotich, 2020.

Além da utilização de fibras reforçando matriz polimérica, há a utilização de duas fibras vegetais em compósitos, traz um estudo promissor, aponta as vantagens de cada fibra e como se complementam para reforçar um compósito. Esse trabalho foi comprovado por Correia (2011) e Aji *et al.* (2012). A pesquisa de Correia caracterizou compósitos de matriz geopolimérica com o reforço de duas fibras vegetais: FFA e sisal. A FFA apresentou melhor estabilidade térmica e menor perda de massa comparando com a do sisal. Os compósitos reforçados com 3% vv de fibras vegetais apresentaram valores mais elevados de resistência a tração na flexão devido a distribuição dos esforços. Nessa referida pesquisa, todos os valores encontrados são superiores aos da matriz sem reforço, exceto para os ensaios de compressão simples.

No estudo realizado por Aji *et al.* (2012), foram investigados dois tipos de compósitos:

PEAD reforçado com as fibras de kenaf e FFA e PEAD reforçado com 100% de FFA. Os pesquisadores observaram que os valores de força e módulo aumentaram à medida que a quantidade de FFA aumentava nos compósitos. Isso indicou um equilíbrio entre as duas fibras, onde elas se complementaram mutuamente em termos de propriedades mecânicas. A presença da FFA no compósito contribuiu para melhorar as propriedades de tração e flexão, enquanto o kenaf proporcionou uma maior resistência ao impacto e reduziu a absorção de água. Esses resultados destacaram o potencial elevado de hibridização ao combinar as duas fibras em um único compósito. Essa abordagem de utilizar fibras complementares a FFA pode resultar em outros estudos importantes para a sociedade.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

O polietileno de alta densidade reciclado (PEADrec) usado nesse trabalho sob a forma de *pellets*, de cor verde (Figura 15) foi doado pela Rava Embalagens, Cabedelo/João Pessoa-PB e produzido pela Dannaplas, na cidade de Piracicaba, São Paulo-SP. As suas principais propriedades são exibidas na Tabela 5, conforme ficha técnica do fabricante.

**Figura 15** – PEADrec puro de cor verde



**Fonte:** Autora, 2022.

**Tabela 5** - Propriedades do PEAD reciclado usado na pesquisa.

Código:	102.03.02.02	Data de fabricação:	11/05/2021
		Lote:	14852
Descrição:	PEAD granulado verde	Nota fiscal nº:	22708
Propriedades	Referência/ Método	Especificação	Encontrado
Aspecto Físico	Visual conforme padrão	Granulado	Aprovado
Cor	Visual conforme padrão	Verde	Aprovado
Fluidez (190°C/ 2,16 kg)	ISO 1133	Mínimo: 0,01 Máximo: 0,5	0,18 g/ 10 min
Teor de Cinzas (750°C/ 30 min.)	ISO 3451 Método A – (rápido)	Mínimo: 0 Máximo: 7	2,90%
Teor de Umidade	ASTM D6980	Mínimo: 0 Máximo: 0,2	0,07%

Fonte: Dannaplas , 2021.

As folhas do abacaxizeiro foram coletadas na Fazenda Santa Rosa, localizada na cidade de Itapororoca, no estado da Paraíba, Brasil. As folhas foram retiradas em período de pós-colheita, sendo a planta do tipo abacaxi pérola (*Ananas comosus*), possuindo idade em torno de 1 ano e 3 meses e as folhas com o comprimento de aproximadamente 90 cm, para a obtenção das FFA que foi objeto de investigação dessa pesquisa.

A Figura 16 mostra as folhas do abacaxizeiro coletadas na área de plantação em que foram retiradas para dar início ao experimento.

**Figura 16** - Folhas do abacaxizeiro no local de colheita.



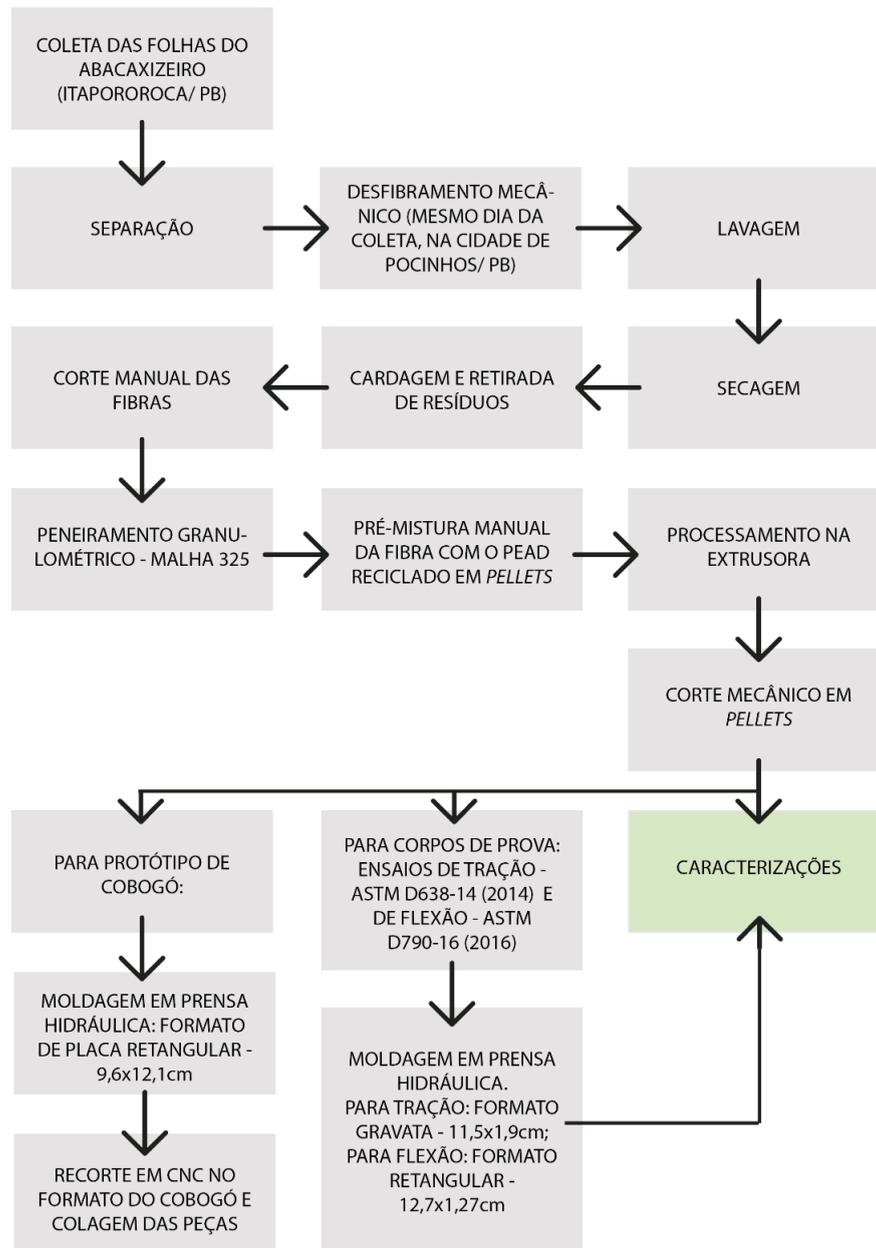
**Fonte:** Autora, 2022.

## **4.2. Métodos**

### **4.2.1. Etapas do processo de preparação das FFA's**

O fluxograma a seguir apresenta de forma geral, as etapas dos processos realizados nessa dissertação (Figura 17).

**Figura 17** - Fluxograma das etapas de processo realizadas nessa dissertação.



Fonte: Autora, 2023.

Após a colheita, no dia 29 de março de 2022, no mesmo dia, foi feita a extração das fibras na cidade de Pocinhos, Paraíba, Brasil. O desfibramento foi realizado de maneira mecânica, utilizando a máquina denominada de “motor de agave” ou “máquina paraibana”, criada em meados da década de 40 de acordo com Nunes (2006) como pode ser observada na Figura 18. Desfibra-se em média, 20 a 30 folhas por minuto ou de 1.200 a 1.800 folhas por hora ou entre 550 a 820 kg de folhas por hora, de acordo com Silva *et al.*, (2008). Desenvolvida entre as décadas de 30 e 40, em que foi implantada essa máquina de desfibramento em uma usina de beneficiamento no município de Nova Soure/BA (LAGE, 2002).

**Figura 18** - Máquina Paraibana para desfibramento das folhas do abacaxizeiro.

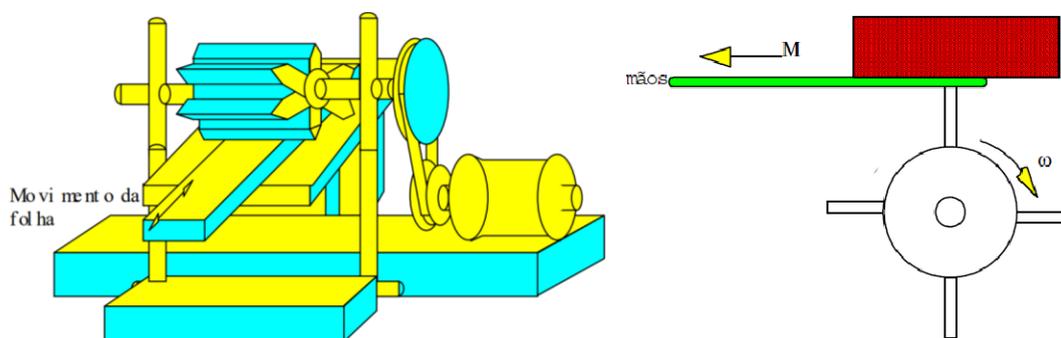


**Fonte:** Autora, 2022.

Na máquina paraibana, o elemento que executa o desfibramento paralelo é uma lâmina especial que está instalada em um rotor móvel com diâmetro de 230 mm e o acionamento ocorre através do motor a diesel, fazendo girar 12 cantoneiras de abas com dimensões de 34,925 mm x 6,35 mm fixadas na extremidade do rotor. Com o movimento das cantoneiras realizam o esmagamento e a raspagem da folha, com o auxílio de um raspador. Primeiramente, o operador segura na metade da folha, alimentando na entrada do equipamento, retira e coloca a outra metade da folha, desfibrando assim toda a folha (ARAÚJO, DANA e MOREIRA, 2019).

Na Figura 19 é possível entender o funcionamento do motor.

**Figura 19** - Motor da máquina paraibana e configuração da desfibradora paralela.



**Fonte:** Araújo, Dana e Moreira, 2019.

Após o desfibramento mecânico (Figura 20a), as fibras foram penduradas em varal para serem secas ao ar livre por 24h (Figura 20b). Após a secagem ao ar livre, a cor das fibras se

tornou mais clara e esbranquiçada. Isso difere do tom verde claro logo após o processo de desfibramento, que é causado pela presença de mucilagem e outros resíduos das folhas do abacaxizeiro. Posteriormente, realizou-se o processo de cardagem<sup>2</sup> das fibras, para então, serem retirados os resíduos/contaminantes existentes nelas e desembaraçadas com o auxílio de uma escova com cerdas plásticas, conforme Figura 20c.

**Figura 20** – a) Fibras da folha do abacaxizeiro (FFA) após o desfibramento mecânico, embaraçadas; b) FFA secando ao ar livre; c) FFA desembaraçadas.



Fonte: Autora, 2022.

#### 4.2.2. Tratamento químico realizado nas FFA's

Após o desfibramento mecânico e processo de cardagem, as FFA's foram submetidas à tratamento químico com o intuito de melhorar a afinidade química/estrutural da fibra com o polímero PEADrec usado nesse trabalho, na preparação posterior das misturas por moldagem por extrusão, como será reportado nas seções subseqüentes.

As FFA's longas, foram imersas numa solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) a 10% m/v e mantidas nessa solução por um tempo de 24h à temperatura ambiente de 25°C. Por fim, as amostras foram secas ao ar livre usando varal conforme representação mostrada na Figura 20b, acima.

Em seguida, as fibras com e sem tratamento, foram cortadas manualmente usando uma tesoura, deixando-a com comprimento aproximado de 2 mm (Figura 21). Logo após, as fibras foram secas a uma temperatura de 100±5°C por 6 h, usando uma estufa de circulação e renovação de ar (Marca SP Labor, Modelo SP-102/40), visando diminuir a umidade e facilitar a classificação utilizando uma peneira granulométrica de inox da marca A Bronzinox, malha #325. Apenas as fibras que passaram pela malha da peneira com granulometria inferior a 45µm

<sup>2</sup> Método usado para desenredar ou pentear uma fibra têxtil, como algodão, lã ou linho, para facilitar o processo de fiação.

foram utilizadas na preparação das composições, descritas a seguir.

**Figura 21** – FFA's cortadas.



**Fonte:** Autora, 2022.

#### 4.2.3. Misturas de PEADrec com FFA

Inicialmente, a fibra da folha do abacaxizeiro (FFA) foi misturada ao PEADrec numa concentração de 0,5 e 1% (m/m), sem tratamento adicional, de maneira manual, utilizando luvas e uma espátula de aço para auxiliar na etapa de pré- mistura (Figura 22).

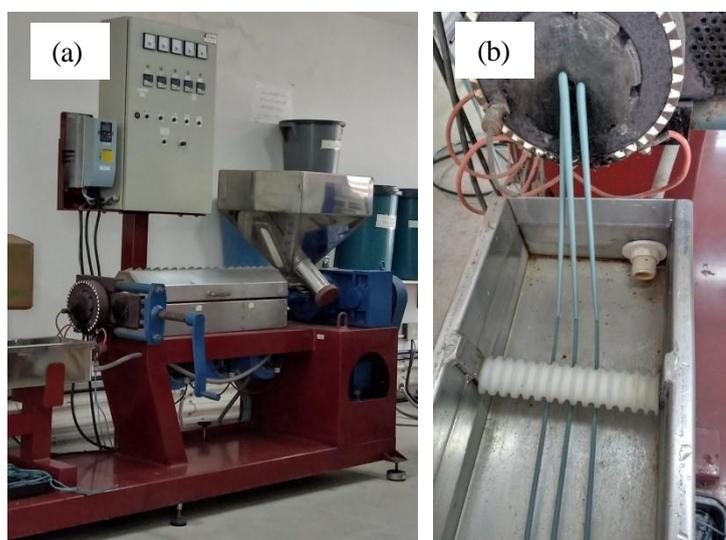
**Figura 22** – Pré-mistura dos grânulos de PEADrec com FFA.



**Fonte:** Autora, 2022.

Após a pré-mistura (Figura 22), as composições foram secas utilizando os mesmos parâmetros apresentados no Item 4.2.1. Logo após, o material foi submetido ao processamento, usando uma extrusora monorosca (Marca Lessa Máquinas) (Figura 23a) contendo elementos de mistura ao longo da mesma, motor de 50cv e banheira de resfriamento com 2,5 m de comprimento e 0,23 m de largura (Figura 23 b); quadro de controle de temperaturas da marca In-Matec, contendo cinco zonas de aquecimentos programáveis. Para tanto, foram utilizados os seguintes parâmetros de temperaturas, da zona 1 a 5, respectivamente: 173, 172, 186, 178 e 168 °C, cujos valores foram ajustados durante o processamento.

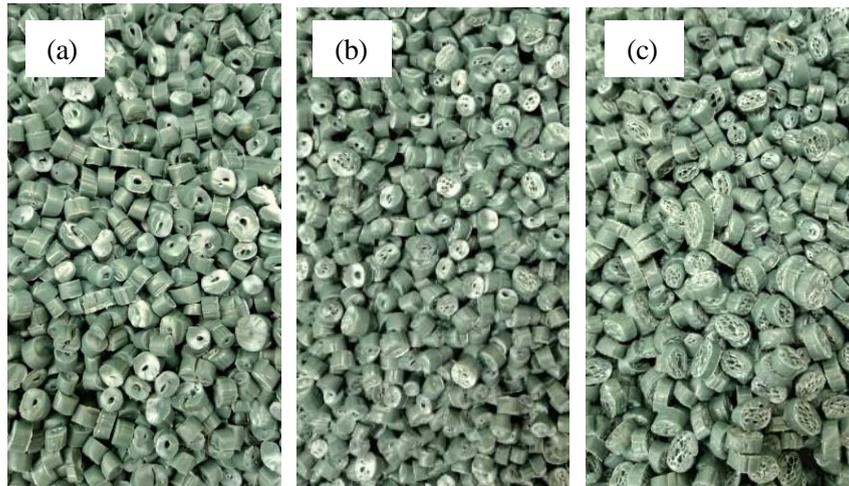
**Figura 23** - Extrusora monorosca usada no processamento das misturas. (a) visão completa da máquina extrusora e (b) representação dos “macarrões” saindo da matriz e passando na banheira de resfriamento.



Fonte: Autora, 2022.

Após a extrusão, os “macarrões” foram triturados sob a forma de grânulos numa *peletizadora* como ilustrados na Figura 24. Em seguida, as amostras extrudadas PEADrec sem e com 0,5 e 1% (m/m) de FFA foram denominadas PEADrec (a), PEADrec+0,5%FFA (b) e PEADrec+1%FFA (c).

**Figura 24** - PEADrec (a); PEADrec+0,5%FFA (b) e PEADrec+1%FFA (c)

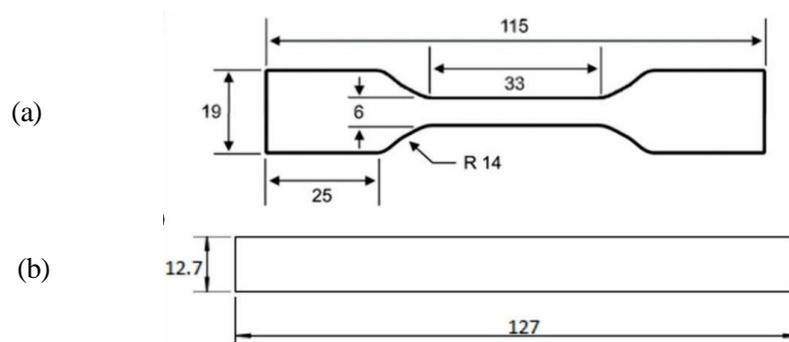


**Fonte:** autora, 2022.

#### 4.2.4. Moldagem dos corpos de prova para os ensaios de tração e flexão

Os corpos de prova foram confeccionados segundo as normas ASTM D638-14 (2014) para o ensaio de tração (Figura 25a) e ASTM D790-16 (2016) (Figura 25b) para o ensaio de flexão, utilizando uma prensa hidráulica modelo MA098/ A, da marca Marconi, no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAMPOL) do DEMAT da UFPB.

**Figura 25** - Corpos de prova para ensaio de tração (a) e flexão (b)



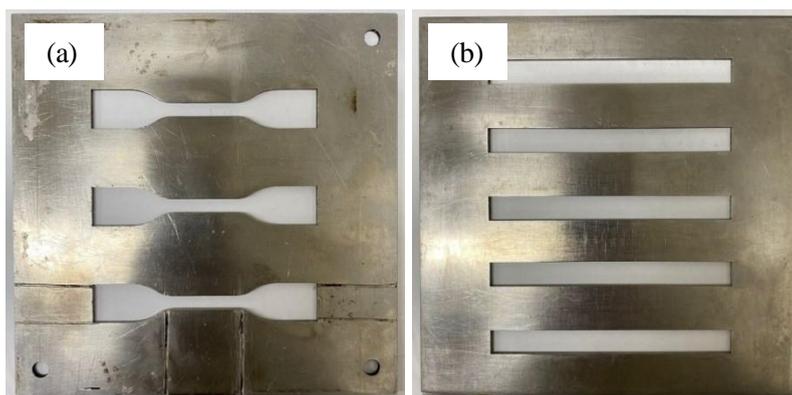
**Fonte:** Lima *et al.*, 2021.

Foram utilizados os seguintes parâmetros para prensagem dos corpos de prova: temperatura de 210°C, pré-prensagem por 2 min e prensagem de 10 ton por 6 min. Primeiramente, o PEADrec e as suas devidas composições contendo a fibra, foram secos à 100°C ± 5°C por 6h, usando uma estufa com circulação e renovação de ar. Em seguida, o

material foi depositado nas cavidades do molde e submetido à prensagem. Logo após a moldagem, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura ambiente por um período de 1 min, seguida de desmoldagem.

Na Figura 26, pode-se observar os moldes utilizados para a confecção dos corpos de prova de tração e flexão, respectivamente.

**Figura 26** - Molde para corpos de prova tração (a) e para flexão (b)

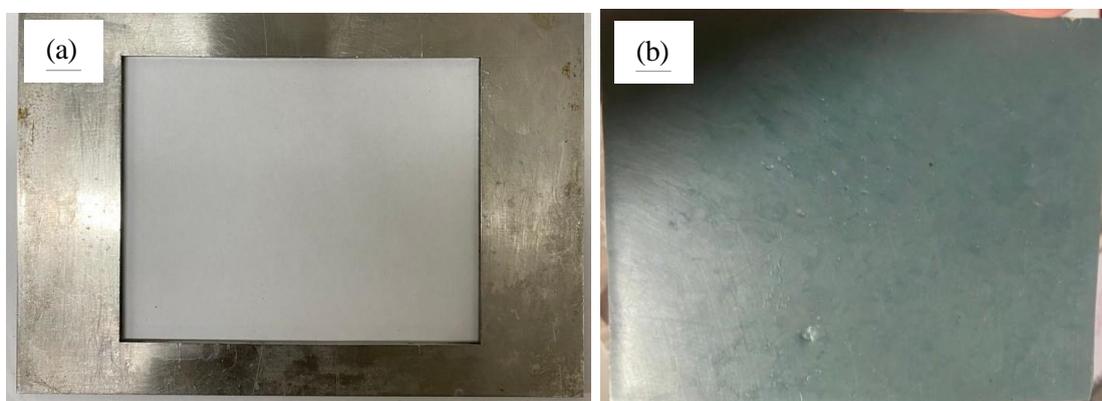


Fonte: Autora, 2023.

#### 4.2.5. Moldagem das placas para obtenção do Cobogó protótipo

Placas no formato retangular (9,6 x 12,1 cm) também foram preparadas por moldagem por compressão (Figura 27 a e b), usando os mesmos parâmetros descritos no Item 4.2.4., para serem usadas na elaboração do Cobogó protótipo. Todo o material antes de ser prensado foi submetido à secagem, usando as mesmas condições reportadas no Item 4.2.3.

**Figura 27** – Molde e placa prensada

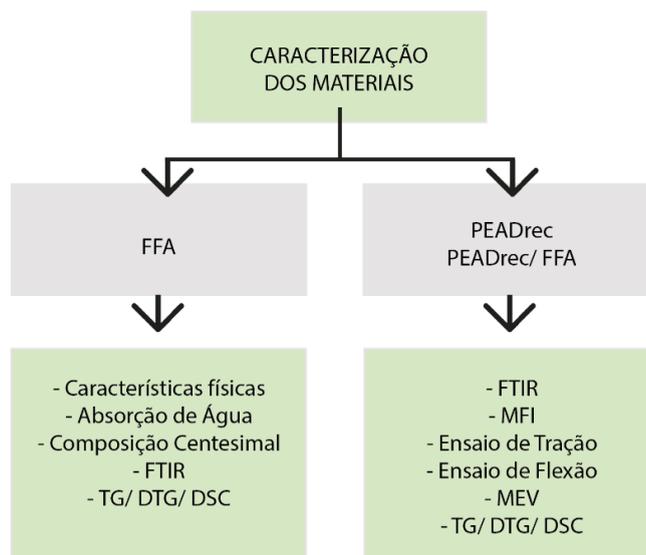


Fonte: Autora, 2023.

### 4.3. Caracterizações

Aqui está exibida de forma geral, um fluxograma (Figura 28) contendo as caracterizações realizadas nos materiais em estudo.

**Figura 28** - Fluxograma das caracterizações realizadas nessa pesquisa



**Fonte:** Autora, 2023.

#### 4.3.1. Diâmetro e comprimento das FFA's (características físicas)

Para a determinação do diâmetro das fibras foi utilizado um Microscópio Ótico Olympus, Modelo BX41M-LED, Software *AnalySIS Imager* Versão 5.1, utilizando aumentos de 5x e 10x, sendo realizadas sete medições ao longo do comprimento das fibras, totalizando 49 medições. Foi calculada uma média aritmética dos diâmetros das fibras aferidas, considerando as médias de todas elas.

Para a determinação do comprimento das fibras inteiras, após o processo de desfibramento mecânico, empregou-se uma trena de precisão de 1,00 mm. Foram selecionadas vinte fibras aleatórias e seus comprimentos foram medidos individualmente, para posteriormente calcular a média desses valores.

### 4.3.2. Ensaio de absorção de água das FFA's

Primeiramente, as fibras *in natura* com massa de aproximadamente 1g, foram secas em estufa de circulação e renovação de ar (Marca SP Labor, Modelo SP-102/40) a temperatura de  $100\pm 5^{\circ}\text{C}$  por 6 h. Logo após, as fibras foram pesadas na balança eletrônica de precisão de 0,1 gramas (ou 0,01% da capacidade máxima da balança) da marca SHIMADZ, modelo UX6200H.

Em seguida, para o ensaio de absorção de água, as fibras foram imersas em 500mL de água destilada (Figura 29) por diferentes tempos de 2h, 6h e 24h. Atingido o tempo, as amostras foram retiradas da água e através de um papel absorvente foi retirado o excesso de água para, então, ser efetuada as medidas de pesagem. As medidas foram feitas em triplicata.

A absorção de água (A) foi calculada a partir da Equação 1.

#### Equação 1

$$A = \frac{P_{ut} - P_e}{P_e} \times 100$$

Onde,

$P_{ut}$  é o peso da FFA úmida (g) e  $P_e$  é o peso da FFA seca (g), em estufa.

**Figura 29** – Ilustração do ensaio de absorção de água das fibras FFA.



### 4.3.3. Composição centesimal das FFA's

A composição centesimal de um material é realizada para a obtenção da porcentagem da composição química aproximada. Determinando as proporções dos constituintes,

informações nutricionais e valores sobre compostos, a exemplo de proteínas, minerais e fibras da substância. Os constituintes determinados nessa pesquisa a partir das FFA's foram teor de umidade, teor de cinzas, extrativos totais, lignina insolúvel, lignina solúvel e holocelulose. (OHSE, *et al.*, 2009).

#### 4.3.3.1. Determinação do teor de umidade

A determinação do teor de umidade das fibras se deu a partir da norma ASTM D1413 (2007). Inicialmente, amostras de FFA's "*in natura*" com peso de aproximadamente 5,0g, foi submetido à secagem numa estufa de Secagem e Esterelização, da marca FANEM, modelo 315 SE a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , por um período de 24h. Em seguida, as amostras foram transferidas para um dessecador, ficando em repouso por 30 min antes de ser pesado. Em seguida, o peso das amostras foi aferido numa balança eletrônica de precisão de 0,1 gramas (ou 0,01% da capacidade máxima da balança) da marca SHIMADZ, modelo UX6200H.

O teor de umidade (TU%) foi calculado de acordo com a Equação 2, descrita abaixo.

#### Equação 2

$$TU\% = \frac{[(m1 - m2)]}{m1} \times 100$$

Onde,

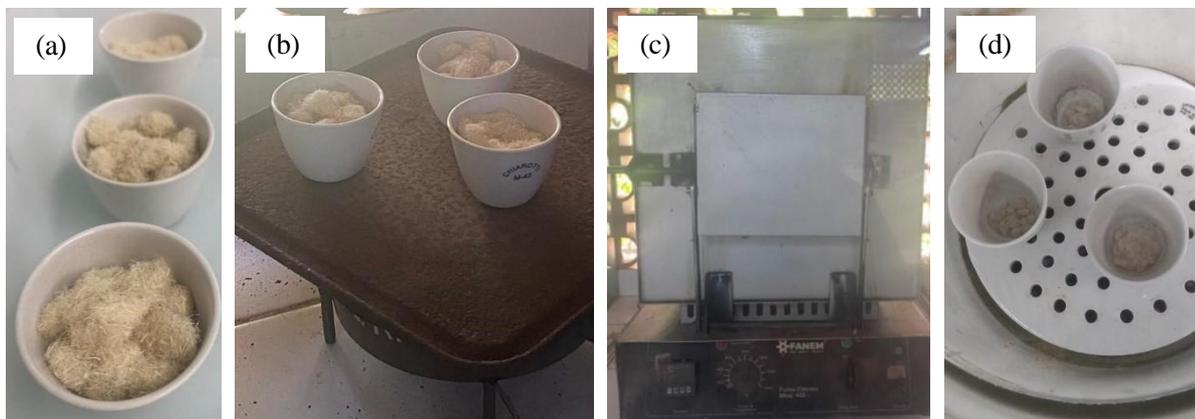
$m_1$  é a massa inicial da amostra das fibras (g) e  $m_2$  é a massa das fibras secas (g).

#### 4.3.3.2. Determinação do teor de cinzas

Inicialmente, uma massa de 3g das FFA's foi colocada em um cadinho de porcelana (Figura 30 a). Foi anotado o peso do cadinho vazio e o peso da amostra após a tara. Primeiramente, a amostra foi incinerada aos poucos em uma chapa aquecida, até que toda a fumaça que estava saindo do material finalizasse (Figura 30 b). Em seguida, os cadinhos foram transferidos para a mufla (forno elétrico modelo 412, da marca Fanen) a  $550^\circ\text{C}$ , ficando o tempo necessário para a perda da matéria orgânica, chegando ao ponto de obter as cinzas (Figura 30 c). Ao término desse processo, a amostra nos cadinhos foram retirados da mufla e resfriados até

a temperatura ambiente, para então, serem submetidos a nova pesagem (Figura 30 d). Essa medida foi realizada em triplicata.

**Figura 30** – Amostra de FFA nos cadinhos (a), cadinhos na chapa aquecida (b), Forno elétrico - muffle (c) e cinzas (d)



Fonte: autora, 2023.

O teor de cinzas (TC%) foi calculado de acordo com a Equação 3.

**Equação 3**

$$TC\% = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

Onde,

$m_1$  é a massa inicial da amostra das fibras (g) e  $m_2$  é a massa das fibras secas (g).

O teor de umidade e de cinzas, acima descritos, constituem uma porção da análise centesimal. Complementando, foram realizadas as análises de extrativos totais, lignina solúvel e holocelulose, descritos abaixo.

#### 4.3.3.3. Extrativos totais

A determinação dos extrativos totais foi realizada com base na norma ASTM E1721-09. Através da extração por *Soxhlet*, da marca Solab, modelo SL 202 (Figura 31), contendo solução extratora da mistura entre etanol e ciclohexano, com a proporção de 1:1. Em seguida, uma massa aproximada de 4,18 g de FFA foi transferida para um papel filtro. Após a remoção

dos extrativos totais do material, os cartuchos foram submetidos à secagem por 18 h a 100°C.

Ajustou-se o número de refluxos para um total de 20 em 5h de extração. Decorrido esse tempo, o cartucho foi transferido e levado à estufa por meia hora a 100°C. A massa que corresponde ao cartucho foi pesada para a determinação da quantidade de extrativos liberados. Após essa análise, o conteúdo de FFA extraída foi utilizado nas análises seguintes. A análise foi realizada em duplicata.

**Figura 31** - Aparelhagem de extração



Fonte: autora, 2023.

Após a secagem, procedeu-se à mensuração do peso do papel contendo o material isento de extrativos para a determinação da porcentagem do constituinte (TE%) da FFA. Para calcular esse valor, utilizou-se a Equação 4 abaixo:

**Equação 4**

$$TE\% = \frac{(m_{re} - m_{rrs})}{m_a} \times 100$$

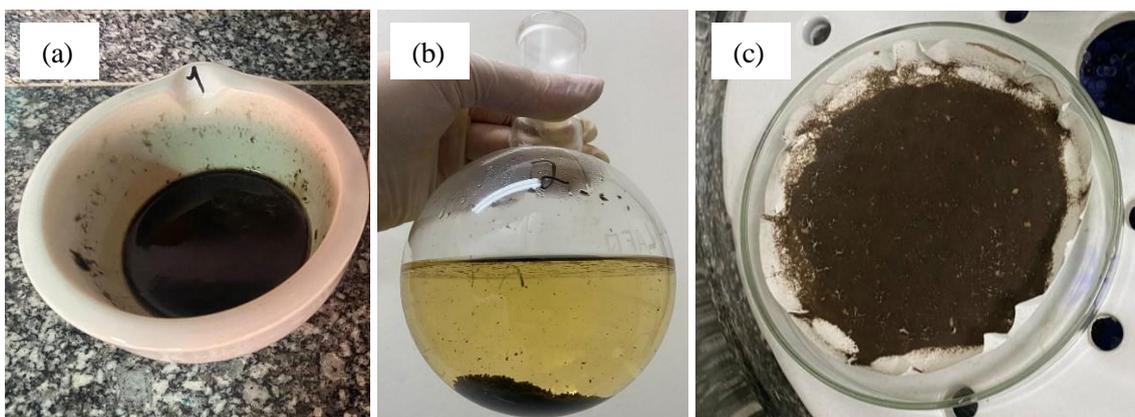
Onde,

$m_{re}$  = massa do papel filtro + amostra com extrativo (g);  $m_{rrs}$  = massa do papel filtro + amostra sem extrativo (g);  $m_a$  = massa da amostra inicial (g).

#### 4.3.3.4. Lignina insolúvel

Para determinar a lignina insolúvel, conforme a norma TAPPI T13m-54 (1991), utilizou-se aproximadamente 1g de FFA seca e sem extrativos, transferindo para um almofariz. Adicionou-se 17 mL de solução de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) com a concentração de 72%, fazendo a maceração e agitação vigorosa em cadinho de cerâmica durante 10 minutos, com o auxílio de um pistilo (Figura 32). O recipiente foi colocado em repouso por 24 h. Após o tempo de digestão, adicionou-se 300 mL de água destilada a mistura, para diluir o ácido a 4% e o conteúdo foi transferido para um balão volumétrico, acoplado ao sistema de refluxo. Sendo mantido o refluxo por 4 horas contadas a partir do ponto de fervura. Após, iniciou-se a filtração composta por kitassato, funil de porcelana e filtro de papel, transferindo o conteúdo do balão para o funil. Sendo constantemente lavado com água destilada até atingir o pH próximo ao da água que estava sendo utilizada. Na metade do processo, recolheu-se uma amostra do filtrado para a determinação da lignina solúvel. O papel de filtro com a amostra lavada foi apoiada em placa Petri e levado à estufa por meia hora a 105°C. A massa da amostra presente no papel de filtro foi pesada para determinar o quanto de lignina insolúvel foi liberada. A análise foi realizada em duplicata.

**Figura 32** – a) FFA macerada com ácido sulfúrico; b) Balão com água e a lignina insolúvel; c) Papel filtro com lignina insolúvel seca.



Para a determinação do teor de lignina insolúvel (TL), usou-se a Equação 5 abaixo:

**Equação 5**

$$TL\% = \frac{(mfl - mf)}{ma} \times 100$$

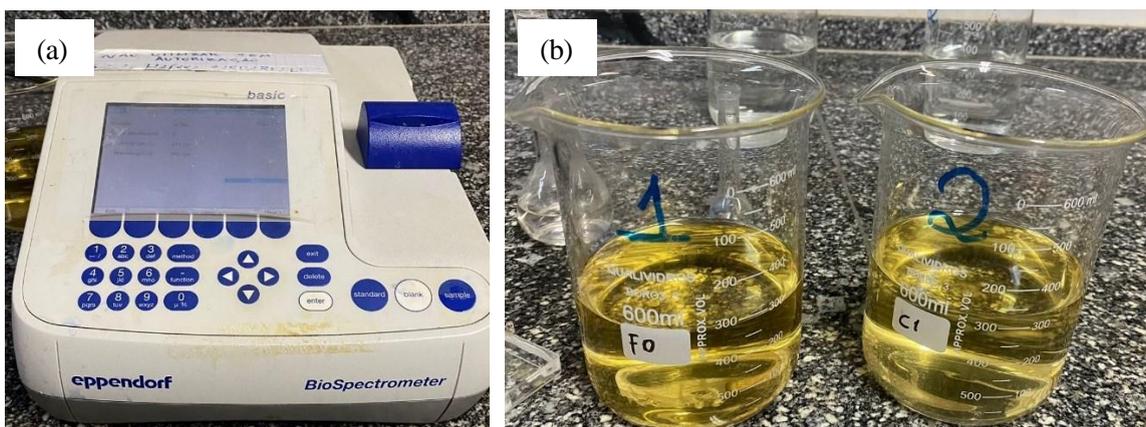
Onde,

$m_f$  = massa do papel filtro (g);  $m_{fl}$  = massa do papel com lignina (g);  $m_a$  = massa inicial da amostra (g).

#### 4.3.3.5. Lignina solúvel

Para a determinação da lignina solúvel, utilizou-se o método desenvolvido por Goldschimid (1971), em que realiza-se uma varredura da absorbância de 280 nm a 215 nm. Utilizando um bioespectrômetro da marca Eppendorf (Figura 33). Caso necessário, a amostra deve ser diluída em ácido sulfúrico a 4% até que a absorbância indique ser inferior a 1,0. No caso dessa dissertação fez-se necessária a diluição.

**Figura 33** - a) Bioespectrômetro; b) Lignina solúvel



A partir dos valores obtidos, empregou-se a Equação 6 para determinação da concentração de lignina solúvel (CLS).

**Equação 6**

$$CLS \left( \frac{g}{L} \right) = \frac{4,53 \times A_{215} \times A_{280}}{300}$$

Onde,

$A_{215}$  = absorbância obtida no comprimento de onda de 215 nm;  $A_{280}$  = absorbância obtida no

comprimento de onda de 280 nm.

#### 4.3.3.6. Holocelulose

Para a determinação do teor de holocelulose, utilizou-se os teores de extrativos totais, de lignina insolúvel e de lignina solúvel, de acordo com a Equação 7 (Santos, 2008; Guimarães *et al.* 2013).

#### Equação 7

$$\text{TH\%} = 100 - (\text{TE} + \text{TL} + \text{CLS})$$

Onde,

TH = Teor de holocelulose (%); TE = Extrativos totais (%); TL = Lignina insolúvel (%); CLS = Lignina solúvel (%).

#### 4.3.4. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier - FTIR

O ensaio de FTIR foi realizado em um equipamento da marca Shimadzu, modelo IR Tracer 100, no Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LabFilm) da UFPB. Os espectros foram obtidos utilizando acessório de integração da faixa do ATR (*Attenuated Total Reflection*) no MID (médio), com análise da faixa espectral de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$ .

Esse ensaio foi realizado à temperatura ambiente, usando amostras de FFA, PEADrec e PEADrec/FFA. Essas últimas foram analisadas em corpos de prova de impacto moldadas por compressão.

#### 4.3.5. Medida do índice de fluidez – MFI

Para a realização do teste de MFI, foi utilizado um equipamento da marca Ceast, modelo Melt Flow - Modular Line (Figura 34), seguindo as normas ASTM D-1238, ISO 1113 e NBR 9023. Os parâmetros utilizados foram: pré-aquecimento do equipamento a 190 °C por 30 min, carga de 2,16kg, tempo de corte de 10 min para o PEADvirgem e 5 min para as demais composições.

O cálculo do MFI em g/10min foi realizado conforme a Equação 8:

**Equação 8**

$$\text{MFI} \left( \frac{\text{g}}{\text{min}} \right) = \frac{[\text{massa}(\text{g}) \times 10]}{\text{tempo de corte} (\text{min})}$$

E o cálculo do erro (%) foi determinado de acordo com a Equação 9.

**Equação 9**

$$\text{ERRO} (\%) = \left[ \frac{\text{maior medida do MFI} - \text{menor medida do MFI}}{\text{menor medida do MFI}} \right] \times 100$$

**Figura 1-** Equipamento Plastômetro usado nas medidas de MFI



**Fonte:** autora, 2022.

#### 4.3.6. Ensaio de tração

O ensaio de tração foi executado em uma máquina universal MWG de 10KN da Shimadzu (Figura 35), conforme a norma ASTM D638-14 (2014), no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) da UFPB. Os parâmetros utilizados foram: célula de carga de 20 Kgf, velocidade de deslocamento do travessão de 50 mm/min e corpos de prova do tipo gravata moldados por compressão (Item 4.2.4). Esse ensaio foi realizado à temperatura ambiente, usando um total de 12 corpos de prova para cada composição – PEADrec, PEADrec+0,5%FFA e PEADrec+1%FFA. Por fim, as propriedades de resistência à tração (MPa), módulo de Young

(MPa) e deformação (%) foram extraídas para para discussão.

**Figura 35** - Equipamento usado no ensaio de tração

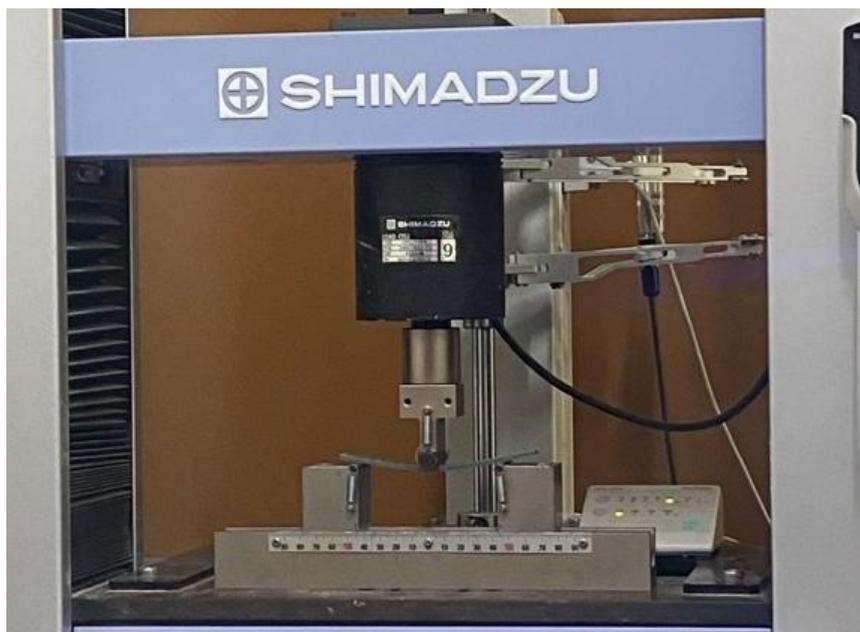


**Fonte:** autora, 2023.

#### **4.3.7. Ensaio de flexão**

O ensaio de flexão de três pontos foi executado em uma máquina universal MWG de 10KN da Shimadzu (Figura 36), conforme a norma ASTM D790-16 (2016), no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) da UFPB. Os parâmetros utilizados foram: célula de carga de 20 Kgf, velocidade de deslocamento do travessão de 2,0 mm/min, distância entre os apoios de 80 mm e corpo de prova de seção retangular moldados por compressão (Item 4.2.4). Esse ensaio foi realizado à temperatura ambiente, usando um total de 12 corpos de prova para cada composição – PEADrec, PEADrec+0,5%FFA e PEADrec+1%FFA, visando avaliar a resistência à flexão (N/mm<sup>2</sup>) e deformação (%) das composições.

**Figura 36** – Equipamento usado no ensaio de flexão



**Fonte:** autora, 2023.

#### **4.3.8. Microscopia eletrônica de varredura – MEV**

Para a obtenção das micrografias, as amostras foram fraturadas em nitrogênio líquido e, em seguida, metalizadas através da deposição de uma fina camada de ouro no equipamento *Sputter Coater* (EMITECH, modelo K550X) e analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (FEI, modelo QUANTA 450). As imagens das superfícies fraturadas foram geradas através de um detector de elétrons secundários, usando uma tensão de aceleração de 10 kV, corrente de 1,0 nA e distância de trabalho 6,4 mm. As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais do IDEP da UFPB.

#### **4.3.9. Análise térmica - Análise termogravimétrica (TG/DTG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

As análises térmicas simultâneas de TG/DTG/DSC foram realizadas no equipamento da marca *TA Instruments*, modelo SDT 650, usando uma massa entre 7 a 14 mg de amostra de FFA e das composições PEADrec/FFA, panela do tipo alumina de 90ul e atmosfera de gás sintético. As amostras foram analisadas entre a temperatura ambiente de 25 até 720°C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Essa análise foi realizada no LabFilm/CEAR da UFPB.

O grau de cristalinidade ( $X_c$ ) das amostras foi calculado no primeiro aquecimento de

acordo com a Equação 10.

### Equação 10

$$X_c (\%) = \left[ \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{PEAD\ PURO}} \right] \times 100$$

Onde:

$\Delta H_m$  – variação de entalpia da amostra (J/g);

$\Delta H_{PEAD\ PURO}$  – variação de entalpia do PEAD 100% cristalino, utilizando o valor de 290 J/g (PALANIYANDI E SIMONSEN, 2007).

#### 4.4. Criação do protótipo – Cobogó

A concepção do módulo ou bloco de cobogó teve como inspiração a nervuração das folhas, que exibem uma variedade de padrões, cores, texturas, aromas e morfologias. De acordo com Almeida e Almeida (2018), a estrutura das folhas é composta por bainha, pecíolo e limbo. O limbo, que é a parte principal da folha, é constituído por feixes vasculares ou nervuras, responsáveis pela distribuição de água, nutrientes, sustentação, resistência e flexibilidade das folhas. Abaixo dois exemplos de limbos com suas nervuras principais e secundárias (Figura 37):

**Figura 37** - limbo com nervuras



Fonte: Franco, 2011.

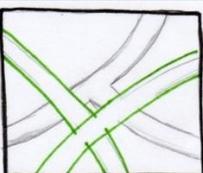
Após um estudo visual e tátil de exemplares foliares similares a estes apresentados, foi empreendida uma análise do *design* orgânico para a composição do cobogó. O objetivo era criar um módulo que permitisse diferentes arranjos e posições, em consonância com a inspiração na

arquitetura das nervuras de uma folha vegetal.

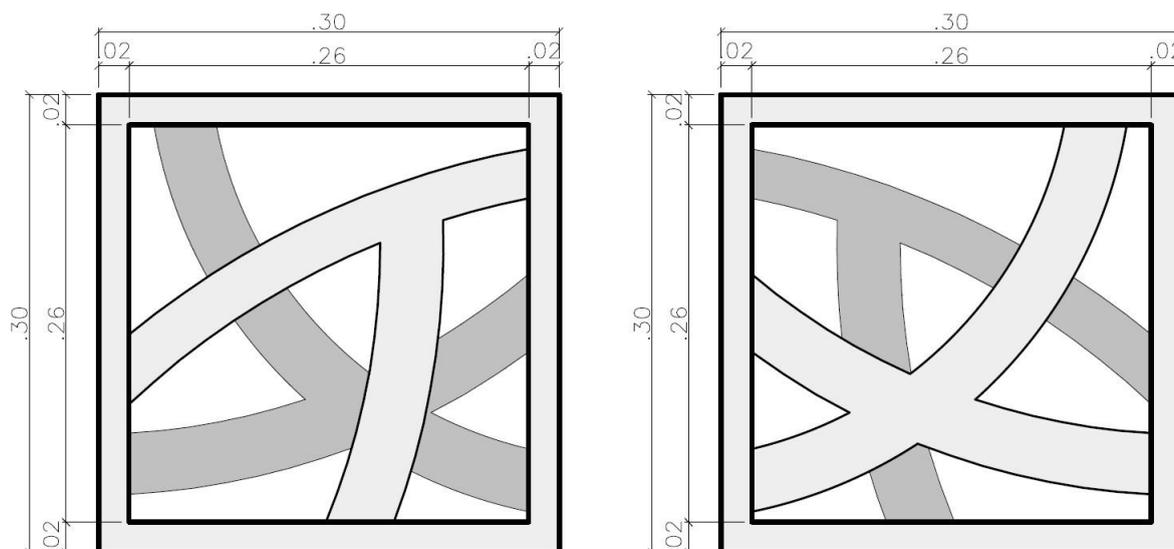
O módulo desenvolvido permite oito formas distintas de arranjo, possuindo duas frentes diferentes. As dimensões escolhidas para o cobogó foram de 30cm x 30cm x 10cm, com uma borda externa de 2cm.

Foram elaborados cinco croquis (Tabela 6) que serviram de base para a escolha do módulo final. Esses croquis apresentavam linhas inspiradas nas nervuras foliares, considerando frente, verso e sua sobreposição no módulo final. A opção número 5 foi selecionada por melhor refletir os padrões orgânicos. A arte final foi então elaborada no software *Adobe Illustrator*, versão CC, para uma melhor visualização e entendimento do modelo. Em seguida, foram feitas as elevações das duas frentes no software *AutoCAD 2018* (Figura 38).

**Tabela 6** - croquis dos cobogós

CROQUI	FRENTE 1	FRENTE 2
1°		
2°		
3°		
4°		
5°		

Fonte: Autora, 2019.

**Figura 38** - Desenho do protótipo

**Fonte:** Autora, 2019.

Para o estudo volumétrico, foram utilizadas as linhas curvilíneas. O software utilizado nesse estudo foi *SketchUp 2020* e o renderizador *Vray 3.0*.

Após o estudo volumétrico das frentes do cobogó, foi possível verificar se a espessura das bordas escolhidas era adequada para a finalidade proposta e se o desenho elaborado correspondia às expectativas pretendidas. Com base nisso, foi possível a fabricação do protótipo físico, utilizando placas prensadas em um molde retangular medindo 9,8 cm x 12,2 cm (conforme Item 4.2.5.).

A escala adotada para a miniaturização do protótipo foi de 1:4 (cm), sem perda da correlação dos dados do objeto de pesquisa. Sendo utilizadas as estratégias de redução de escala adotadas por Moreira (2007) e Lacerda (2017).

Após a confecção das placas, foram submetidas a cortes em Controle Numérico Computadorizado (CNC), no equipamento *Router CNC*, da marca *AXYZ Millenium*, no FABLAB do Centro Universitário de João Pessoa, utilizando os seguintes parâmetros de corte: fresa de 3mm com topo reto e 2 cortes paralelos, avanço de 15 mm por segundo e rotação de 10.000 rpm.

Na Figura 39, observa-se o cobogó protótipo, utilizado como referência para essa dissertação, após o desenvolvimento das formas iniciais esboçadas nos croquis.

**Figura 39:** Protótipo referência do cobogó



**Fonte:** Autora, 2019

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, visando uma melhor adesão das FFA's com a matriz polimérica de PEADrec, devido à diferença de natureza química entre ambos os constituintes, foi realizado o tratamento com o hidróxido de sódio (NaOH) (Item 4.2.1). Entretanto, o resultado obtido foi insatisfatório, tendo em vista que o tratamento levou à uma maior aglomeração das fibras, impedindo que ambos os materiais (PEADrec+FFA) se misturassem na etapa de pré-mistura manual, antes do processamento na extrusora. Por essa razão, o presente trabalho usou apenas a FFA sem tratamento, *in natura*, conseguindo com êxito realizar a mistura à frio com o PEADrec, seguida de moldagem por extrusão, usando concentrações de 0,5 e 1,0% (m/m) de FFA. Tais resultados estão reportados ao longo dessa Dissertação.

### 5.2. Caracterização das FFA's

#### 5.2.1. Diâmetro, comprimento e absorção de água – características físicas

A seguir são apresentadas as características físicas e de absorção de água das FFA's na Tabela 7.

**Tabela 7** - Características físicas e de absorção de água das FFA's *in natura*.

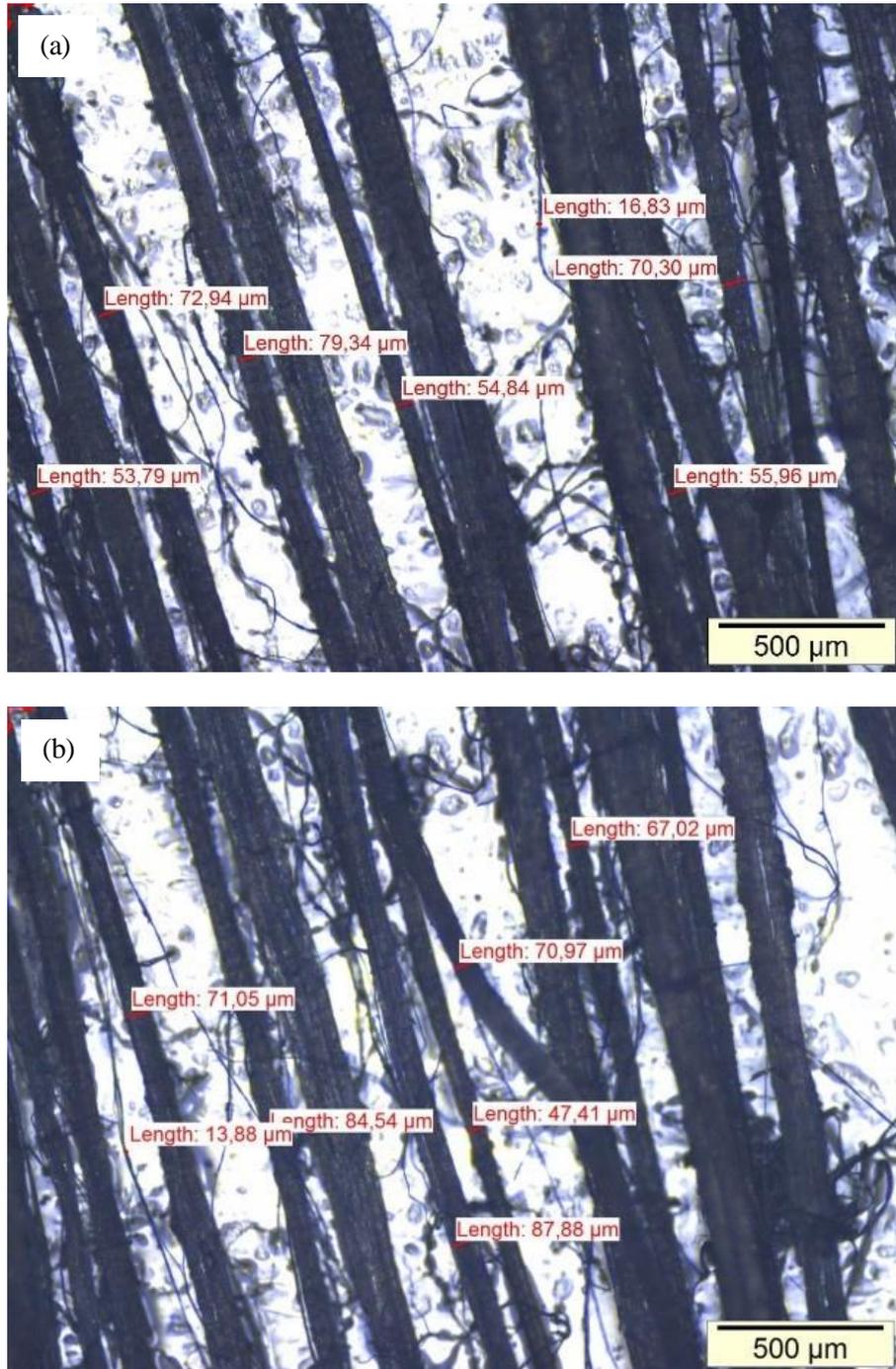
Amostra	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento (cm)	Absorção de água (%)
FFA1	-	-	2h – $113,87 \pm 0,20$
-----	-----	-----	6h – $110,86 \pm 0,15$
FFA20	-	-	24h – $116,67 \pm 0,32$
Média $\pm$ Desvio padrão	$63,55 \pm 21,54$	$95,6 \pm 12,33$	

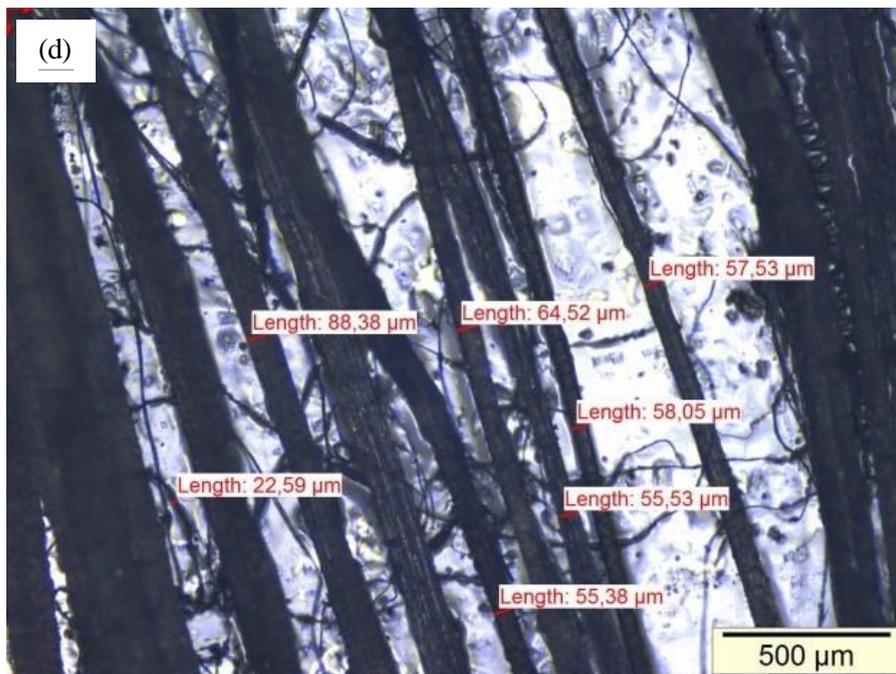
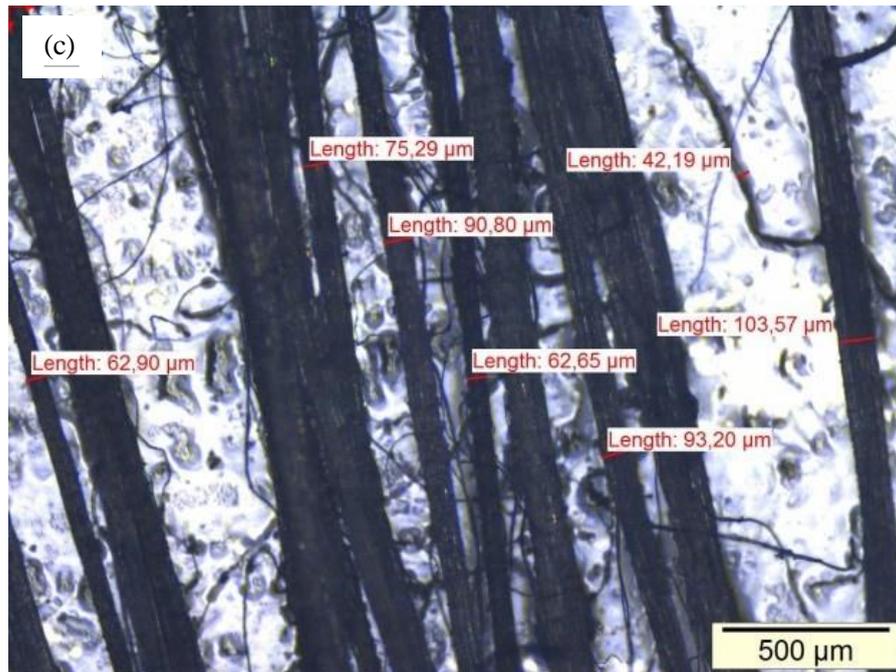
\*Foram usadas 20 amostras de fibras para determinação do diâmetro médio e comprimento.

**Fonte:** Autora, 2023

As FFA's (*Ananas comosus*) *in natura* usadas nesse trabalho são do tipo abacaxi pérola. Nas Figuras 40 (a), (b), (c) e (d) é possível observar as irregularidades de diâmetros, algumas mais espessas e outras mais delgadas, assim como é possível observar tais diferenças mesmo sem utilizar o microscópio, a olho nu. O valor mínimo de diâmetro encontrado nas amostras de fibras foi de  $13,88 \mu\text{m}$  e o máximo de  $103,57 \mu\text{m}$ , conforme é possível observar nas Figuras citadas, possuindo diâmetro médio de  $63,55 \pm 21,54 \mu\text{m}$  (Tabela 7).

**Figura 40** – Imagens dos diâmetros das fibras FFA's obtidas por microscopia ótica





Fonte: Autora, 2023

Quanto à determinação do comprimento das FFA's longas (inteiras), após o desfibramento mecânico e processo de cardagem, apresentaram um valor médio de  $95,6 \pm 12,33$  cm (Tabela 7).

De acordo com a pesquisa desenvolvida por Mukherjee e Satyanarayana (1986), que caracterizaram as propriedades físicas da FFA, dentre elas, o comprimento médio que foi de 50 a 120 cm. Tal resultado é coerente com o comprimento encontrado para as FFA's do tipo pérola, utilizada nessa pesquisa. Essas fibras foram posteriormente cortadas, com aproximadamente 2

mm de comprimento para serem usadas nas composições PEADrec/FFA. Estudos conduzidos por Aji *et al.* (2011), verificaram que quanto menor o corte da fibra mais facilmente será a interação com a matriz de PEAD, em comparação com as fibras mais longas. O melhor tamanho de corte da FFA verificada na supracitada pesquisa foi de 0,25 mm de comprimento.

Quanto a determinação de absorção de água, a medida que foi acrescida a quantidade de horas, houve o aumento significativo do peso da amostra, aproximadamente dobrando o valor do peso quando comparado ao valor das fibras secas. Isso ocorreu pois as FFA's ficaram túgidas, ocorrendo o enchimento das fibras. A estrutura porosa existente nas fibras vegetais, inclusive na FFA, é a pré-condição para que ocorra considerável absorção de umidade e permeabilidade (HE *et al.*, 2012). Esses foram os dados observados após as 2, 6 e 24h de imersão: em 2h - 113,87%; em 6h - 110,86%; 24h - 116,67% (Tabela 7). Essa porcentagem de absorção revela dados com pequenas diferenças entre elas. Segundo Negrão (2018), o ponto de saturação da FFA *in natura* foi determinado quando o peso da amostra atingiu um valor constante após o quarto dia. Revelando que a maior quantidade de fibras nos compósitos/ misturas, maior será a predisposição de absorção de água.

### 5.2.2. Composição centesimal

A seguir são apresentados os resultados obtidos da composição centesimal da FFA *in natura* na Tabela 8.

**Tabela 8** - Composição centesimal da FFA

Amostra	Umidade (%)	Cinzas (%)	Extrativos totais (%)	Lignina insolúvel (%)	Lignina solúvel (g/L)	Holocelulose (%)
FFA1	8,56	0,47	1,18	11,65	0,11	87,06
FFA2	8,62	0,53	1,21	10,05	0,07	88,67
FFA3	8,82	0,63	-	-	-	-
Média ± Desvio padrão	8,66±0,14	0,54±0,08	1,19±0,015	10,85±0,8	0,09±0,02	87,86±0,80

**Fonte:** Autora, 2023.

Em se tratando de elementos arquitetônicos não estruturais, cuja composição final inclui fibras vegetais, como é o caso dos cobogós, objeto de estudo dessa dissertação, o teor de umidade presente nas fibras é considerado um importante indicador da qualidade do produto. Esse teor pode influenciar na resistência mecânica desses materiais.

De acordo com a Tabela 8, foi encontrado um teor médio de umidade para a FFA de 8,66%. Esse resultado indica que o teor de umidade está em conformidade com a literatura. Alexandre (2004) evidencia uma pequena variação nos valores das fibras analisadas (10,57%).

Estudos recentes sobre fibras vegetais corroboram os resultados encontrados nesse estudo e, aponta que a maior concentração de FFA incorporada no polímero, pode conduzir a um maior teor de umidade na mistura resultante. Esse comportamento pode estar relacionado à natureza hidrofílica das fibras vegetais que influencia no teor de umidade, assim como nas características finais do produto quando usadas como agente de reforço (SGRICCIA, 2008; CORREIA, 2011).

Entretanto, mesmo aumentando o teor de umidade na proporção que aumenta o teor de fibra, a literatura supracitada evidencia que a FFA usada como reforço na matriz polimérica, traz resultados positivos nas propriedades analisadas. Sugere-se que para a utilização de elemento para o ambiente construído, obtenha resultados favoráveis, que não afetarão na durabilidade e função do cobogó.

Quanto ao teor de cinzas, a média foi de 0,54% (Tabela 8). Pode-se afirmar que os valores encontrados para os teores de cinzas, estão abaixo dos valores encontrados na literatura. No estudo de Nadirah *et al.* (2011), obtiveram o teor de 4,73%, descrevendo que o teor de cinzas superiores a 2% não são adequados como materiais de suplemento de celulose, pois podem contribuir de maneira desvantajosas nas propriedades de resistência mecânica dos produtos finais. Esse teor serve como parâmetro de qualidade; é uma medida da quantidade de resíduo inorgânico restante da combustão, indicando pureza e qualidade da fibra. Adicionalmente, o estudo desenvolvido por Sein *et al.* (2020), encontraram valores de 0,53%, compatíveis com o teor de cinzas encontrados nessa dissertação.

Os extrativos totais, são componentes que não compõem a estrutura química da parede celular, englobando uma vasta gama de compostos segundo Barrichelo e Brito (1985). E esses compostos influenciam negativamente no rendimento de produtos e materiais, isso porque a maioria dos extrativos tem impacto ruim na polpação química e mecânica em consequência da formação de micróbios, segundo Nadirah *et al.* (2012). Nesse contexto, o baixo teor de extrativos totais é um resultado vantajoso, pois não interferirá na mistura com o PEADrec para a elaboração do módulo de cobogó.

A média percentual dos extrativos totais foi de 1,19% (Tabela 8), valor bem inferior aos encontrados por Satyanarayana *et al.* (2007), 2,5 a 4% e por Barboza *et al.* (2014), entre 4 e 9%, entretanto confirmando que o método adotado para a extração foi eficiente.

A lignina insolúvel é um dos componentes das fibras naturais que compõe as paredes celulares. Essas paredes diferem de acordo com a composição em razão entre celulose e

lignina/hemicelulose e quanto a orientação das microfibrilas de celulose, em que essas características influenciam nas propriedades mecânicas das fibras. Tanto a lignina quanto a pentosana contribuem para a resistência mecânica da fibra (MISHRA, 2014).

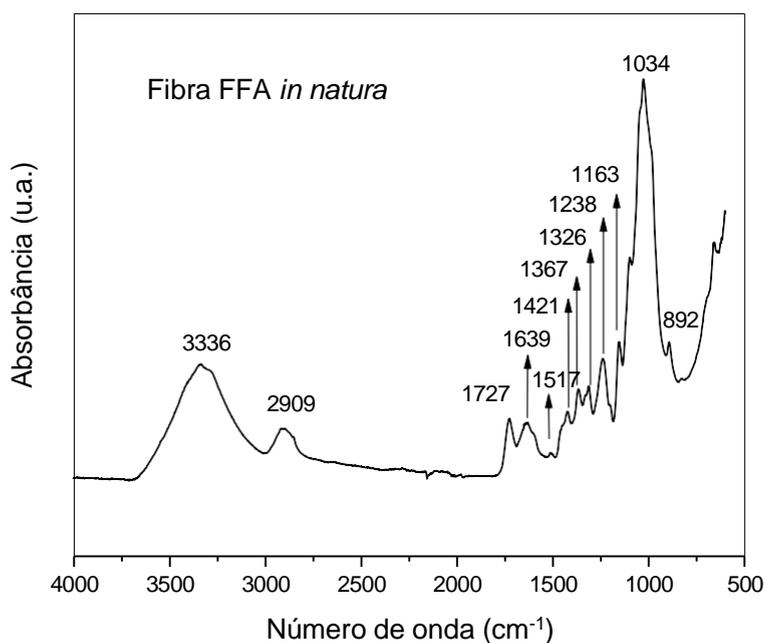
A média do teor de lignina insolúvel da FFA foi de  $10,85 \pm 0,8$  (Tabela 8), valor compatível com os encontrados nos estudos realizados por Mishra *et al.* (2004), cuja média de 5 a 12%. Estudos realizados por Moya *et al.* (2016), mostraram que a lignina presente nas FFA's apresentou valor superior (15,45%) ao encontrado no presente estudo. Por outro lado, Nadirah *et al.* (2012) em seus estudos, obtiveram um teor de lignina insolúvel da FFA de 10,41%, semelhante ao encontrado nesse estudo.

O teor de lignina solúvel variou de 0,07 a 0,11%, sendo inferior aos dados apresentados por Barboza *et al.* (2014), 0,5 a 1,6%.

O valor encontrado do teor de holocelulose, obtido pela diferença da massa inicial sem extrativos pelo valor da lignina, aponta média de 87,86% nessa pesquisa. Valores semelhantes foram encontrados nas pesquisas de Asim *et al.* (2015) – 80,68%, Moya *et al.* (2016) – 84,45%; Nadirah *et al.* (2012) – 80,68%. Sendo a holocelulose a combinação entre celulose e hemicelulose, um constituinte principal das fibras vegetais, com boa quantidade de celulose, com isso espera-se boa resistência da fibra, uma vez que essa é a responsável em suportar as tensões mecânicas (APRELINI, BOTARO E NOVACK, 2013).

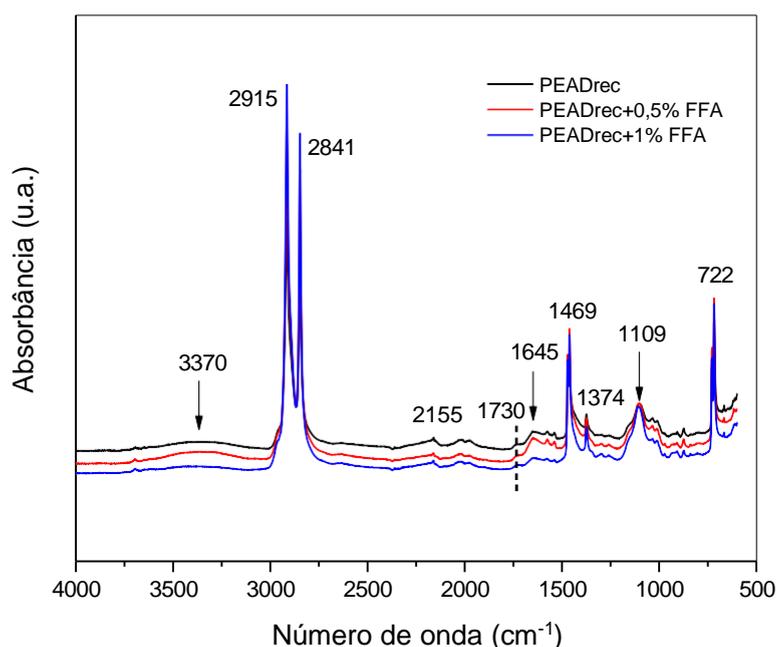
### **5.2.3. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)**

A espectroscopia de FTIR foi utilizada com o intuito de identificar os grupos funcionais presentes nos materiais em estudo Asim *et al.* (2015). Os espectros de FTIR estão exibidos nas Figura 41 e 42.

**Figura 41** – Espectro de FTIR da FFA *in natura*

A partir do espectro de FTIR da FFA (Figura 41), é possível identificar a presença de muitas bandas de absorção associadas às vibrações moleculares dos grupos funcionais característicos dos constituintes presentes na fibra do abacaxi. Dentre elas, pode-se observar a presença de uma banda de vibração característica do estiramento OH em  $3336\text{ cm}^{-1}$  (Grupos O-H, contendo umidade), localizada na região amorfa, que é comum à todas as fibras lignocelulósicas. Em  $2909\text{ cm}^{-1}$ , apresentando modo vibracional comum, aconteceu o alongamento C-H de cetona e carbonil, como um alongamento assimétrico. Na faixa das bandas entre  $1727 - 1517\text{ cm}^{-1}$  observou-se o estiramento C=C dos anéis aromáticos da lignina presentes na FFA. Na banda vibracional em  $1034$ , observa-se o alongamento CO-O do álcool cíclico. Resultados semelhantes foram reportados nas pesquisas de (FERREIRA *et al.*, 2014; HE *et al.*, 2012; MOUALLIF *et al.*, 2021; SEIN *et al.*, 2020).

**Figura 42** – Espectros de FTIR para o PEADrec e suas misturas PEADrec/FFA



A partir do espectro de FTIR para o PEADrec, observa-se aparecimento de grupos nas bandas  $722\text{ cm}^{-1}$ , que indica deformação em balanço e em aproximadamente  $3370\text{ cm}^{-1}$ , característico dos grupos OH, indicando a presença de umidade nas amostras. É possível observar o aparecimento de ramificação na banda  $1109\text{ cm}^{-1}$  e com a formação por oxidação de grupos cetona e éster em  $1645\text{ cm}^{-1}$ , semelhante ao estudo de (MOUALLIF *et al*, 2021). Em que é possível observar que há uma diminuição na banda de absorvância na amostra que contém 1% de FFA.

Outro ponto interessante a ser notado, é que ao ser adicionado FFA na matriz do PEADrec, não houve alteração nos modos vibracionais obtidos, indicando que os grupos funcionais do PEADrec se sobressaíram em relação aos grupos funcionais da fibra vegetal. As amostras PEADrec e suas composições, apresentaram bandas a  $2915$  e em  $2841\text{ cm}^{-1}$  semelhantes. Indicando o alongamento do grupo C-H, na primeira onda, de estiramento assimétrico e na segunda banda, estiramento simétrico, característico do polímero PEAD.

A banda de absorção encontrada a  $1730\text{ cm}^{-1}$  de acordo com Satyanarayana (2017) é comum dos estiramentos de C=O que novamente não houve diferença significativa entre as misturas analisadas. Também pode indicar aditivos nessa banda supracitada, sugere-se que seja referente a adição da FFA. E ainda de acordo com os espectros da Figura 42, as bandas de absorção a aproximadamente  $1645$  e  $1374\text{ cm}^{-1}$ , são características das vibrações das estruturas de C=C das cadeiras aromáticas e alifáticas, e do estiramento das ligações C-H, respectivamente (FERREIRA *et al.*, 2014).

Para tanto, observando o PEADrec e suas composições, nota-se que o PEADrec apresenta maior absorvância e é diminuída com o acréscimo de 0,5% e mais ainda com 1% de FFA. Além da comparação entre a FFA com as composições de PEADrec, é possível observar a prevalência da absorvância no PEAD, suprimindo a absorvância da FFA. Possivelmente ocasionada pela pequena proporção entre PEADrec e FFA.

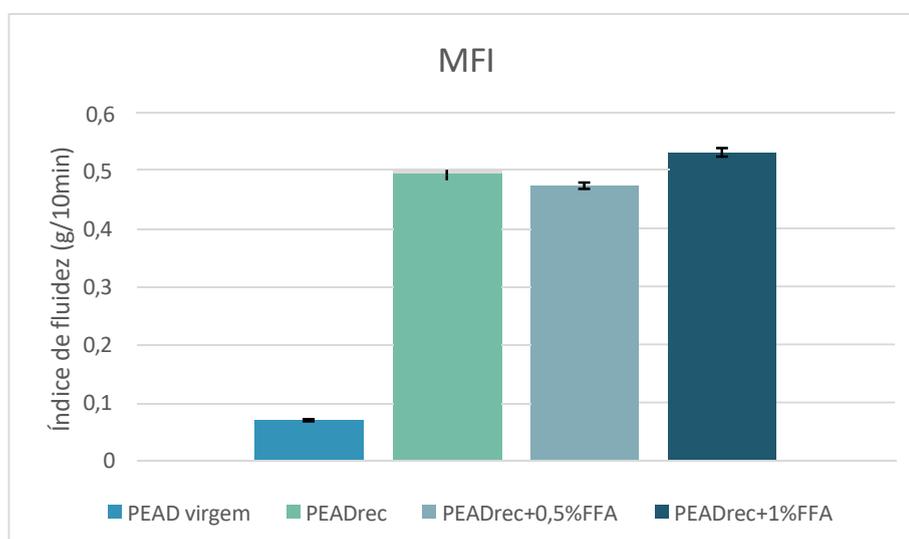
#### 5.2.4. Medida índice de fluidez (MFI)

O índice de fluidez (MFI) fornece uma descrição aproximada de acordo com o comportamento de processamento de polímero e o seu fluxo. É analisado através da quantidade de material que flui através de um orifício calibrado, durante um período de dez minutos, em condições de força e temperatura definidas (MOURAD, 2009; INDRAJATI, DEWI, NURHAJATI, 2020). A Tabela 9 apresenta os valores de MFI para o PEADrec e para as misturas PEADrec/FFA. O PEAD virgem foi usado como referência em relação ao PEADrec. Na Figura 43, observa-se o gráfico de MFI das amostras.

**Tabela 9** – Valores das medidas de índice de fluidez para o PEADrec e suas misturas PEADrec/FFA.

Amostra	MFI (g/10min)
PEAD virgem	0,0693 ± 0,0017
PEADrec	0,4947 ± 0,0092
PEADrec + 0,5% FFA	0,4740 ± 0,0053
PEADrec + 1,0% FFA	0,5317 ± 0,0075

**Figura 43** – Medidas de MFI das amostras.



O índice de fluidez (MFI) é influenciado pela distribuição molar do polímero. Em geral, observa-se que quanto menor a massa molar, maior será o MFI, caracterizando uma possível degradação do material em função da temperatura (SIREGAR *et al.*,2018).

O PEAD virgem apresentou MFI médio de 0,0693 e o PEADrec de 0,4947. Essa diferença observada nos valores de MFI, que resultou em um maior valor de índice de fluidez para o PEADrec pode ter sido ocasionada pelos ciclos de processamento e, conseqüentemente, ter sofrido perdas nas propriedades em função da degradação, tendo em vista, que o polímero em estudo é do tipo reciclado.

Observa-se nos valores de MFI, uma pequena diminuição para o PEADrec+0,5%FFA (0,4740), enquanto que para o PEADrec+1%FFA (0,5317), um pequeno aumento, em relação aos valores expostos para o PEADrec (Tabela 9). Indicando que a adição de FFA a 1% m/m favoreceu mais no processo de quebra de cadeias, ocorrendo maior aumento da mobilidade e interação dessas cadeias do PEAD com a fibra. Enquanto na amostra de 0,5% m/m, a incorporação da fibra não afetou de modo significativo no processo de degradação, mantendo as propriedades físico-químicas da massa molar e viscosidade. O aspecto do material após o escoamento na análise de MFI pode ser observado na Figura 44, demonstrando o que foi citado, a fluidez do PEAD virgem, PEADrec e das misturas com PEADrec/ FFA, respectivamente.

**Figura 44** - - Material após escoamento no MFI do PEADvirgem (a), PEAD rec (b), PEAD rec + 0,5%FFA (c) e PEAD rec + 1%FFA (d), respectivamente.



**Fonte:** Autora, 2023

De acordo com Canevarolo (2006) o MFI deve ser interpretado de maneira cautelosa, pois o método de análise está sujeito a diversas falhas. Primeiro, os valores são muito sensíveis a detalhes do procedimento de medida, especialmente para polímeros de baixo MFI.

Para Santos, Agnelli e Manrich (2020) o índice de fluidez tem muita importância, pois o processamento desses materiais poliméricos é feito com ciclos rápidos de injeção, logo se o índice de fluidez diminui muito, haverá um aumento da concentração de carga no polímero, sendo necessário o aumento da pressão de injeção para se obter um material sem defeitos de fabricação, o que tornaria o processo mais lento e perigoso. Neste sentido, o aumento do índice de fluidez do material com a adição de FFA pode ser considerado um aspecto positivo para o processamento de PEAD reciclado, facilitando a produção de uma mistura mais homogênea e consequentemente de melhor qualidade final.

### 5.2.5. Ensaios mecânicos

#### 5.2.5.1. Ensaio de tração

O ensaio de tração é realizado considerando carga ou força de tração, gradativamente crescente, necessária para romper um material por alongamento (CALLISTER JR., 2003). A Tabela 10 apresenta os resultados do ensaio de tração para PEADrec e para o PEADrec contendo 0,5% e 1% FFA, respectivamente. Na Figura 45 observam-se os corpos de prova de PEADrec+1%FFA após o ensaio de tração.

**Tabela 10:** Propriedades de tração do PEADrec, PEADrec + 0,5% FFA e PEADrec + 1% FFA.

Amostra	Resistência à Tração (MPa)	Módulo Elástico (MPa)	Deformação na Ruptura (%)
PEADrec	14,49 ± 1,40	693,79 ± 49,17	4,71 ± 1,11
PEADrec + 0,5%FFA	14,41 ± 1,78	706,66 ± 26,01	4,89 ± 1,70
PEADrec + 1%FFA	15,66 ± 1,80	730,32 ± 28,20	5,85 ± 1,68

Fonte: Autora, 2023.

**Figura 45** - Corpos de prova de PEADrec+1%FFA após ensaio de tração



Fonte: Autora, 2023.

A condição de alta linearidade da cadeia do PEAD fornece características específicas, a exemplo do alto índice de cristalinidade, atribuindo boas propriedades mecânicas (COUTINHO, 2003).

A Tabela 10 expõe dados sobre a resistência à tração, módulo elástico e alongamento na ruptura. Na resistência à tração, observa-se uma similaridade nos resultados do PEADrec e do PEADrec+0,5%FFA. Enquanto as amostras de PEADrec +1%FFA mostraram uma discreta melhoria na resistência à tração, com uma média de 15,66 MPa. A adição de FFA na matriz de PEAD, de acordo com o estudo de Gandara *et al.* (2022), pode ocasionar a diminuição da ductilidade das misturas, sendo confirmada a boa adesão entre a fibra mesmo sendo hidrofílica e a matriz hidrofóbica de PEADrec. Nessa mesma pesquisa citada, houve aumento de 42% na rigidez da mistura em comparação ao PEAD puro. O módulo elástico é diretamente proporcional ao teor de fibras nas misturas PEADrec/FFA (GANDARA *et al.*, 2022). Observa-se um discreto aumento na resistência à tração com a adição de apenas 1% (m/m) de FFA nessa dissertação em relação ao PEADrec.

Quanto aos valores do módulo elástico, observa-se 693,79 MPa do PEADrec. Enquanto, ao adicionar 0,5% de FFA à matriz de PEADrec, houve um aumento para 706,66 MPa, representando um acréscimo de 1,85% em relação ao PEADrec e quanto o teor de 1% de FFA, observou-se também o aumento para 730,32 MPa, representando 3,34% quando comparado ao PEADrec+0,5%FFA (Figura 47).

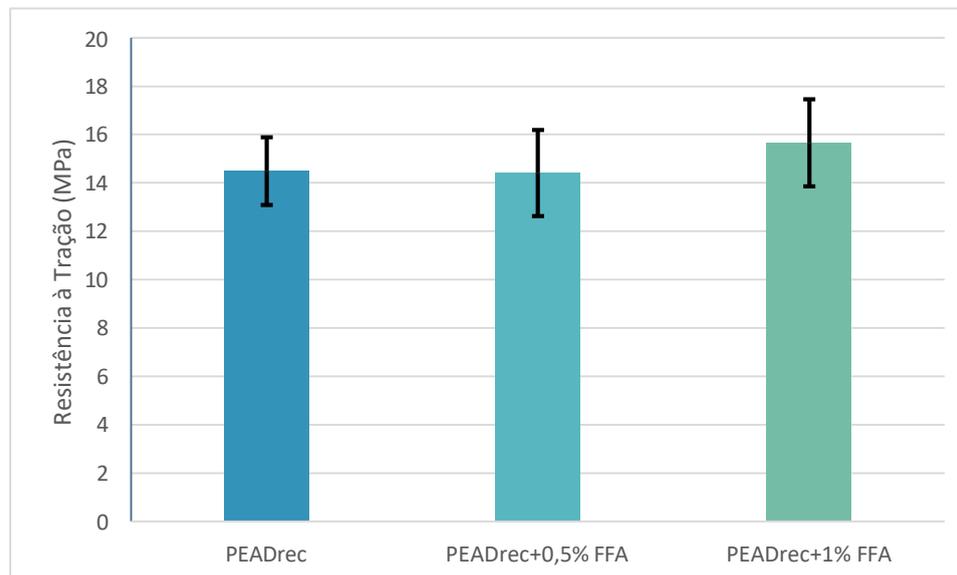
Assim como apontado na pesquisa de Negawo, Polat e Kilic (2021), houve uma variação no módulo elástico nas composições com PEAD, sendo todas elas crescente em relação ao PEAD sem reforço de fibra. Da mesma maneira, ocorreu o aumento do módulo elástico com o acréscimo da FFA nessa pesquisa, indicando que a fibra proporcionou maior rigidez ao material.

Nas pesquisas realizadas por Rotich (2020) e Aji *et al* (2011), foi constatada através de ensaios de tração que os compósitos de polietileno reciclado reforçados com FFA, à medida que houve o aumento da porcentagem da fibra, houve também o aumento da resistência a tração. Mas obteve um limite de aumento da proporção: após 30% de aumento de fibra, observou a diminuição da resistência, chegando a uma proporção ideal. O aumento de força proporcionou que a matriz polimérica reforçada com a fibra, tornou-se mais rígida, podendo suportar cargas mais altas. A fibra assumiu assim, a distribuição das cargas aplicadas, de modo mais eficiente e com maior resistência à deformação.

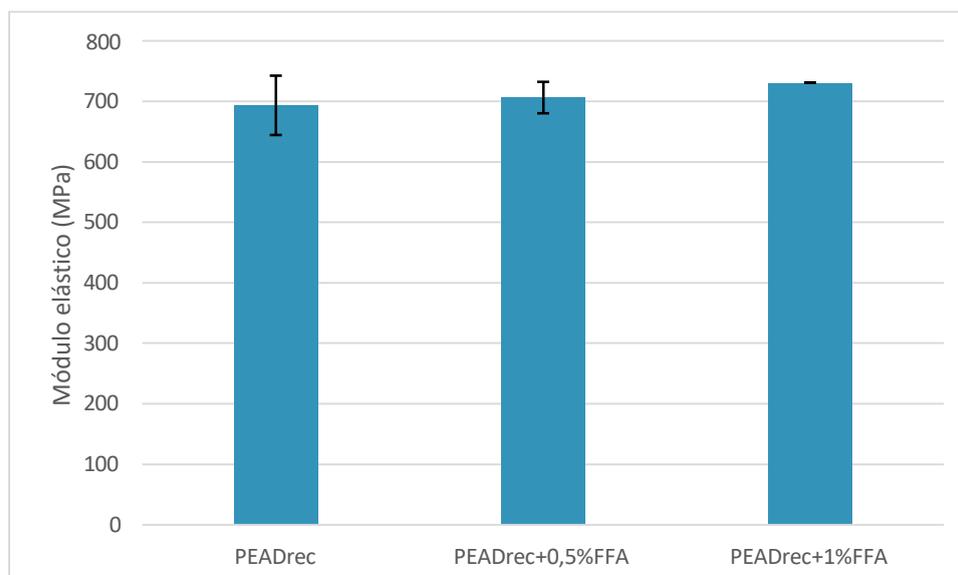
Portanto, todos os resultados das propriedades de tração analisadas, favorecem a elaboração de elementos para o ambiente construído, a exemplo do cobogó, com ótimas propriedades mecânicas a medida que ocorre o aumento do reforço de FFA na matriz polimérica do PEADrec.

A Figura 46 mostra a resistência à tração suportada pelas amostras analisadas e o desvio padrão. Com esse resultado é possível verificar que a amostra de PEADrec + 1,0% FFA possui uma maior resistência a tração, se comparado ao PEADrec e ao PEADrec+0,5% FFA.

**Figura 46** – Resistência à tração do PEADrec e do PEAD/FFA



**Fonte:** Autora, 2023.

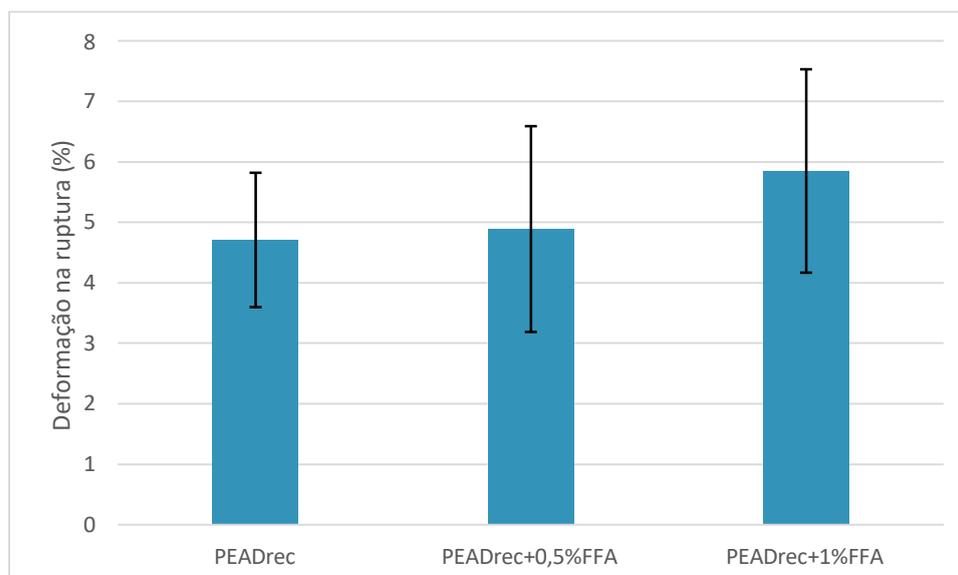
**Figura 47** – Módulo Elástico do PEADrec e do PEAD/FFA

**Fonte:** Autora, 2023.

De acordo com a análise feita da deformação na ruptura, constatou-se o crescente valor a medida que foi incorporado FFA no PEAD. Sendo: PEADrec - 4,71%, PEADrec+0,5%FFA - 4,89; PEADrec+1%FFA – 5,85%. Essa propriedade está relacionada a capacidade do material a se deformar antes da ruptura. A Figura 48 mostra o gráfico da deformação na ruptura(%) do PEADrec e as misturas de PEADrec/FFA.

No estudo de Ribeiro (2011), foram analisadas no ensaio de tração em relação à deformação na ruptura, visando investigar o efeito da adição de fibra vegetal na resposta mecânica dos materiais. Os resultados revelaram que materiais com maior quantidade de FFA exibiram comportamento mais elástico, indicando que o acréscimo de fibra vegetal está diretamente relacionado a uma maior deformação. Sugere-se que a fibra vegetal atua como uma carga, influenciando na compactação do compósito. Essa informação é relevante para compreender como a presença da fibra vegetal impacta nas propriedades mecânicas do material em estudo.

Ao mesmo tempo, estudos desenvolvidos por Seculli *et al.* (2022), utilizando a fibra de abacá reforçando PEAD. Apontam que quanto maior a resistência à tração, são apresentados segmentos mais longos para a curva tensão-deformação, conseqüentemente, maior deformação na ruptura. Semelhante ao que foi encontrado nessa pesquisa. Enfatizando sobre o interesse em pesquisar sobre os efeitos de matrizes e reforços adicionados nas propriedades mecânicas.

**Figura 48** – Deformação na ruptura do PEADrec e do PEAD/FFA

Fonte: Autora, 2023.

#### 5.2.5.2. Ensaio de flexão

No ensaio de resistência à flexão, o corpo de prova é submetido a esforços de tração e compressão, em que a face que recebe diretamente a aplicação da força é comprimida, enquanto a face oposta é tracionada. Conforme mencionado por Silva (2003), no ensaio de flexão, a resistência e o módulo de elasticidade são influenciados pelo reforço do material presente na incorporação da mistura, sendo que a formação de trincas ocorre sempre na região tracionada do corpo de prova, propagando-se em direção à região comprimida. Portanto, o agente de reforço que efetivamente fortalece o compósito está localizado no lado submetido à tração, seguindo a direção da tensão aplicada. Por outro lado, o agente de reforço com orientação perpendicular a essa direção atua reduzindo a resistência à flexão do compósito (MIRANDA, 2007). A Tabela 11 apresenta os resultados do ensaio de flexão para o PEADrec sem e com a FFA.

**Tabela 11** – Propriedades de flexão das amostras

Amostra	Resistência à Flexão (N/mm <sup>2</sup> )	Deformação (%)
PEADrec	15,64 ± 1,39	3,06 ± 0,18
PEADrec+0,5%FFA	16,66 ± 0,88	3,16 ± 0,14
PEADrec+1%FFA	14,80 ± 1,80	3,21 ± 0,14

Fonte: Autora, 2023.

É possível verificar que a FFA aumentou a resistência à flexão correspondente a mistura quando adicionada na proporção de 0,5% FFA, porém ao adicionar a quantidade 1,0% FFA houve uma redução de mais de 5% em relação à amostra sem a fibra vegetal. Essa tendência pode ter sido ocasionada pelos vazios apresentados nos corpos de prova, pois os grânulos da mistura PEADrec + 1% FFA tornaram-se mais expandidos, impedindo um melhor preenchimento nos moldes. Com esse resultado é possível verificar que a amostra de PEADrec + 1,0% FFA possui uma fragilidade em comparação a amostra de PEADrec + 0,5% FFA e PEADrec.

A pesquisa conduzida por Ribeiro (2011) revelou uma correlação direta entre as quantidades de FFA nas amostras e os resultados obtidos nos ensaios de flexão. Foi observado que a adição de fibra em até 30% resultou em um aumento na resistência à flexão, com uma média de 85,12 e um desvio padrão de 7,57. Esses resultados foram consistentes com a expectativa de que um aumento na quantidade de fibras levasse a um aumento correspondente na resistência à flexão. No entanto, é importante ressaltar que houve certa oscilação nos resultados, embora tendendo para o aumento da resistência à flexão.

Do mesmo modo, os estudos conduzidos por Rotich (2020) apresentaram resultados promissores em relação ao aumento da resistência à flexão com o aumento da proporção de FFA nos compósitos. Negrão (2018) adicionou até 40% de fibra vegetal e obteve resultados de flexão potencializados, de acordo com a tensão máxima desenvolvida na superfície, embora seja importante ressaltar que o estudo utilizou poliuretano como matriz. Em contrapartida, Rotich (2020) observou um aumento gradual da resistência à flexão à medida que a proporção de FFA foi aumentada, alcançando um aumento de cerca de 42% com teores de fibras variando de 10% a 30%. Isso ocorreu devido à presença das fibras em seção transversal composta, o que permitiu o transporte da carga com uma porcentagem de peso de fibra mais alta.

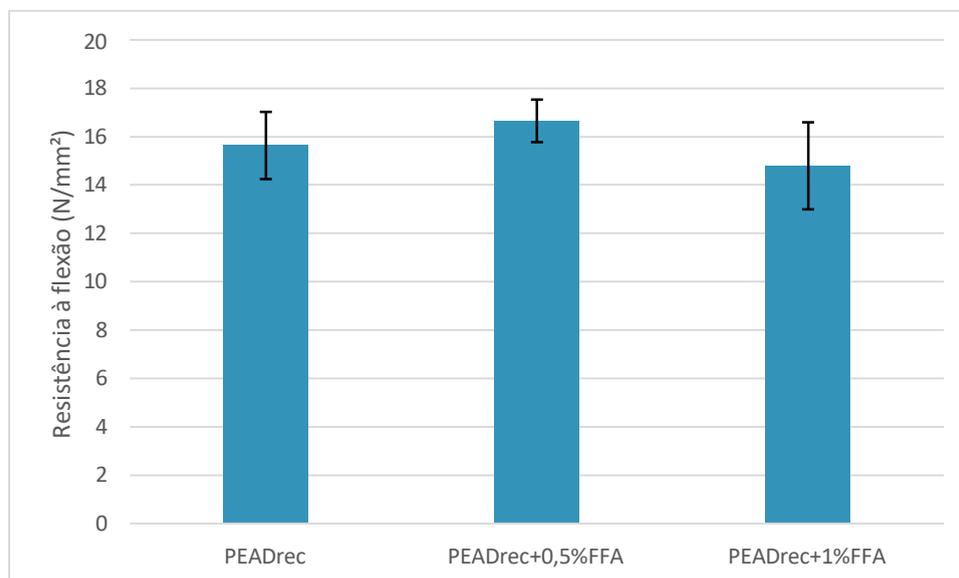
No ensaio de flexão realizado no estudo de Chen, Chen e Hsu (2006), indicaram aumento da resistência à flexão (variação entre 7,7 a 20,7 N/mm<sup>2</sup>) com a diminuição do teor de fibra de madeira na matriz de PEAD.

O grau de adesão interfacial da matriz com a fibra é essencial para encontrar a resistência à flexão do material misturado. Se houve fraca adesão, pode levar a pontos fracos no material e reduzir a resistência geral. A ligeira redução na resistência à flexão da FFA no PEADrec nessa pesquisa, pode ser causada devido o aumento de contato fibra-fibra, causando o aumento das concentrações de tensão e redução da resistência. Descreve-se essa situação no trabalho de (PERIYASAMY, 2023).

Na Figura 49 observam-se os resultados para a resistência à flexão (N/mm<sup>2</sup>) das

amostras estudadas nessa pesquisa.

**Figura 49** – Resistência à flexão do PEADrec e as misturas PEADrec/FFA

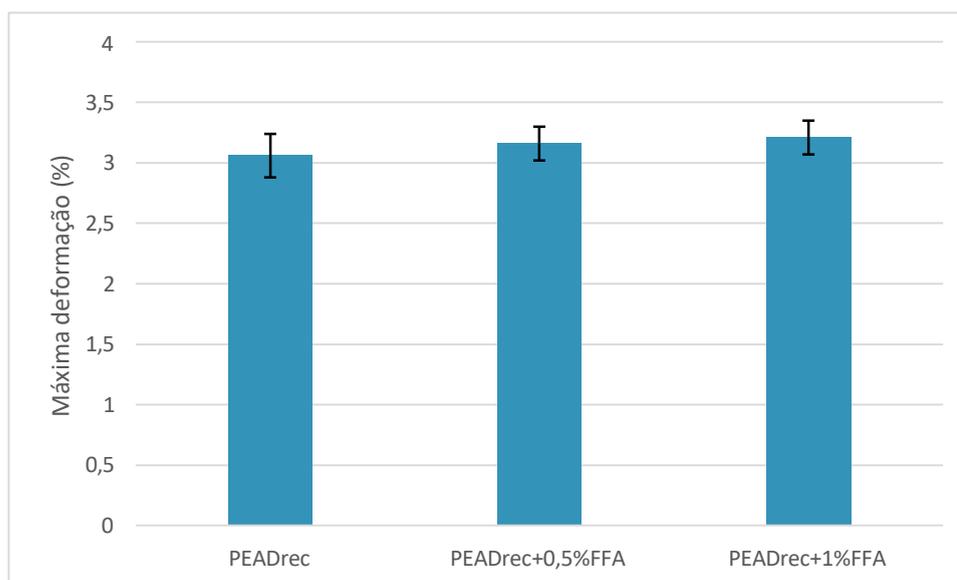


**Fonte:** Autora, 2023.

Quanto a propriedade de deformação, estudo realizados por Pires *et al.* (2019), com o acréscimo da fibra de juta nos compósitos, exibiram uma diminuição na deformação dos corpos de prova. Nessa pesquisa, quanto maior o acréscimo de fibras, maior a deformação (PEADrec – 3,06%; PEADrec+0,5%FFA – 3,16%; PEADrec+1%FFA – 3,21%).

Na Figura 50 observa-se os resultados para a máxima deformação (%) das amostras estudadas nessa pesquisa.

**Figura 50** – Máxima Deformação do PEADrec e as misturas PEADrec/FFA



**Fonte:** Autora, 2023.

No entanto, é necessário considerar que o uso de PEADrec pode afetar as propriedades finais da mistura, conforme observado por Saengsuwan *et al.* (2021). A presença de impurezas ou a menor qualidade do material reciclado pode influenciar negativamente a resistência à flexão, resultando em reduções no desempenho do compósito.

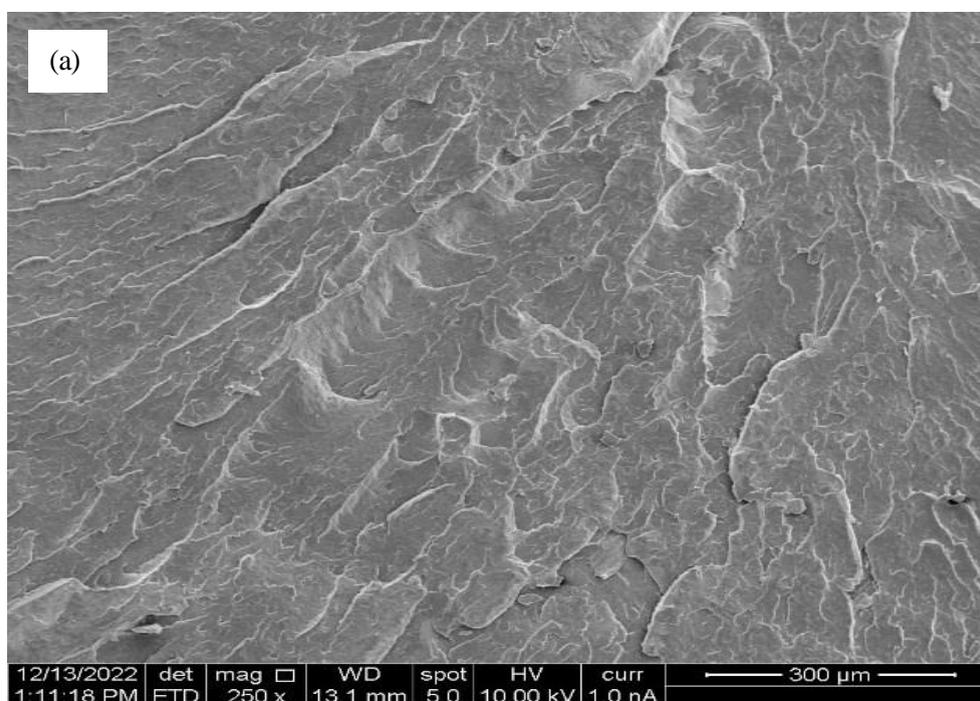
Essas considerações destacam a complexidade e a importância de fatores como a distribuição das fibras, o tipo do polímero utilizado e a técnica de processamento na obtenção da mistura com propriedades desejadas. Portanto, é necessário realizar estudos mais aprofundados para compreender plenamente os efeitos desses fatores e otimizar a composição da mistura de PEAD/ FFA, visando alcançar o máximo desempenho.

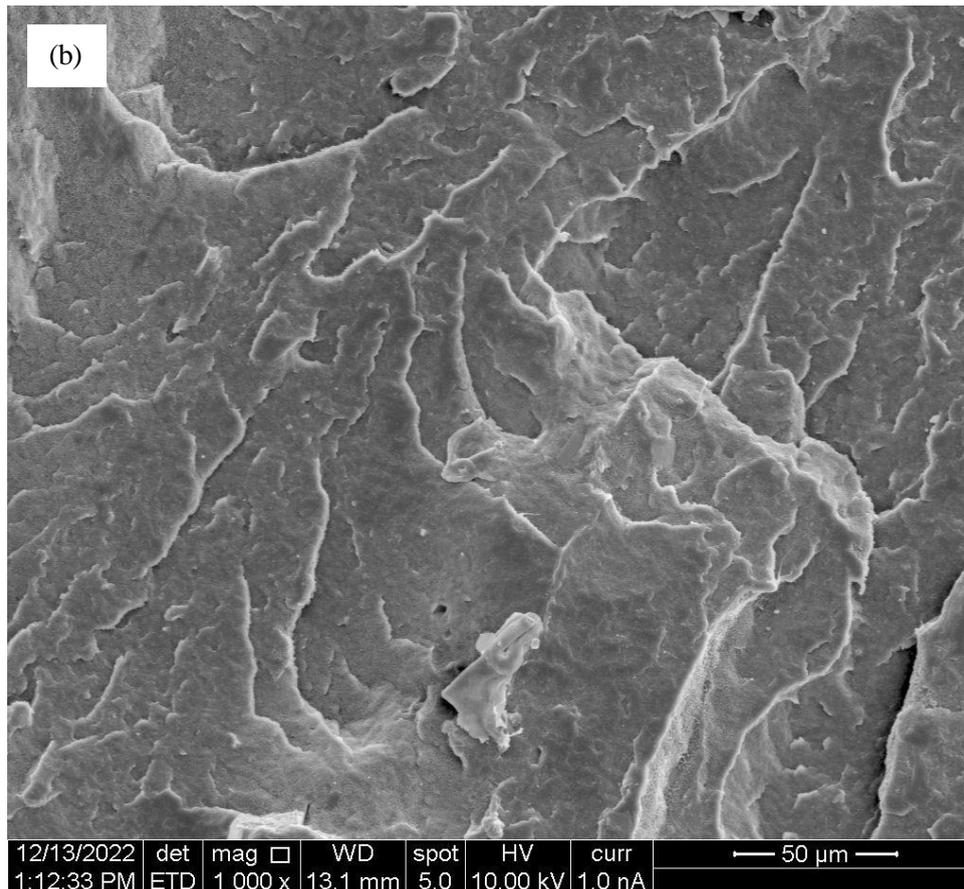
### 5.2.6. Microscopia eletrônica de varredura – MEV

A superfície de fratura do PEADrec e das misturas PEADrec/FFA foram analisadas por MEV, possibilitando observar as superfícies e as microestruturas das misturas PEADrec+FFA, é possível observar ainda, a dispersão e distribuição das fibras e a adesão entre os componentes.

As micrografias de PEADrec e das misturas PEADrec + 0,5% FFA e PEADrec + 1% FFA são apresentadas nas Figuras 51, 52 e 53, respectivamente, utilizando a magnificação de 250x e 1000x.

**Figura 51** – Micrografias do PEADrec

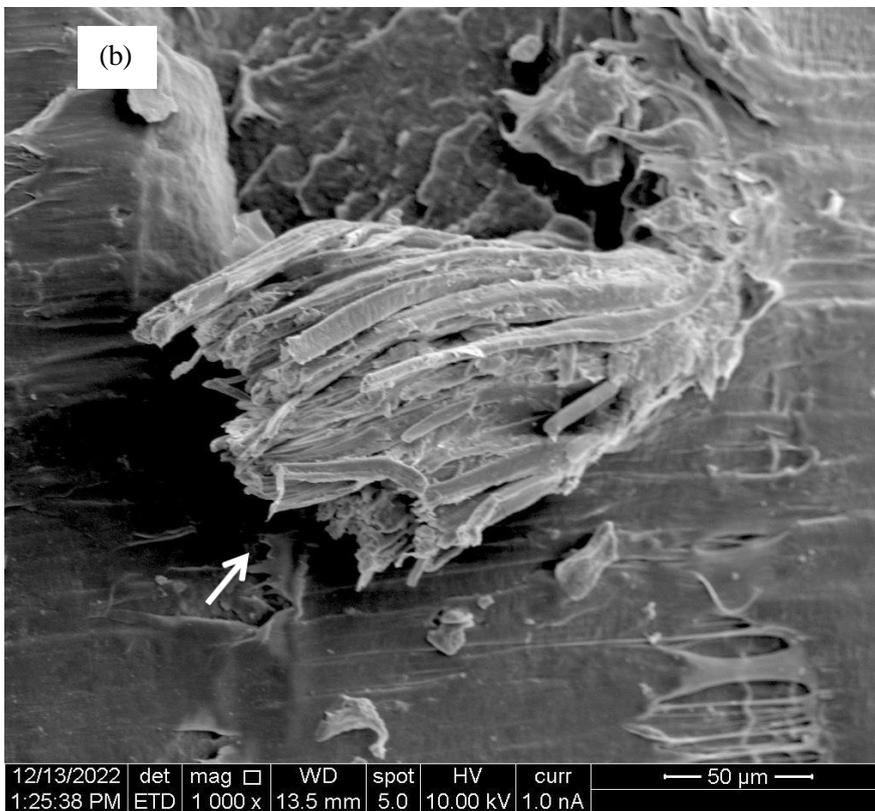
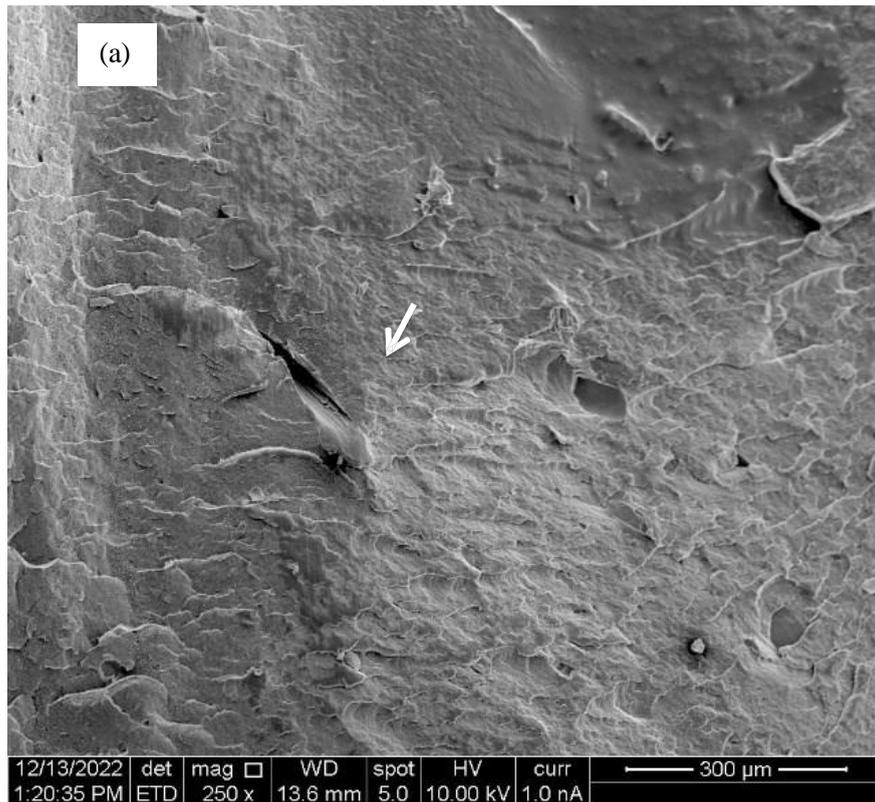




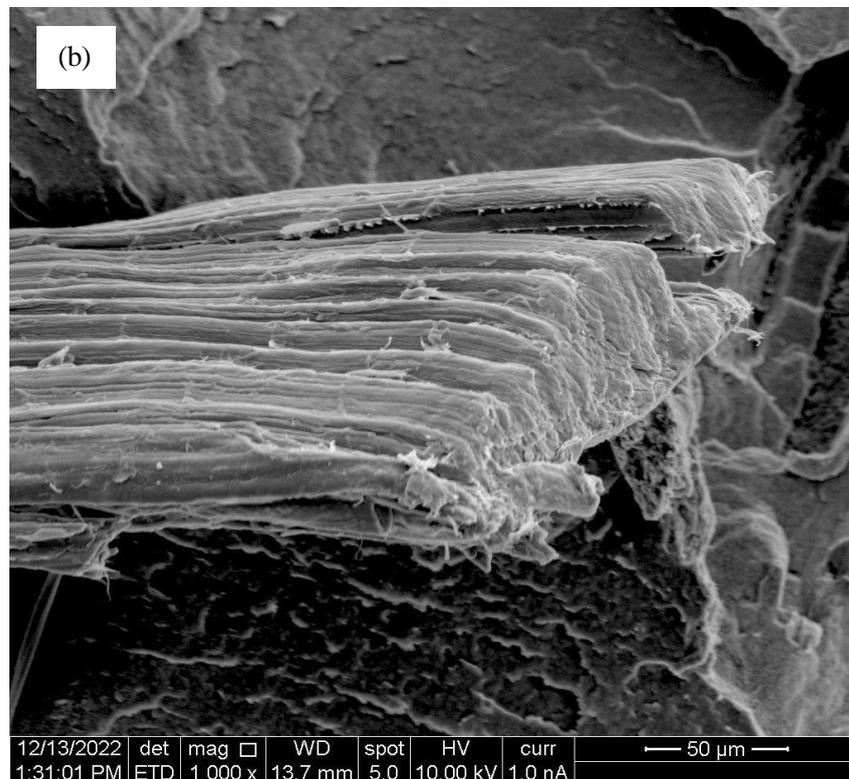
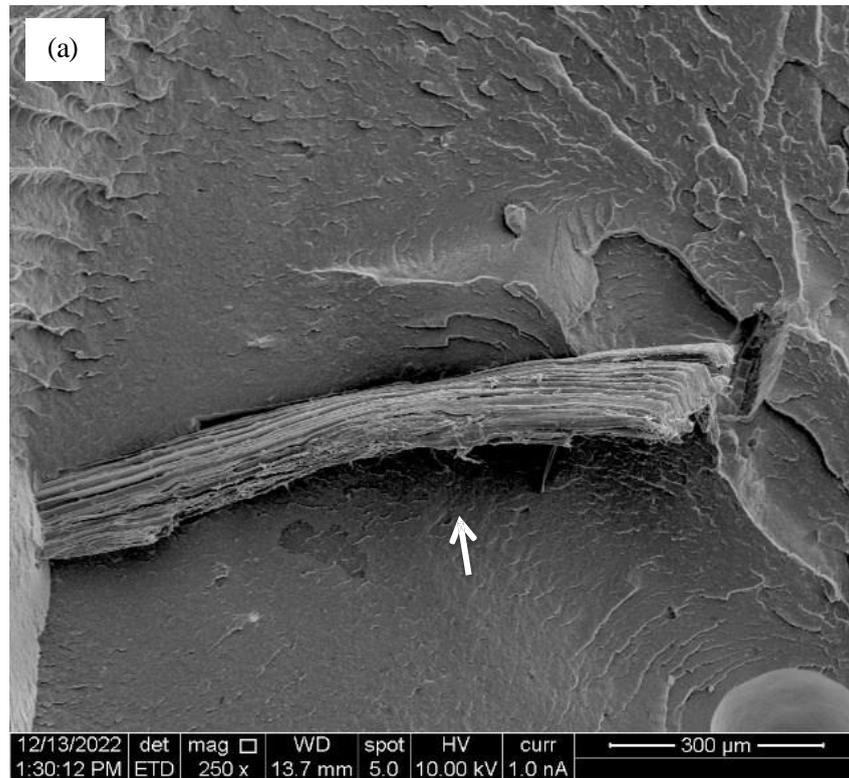
Fonte: Autora, 2023.

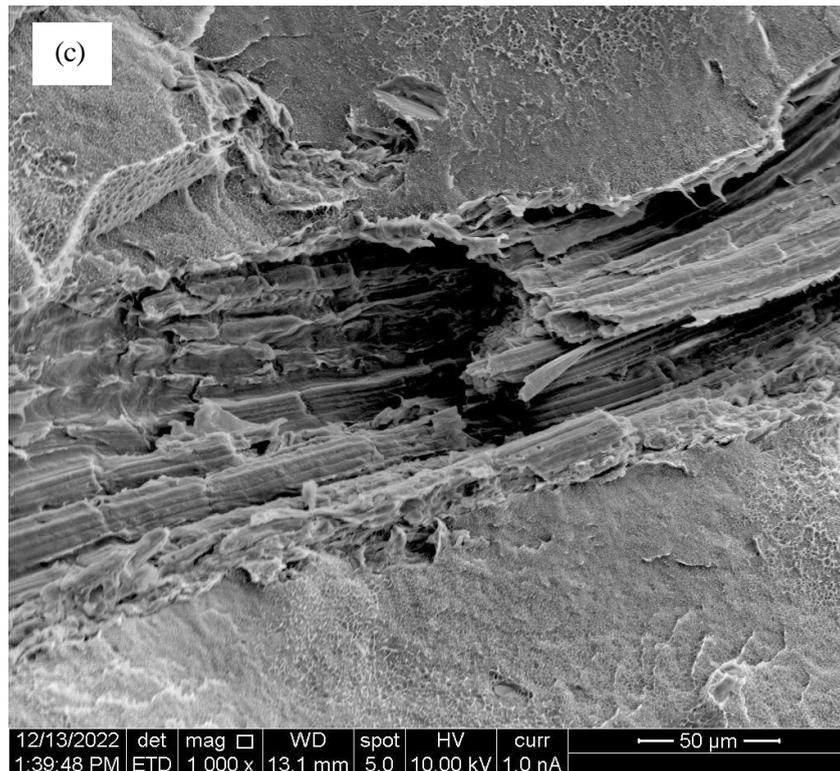
Nas micrografias de PEADrec sem a adição de fibra (Figura 51 a e b), é possível observar uma superfície com morfologia irregular e características rugosas. Observa-se também, a distribuição do material e o bom grau de mistura homogênea. Assim como descrito em seu trabalho (LI *et al.*, 2017).

Enquanto as micrografias observadas nas amostras com adição de 0,5% de FFA, estão apresentadas nas Figuras 52 a e b.

**Figura 52** – Micrografias do PEADrec + 0,5% FFA

Fonte: Autora, 2023.

**Figura 53** – Micrografias do PEADrec + 1% FFA



**Fonte:** Autora, 2023.

Observou-se que as fibras aderidas na matriz de PEADrec, sobretudo da mistura PEAD + 1% FFA, proporcionou fraca ligação interfacial entre a fibra e o polímero, que pode prejudicar a resistências à tração, podendo inclusive diminuí-la. Essa fraca adesão da fibra é melhor observada nas Figuras 53 a, b e c. Na última Figura mencionada, é possível visualizar que a fibra foi totalmente arrancada. Em contrapartida, nessa pesquisa, o acréscimo de 1% FFA, ocasionou em uma melhora discreta nas propriedades de tração. Desse modo, pode ter ocorrido uma boa aderência da FFA com o polietileno em outras amostras, ocasionando um bom grau de mistura da FFA no PEAD.

Os estudos conduzidos por Colom *et al.* (2003) expõe sobre os efeitos de diferentes tratamentos na interface de compósitos de PEAD com fibras lignocelulósicas observados por MEV. Nas fibras sem tratamento, aparecem livres de qualquer material da matriz aderido a elas, indicando uma fraca adesão entre fibras lignocelulósicas e PEAD. Enquanto com a utilização de agente de acomplamento de silano, aumentou a dispersão da fase contínua do PEAD, facilitando assim, o contato direto entre as fibras e a matriz. Essas pesquisas, reforçam a importância do estudo sobre agentes compatibilizantes para aumentar o grau de mistura e adesão polímero/fibra.

Também foi possível observar que nas micrografias obtidas para as amostras com as

misturas de PEADrec com a FFA existe a presença de sólidos, incrustados e aderidos superficialmente, proveniente do processo de desfibramento e/ou do próprio manuseio. De maneira geral, segundo Gurgel; Correia (2017; 2011) as FFA's apresentam-se recobertas por uma camada superficial rica em gorduras e ceras, e também podem ser encontrados alguns sólidos de sais. As fibras apresentam rugosidades superficiais que poderá servir de maior interação e ancoramento entre a fibra e a matriz do PEADrec, aumentando o efeito do reforço da fibra. Assim como encontrado na pesquisa de Singh (2020), evidenciou um maior número de quebras de fibras no local da fratura, indicando que as FFA's estavam participando do suporte de carga no ensaio de tração e com boa adesão entre o polímero, aumentando assim, a capacidade de suporte de carga dos compósitos.

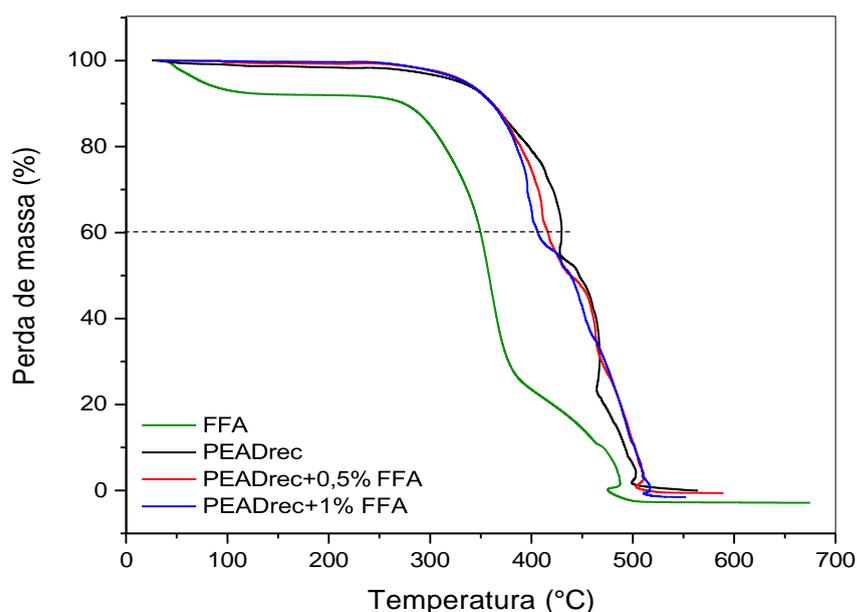
### 5.2.7. Análise térmica

#### 5.2.7.1. Análise termogravimétrica - TG/ DTG

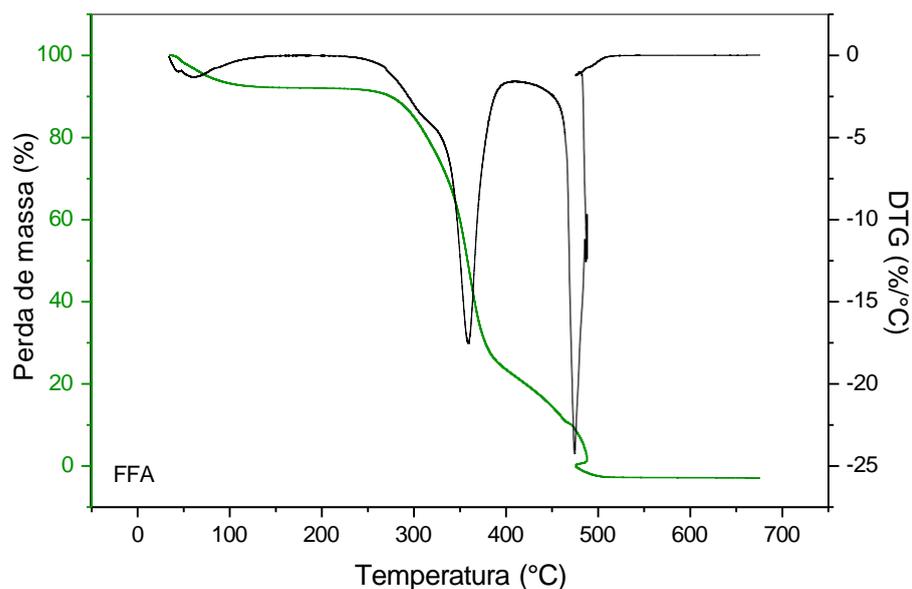
A partir da análise termogravimétrica é possível avaliar as etapas de perdas de massas assim como a influência da fibra na estabilidade térmica do PEADrec.

As curvas de TG/DTG da FFA para o PEADrec e para as misturas PEADrec/FFA estão exibidas nas Figuras 54, 55, 56, 57 e 58. Os resultados das etapas de perdas de massa e suas respectivas temperaturas estão apresentadas na Tabela 12.

**Figura 54** – Curvas TG da FFA, PEADrec e misturas PEADrec/FFA

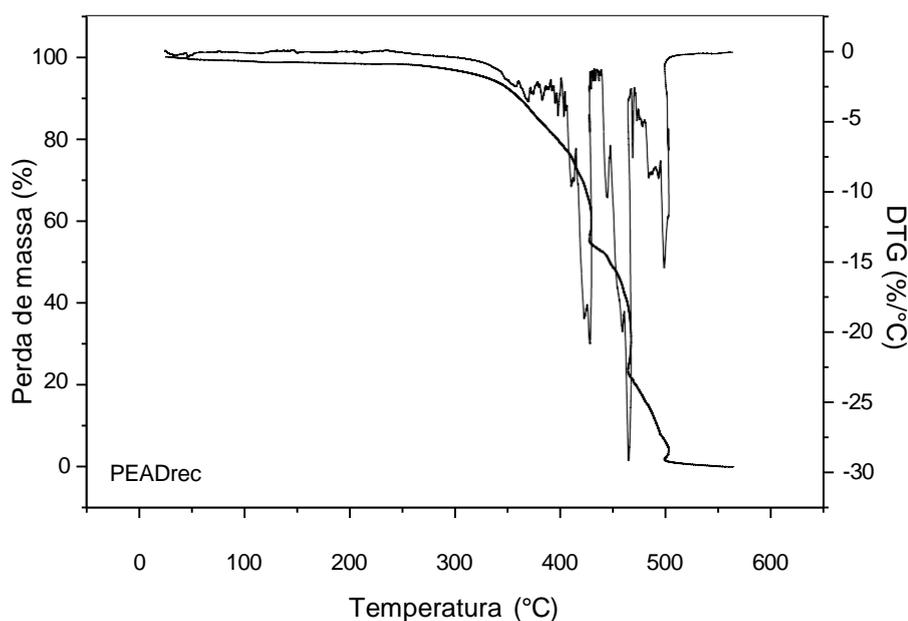


**Fonte:** Autora, 2023.

**Figura 55** – Curvas TG/DTG da FFA

**Fonte:** Autora, 2023.

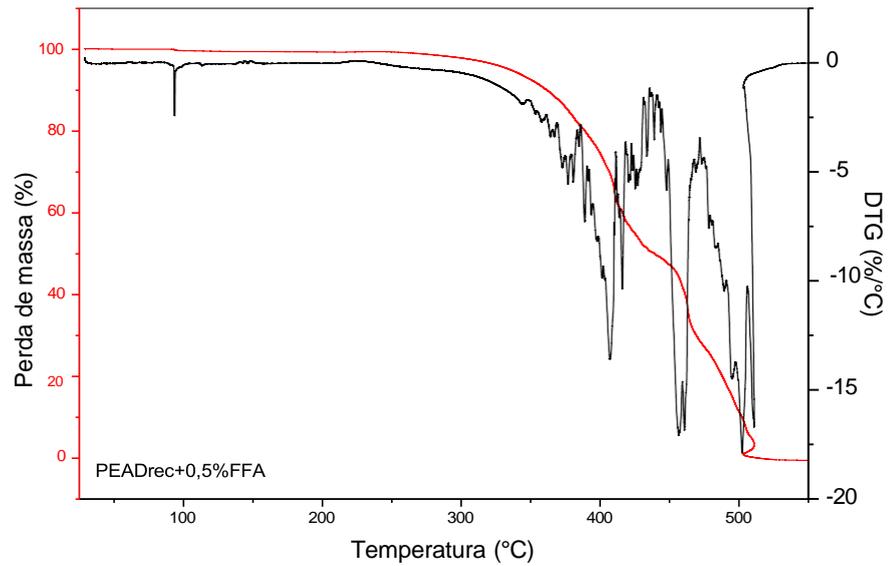
Analisando as curvas de TG/DTG na Figura 55 é possível observar que as curvas mostram três estágios. Na amostra de FFA, o primeiro estágio encontra-se em torno de 34,72 – 121,84°C, sendo um indicativo de perda de água e pequena perda de massa nessa faixa de temperatura. E o segundo estágio está entre a faixa 241,13 – 404,51°C, referente a perda de polissacarídeos, hemicelulose, lignina, pectina e ligações glicosídicas da celulose. No terceiro, correspondente ao início do processo de perda máxima em torno de 434,58 – 509,45°C, com uma redução acentuada de polissacarídeos e perda térmica da celulose (Asim *et al.*, 2019). Esse resultado foi semelhante ao encontrado na pesquisa que foi utilizada a FFA, mesma fibra dessa dissertação (ATTHARANGSAN E SAIKRASUN, 2013).

**Figura 56** – Curvas TG/DTG do PEADrec

**Fonte:** Autora, 2023.

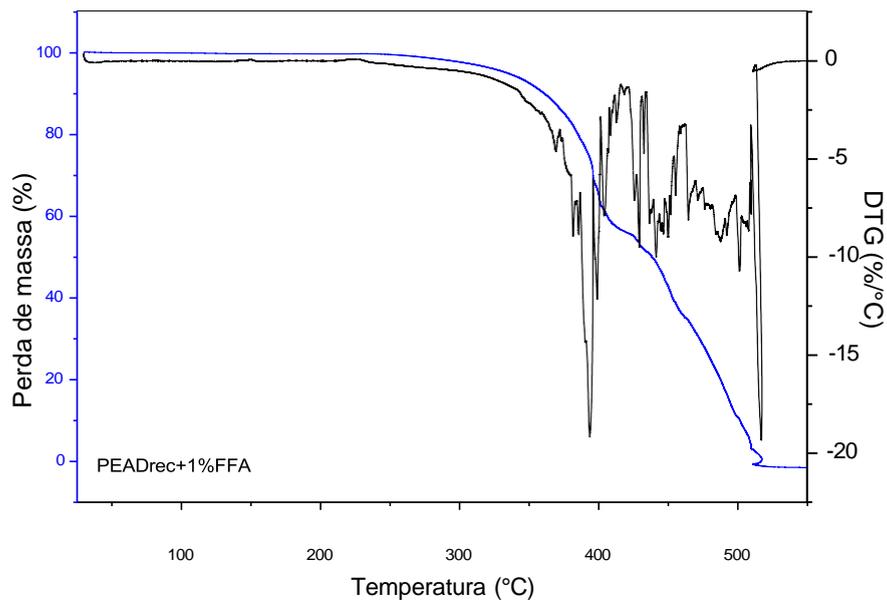
É possível observar as curvas TG/DTG do PEADrec na Figura 56, possuindo cinco estágios de perdas de massa: o primeiro na faixa de 25,55 – 74,81°C, referente a perda de umidade na amostra. O segundo estágio na faixa de 282,61 – 404,69°C, que representa o início da perda de massa do PEAD. O PEAD é um polímero linear longo, caracterizado por um alto grau de cristalinidade e baixa ramificação, de acordo com Kai *et al.* (2019), nesse estágio ocorre a ruptura das ligações fracas. O terceiro estágio entre a faixa de 406,72 – 430,05°C, ocorreu uma acentuada perda de massa, sendo a temperatura máxima de perda de massa, nessa faixa, de 428,16°C. No quarto estágio, na faixa entre 435,96 – 466,45°C, observa-se a maior perda de massa observada no gráfico, tendo a temperatura dessa perda de massa máxima em 465,23°C. E o último estágio de perda de massa entre 470,53 – 528,77°C, em que degradou-se completamente, quase sem resíduos remanescentes. A degradação completa de 525°C do PEAD foi encontrada por Kai *et al.* (2017), semelhante a encontrada nessa pesquisa.

Na Figura 57, observa-se nas curvas TG/DTG do PEADrec+0,5%FFA, quatro estágios, evidenciados nas curvas de DTG. O primeiro na faixa de temperatura entre 29,57 – 84,36°C, representando a perda de umidade presente na mistura PEADrec/ FFA. O segundo estágio, entre a faixa de 270,88 – 429,47°C; o subsequente estágio entre a faixa de 435,48 – 469,83°C e o último estágio entre 471,51 – 532,88°C, a perda de massa nessa temperatura, pode ser atribuído à composto aromático, em que envolve reações de desidratação (MOHANTY *et al.*, 2005).

**Figura 57** – Curvas TG/DTG do PEADrec+0,5%FFA

**Fonte:** Autora, 2023.

Observa-se nas curvas de TG/DTG do PEADrec+1%FFA (Figura 58), quatro estágios de perdas de massa. Entre a faixa de temperatura em 29,90 – 83,01°C, similarmente encontrado nos outros gráficos, ocorre a perda de umidade da amostra. O segundo estágio em 283,24 – 411,58°C, o subsequente em 421,08 – 458,05°C e o último entre a faixa de 462,30 – 529,10°C.

**Figura 58** – Curvas TG/DTG do PEADrec+1%FFA

**Fonte:** Autora, 2023.

As temperaturas correspondente a 40% de perda de massa foi de 349,67°C - FFA,

429,60°C - PEADrec, 415,91°C - PEADrec +0,5% e 406,11°C - PEADrec +1% FFA (Tabela 12). Resultando assim, quando há a incorporação da fibra, para os dois teores, houve deslocamento da temperatura de perda de massa para maiores valores, sendo uma melhora significativa na estabilidade térmica da FFA incorporada ao PEADrec. Entretanto, comparando os valores das misturas com a do PEADrec, observa-se que ao adicionar FFA no PEADrec, a estabilidade da mistura foi reduzida a medida que aumentou a concentração da FFA na composição.

**Tabela 12:** Dados das etapas de perdas de massa, temperatura máxima e temperaturas de perda de massa a 40%

Material	Etapas de perdas de massa (°C)	*T <sub>Dmáx</sub> (°C)	*T <sub>D40%</sub> (°C)
FFA	34,72 – 121,84	59,81	349,67
	241,13 – 404,51	358,58	
	434,58 – 509,45	473,67	
PEADrec	25,55 – 74,81	49,55	429,60
	282,61 – 404,69	397,92	
	406,72 – 430,05	428,16	
	435,96 – 466,45	465,23	
	470,53 – 528,77	498,90	
PEADrec+0,5% FFA	29,57 – 84,36	40,63	415,91
	270,88 – 429,47	406,80	
	435,48 – 469,83	456,26	
	471,51 – 532,88	501,73	
PEADrec+1% FFA	29,90 – 83,01	41,39	406,11
	283,24 – 411,58	393,39	
	421,08 – 458,05	501,23	
	462,30 – 529,10	516,68	

\*T<sub>Dmáx</sub> - Temperatura de perda de massa máxima, T<sub>D40%</sub> - temperatura de perda de massa a 40%.

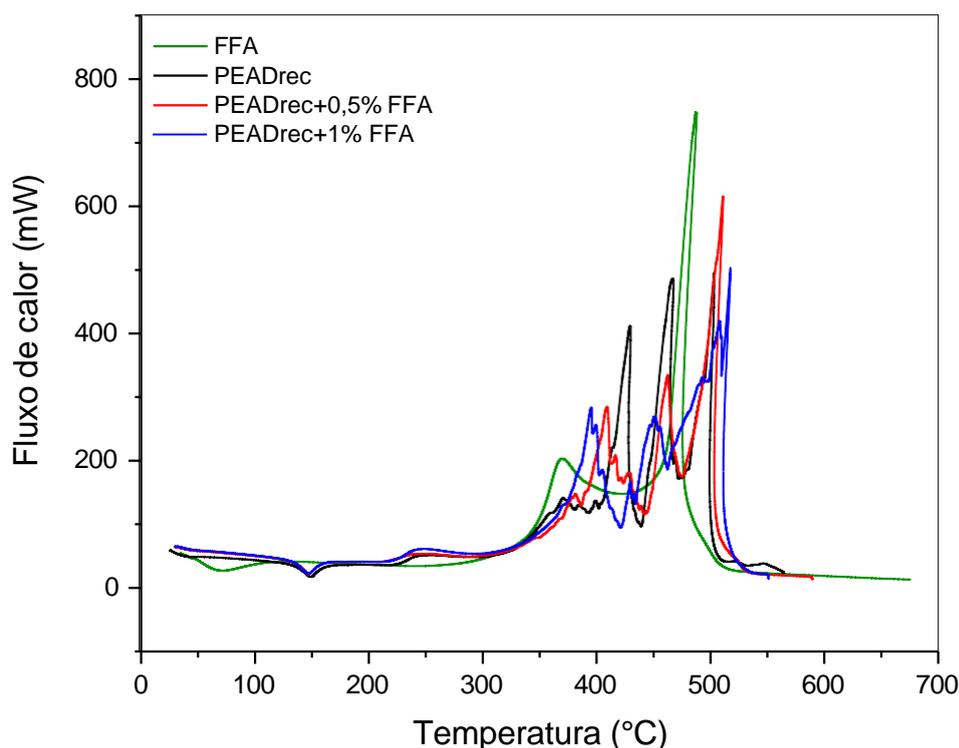
**Fonte:** Autora, 2023.

### 5.2.7.2. Calorimetria exploratória diferencial – DSC

A Figura 59 mostra o resultado das curvas de DSC para a FFA, PEADrec e PEAD/FFA e os resultados da análise são mostrados na Tabela 13. Os picos de FFA abaixo de 100°C (em aproximadamente 73,91°C) foram os de evaporação de água, tendo volume moderado de calor liberado.

No primeiro pico exotérmico, observa-se a temperatura inicial de perda de massa e da temperatura máxima de perda de massa térmica da FFA (315,00 e 470,40°C). A pirólise dessa etapa ocorreu principalmente em zona amorfa, pois a zona dentro da fibra diminuiu, aumentando assim o grau de ordem, entrando na região cristalina. Com o aumento da temperatura, houve a despolimerização da celulose, aumentando também o volume de liberação de calor, formando o segundo pico de liberação de calor. Dados semelhantes aos encontrados por (HE *et al.*, 2012).

**Figura 59** – Curvas de DSC da FFA, PEADrec e PEADrec/FFA



**Fonte:** Autora, 2023.

Com a curva de DSC para o PEADrec é possível observar que o polímero começou a perder sua forma sólida em torno de 85°C, que é a temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ) do PEAD e o ponto de fusão inicial apareceu por volta da temperatura de 150°C. É importante

destacar que à medida que a temperatura aumenta a taxa de fluxo de calor também aumenta. Esses resultados foram semelhantes ao analisado por Gary *et al.* (2018) que estudaram as propriedades térmicas do PEADrec e do PEBD.

Na mistura de PEADrec + 1,0% de FFA é possível observar três estágios: o primeiro entre 250°C e 350°C, referente à degradação inicial do polietileno de alta densidade, da celulose e hemicelulose existentes na fibra. O segundo estágio é possível observar entre 350°C e 430°C correspondente à degradação do PEADrec. E o terceiro, entre 430°C e 600°C, relacionado à degradação da estrutura do polietileno e da lignina existente na fibra.

De maneira geral, é possível ressaltar que a presença dos eventos endotérmicos e exotérmico, tanto para as amostras com diferentes porcentagens de FFA e para a amostra de PEADrec, só aconteceu depois de alcançada a temperatura de 350°C, momento em que o processo de perda de massa do polietileno de alta densidade e das misturas tornou-se mais intenso.

O PEADrec apresentou uma temperatura de fusão de 149,90°C. Ao misturar o PEADrec nas diferentes concentrações de FFA, verifica-se que o valor de temperatura de fusão foi discretamente diminuído para 146,96 e 147,66°C em relação ao PEADrec, para a composição acrescida de 0,5% e 1% FFA. Esse resultado é importante, tendo em vista que o teor de fibra não afetou essa característica de fusão do material em geral, não comprometendo com a qualidade final do produto.

Acima de 320°C pode-se observar a presença de picos exotérmicos para todos os materiais em estudos característicos de processo de degradação. Observando inclusive que a incorporação dos diferentes teores de FFA na matriz polimérica não afetou no grau de cristalinidade do PEADrec, cujos valores ficaram em torno de 85%.

**Tabela 13:** Dados de DSC das amostras no primeiro aquecimento

Material	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH (J/g)	X <sub>c</sub> (%)
FFA	-----	-----	-----
PEADrec	149,90	236,33	85,31
PEADrec+0,5% FFA	146,96	235,47	85,00
PEADrec+1% FFA	147,66	237,66	85,79

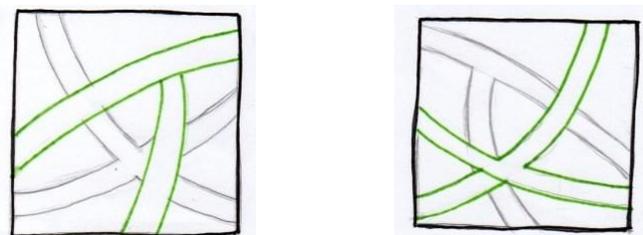
T<sub>m</sub> – temperatura de fusão cristalina, ΔH – variação de entalpia e X<sub>c</sub> – grau de cristalinidade determinada no primeiro aquecimento.

**Fonte:** Autora, 2023.

### 5.3. Criação do protótipo – Cobogó

Após a criação de croquis do protótipo de cobogó (Item 4.4), sendo selecionado o *design* (Figura 60).

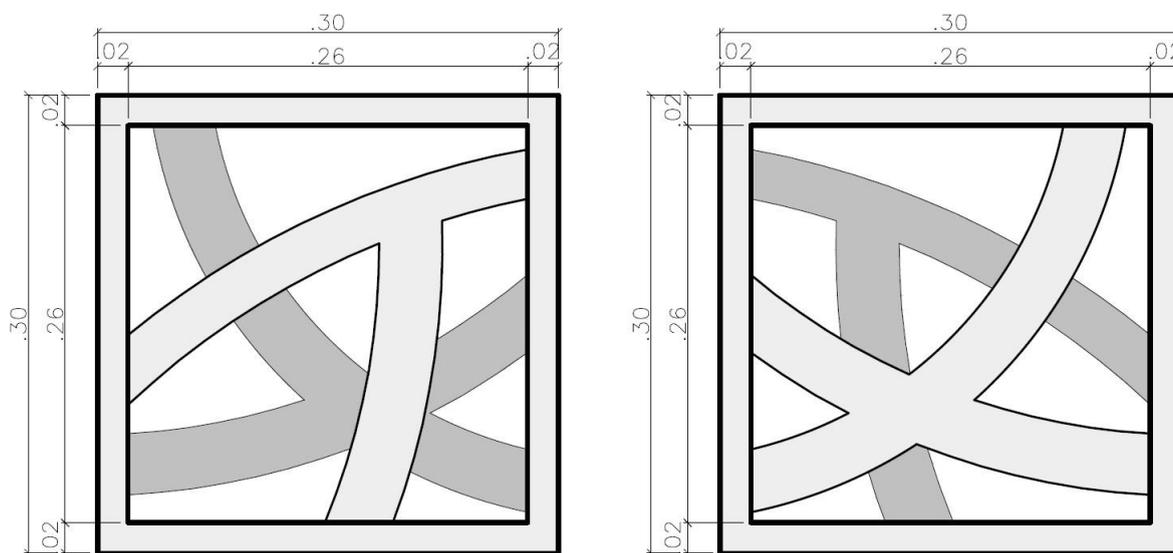
**Figura 60** – Croquis do cobogó



**Fonte:** Autora, 2019.

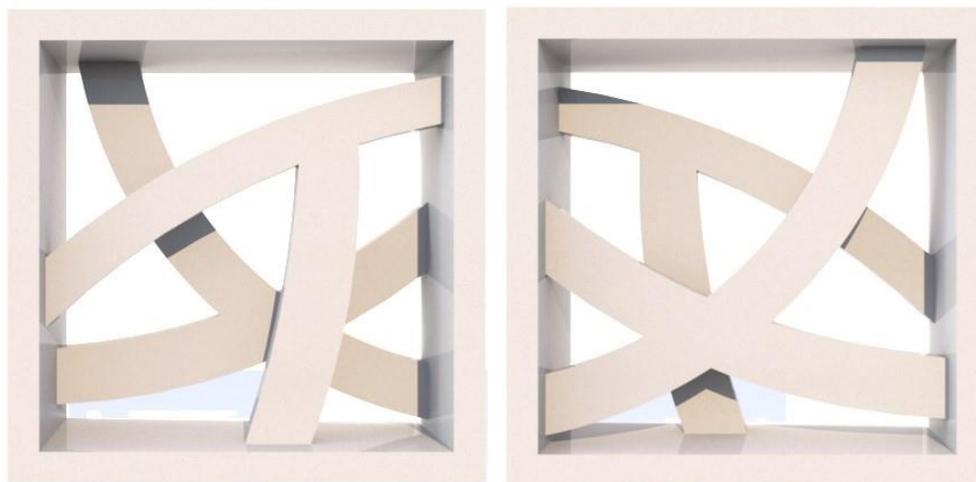
A colocação das dimensões no software AutoCAD 2018 permitiu melhor visualização da proposta. A Figura 61 mostra as elevações das frentes do cobogó com hachuras para representar os diferentes planos do protótipo. As hachuras, juntamente com as espessuras das linhas, transmitem a ideia de diferentes planos presentes no cobogó, sugerindo uma sensação de profundidade em antecipação ao estudo volumétrico.

**Figura 61** - Desenho do protótipo



**Fonte:** Autora, 2023.

No estudo volumétrico, foram utilizadas linhas curvilíneas com uma espessura de borda de 2cm (Figura 62). O software SketchUp e o renderizador Vray 3.0 foram utilizados nesse estudo.

**Figura 62 - Volumetria do cobogó**

**Fonte:** Autora, 2023

Para a elaboração do protótipo de cobogó, utilizou-se a composição PEADrec+1%FFA por apresentar os melhores valores das propriedades de tração. Pode-se observar na Figura 63 o resultado do protótipo final, quanto a sua volumetria e modelo em escala 1:4 (cm), miniaturizado, medindo então, 7,5 x 7,5 x 3,0 cm. As ranhuras observadas foram provenientes do processo de corte na CNC.

**Figura 63 - Protótipo do cobogó**

**Fonte:** Autora, 2023.

## 6. CONCLUSÃO

Essa pesquisa seguiu o processo experimental, conforme pesquisas correlatas e a utilização de normas técnicas, possibilitando a sua completa execução em laboratórios, apresentados no Item 4.

A FFA demonstrou a sua viabilidade de uso na incorporação em matriz polimérica de PEADrec, quando analisada em resultados e comparada com a literatura. As misturas PEADrec/FFA, demonstraram a pertinência do seu uso para a elaboração de elemento arquitetônico não estrutural de cobogó, possibilitando a utilização no ambiente construído.

Nas análises realizadas, para avaliar as propriedades físicas, revelaram que o teor de cinzas de 0,54% da FFA, indica um alto grau de pureza e qualidade da fibra, contribuindo positivamente nas propriedades do elemento.

Quanto as propriedades mecânicas, a amostra PEADrec+1%FFA, demonstrou um desempenho superior. Sendo então, a escolhida para a elaboração do protótipo de cobogó, por apresentar resultados mais satisfatórios para o uso em ambiente construído e para elementos arquitetônicos.

De acordo com as curvas de TG/DTG, demonstraram que a incorporação da fibra, para os dois teores (0,5 e 1,0% m/m), deslocaram a temperatura de perda para maiores valores, conferindo melhora significativa na estabilidade térmica das FFA's quando incorporadas no PEADrec.

Sendo assim, esse estudo destaca as possibilidades de aproveitamento da FFA, frequentemente descartadas, combinadas com o PEADrec, material comumente utilizado no mundo, para a criação de materiais sustentáveis e eficientes.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

1. Estudar outras concentrações de FFA na matriz de PEADrec de modo a melhorar as propriedades do produto final;
2. Realizar ensaios de resistência às intempéries e outros processos de desgastes;
3. Melhorar a adesão matriz/fibra usando agentes de acoplamento;
4. Verificar a potencialidade quanto a fabricação mais eficiente do cobogó;
5. Realizar estudo quanto ao custo de mercado para implantação no ambiente construído.

## 8. REFERÊNCIAS

ABDUL, K.; JAWAID, M; KHALIL, F. **Properties of banana fibers reinforced polymer composites: Review.** Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 30, n. 24, p. 2037-2058, 2011.

AJI, I.S; ZAINUDIN, E. S.; KHALINA, A.; SAPUAN, S. M. **Studying the effect of fiber size and fiber loading on the mechanical properties of hybridized kenaf/PALF-reinforced HDPE composite.** Malasia: Journal of Reinforced Plastic & Composites. P. 546 – 554. 2011.

ALEXANDRE, M.; NUNES, V. M.; SALES, H. S.; ALMEIDA, R. J. **Materiais compósitos poliméricos reforçados com a fibra da folha do abacaxizeiro.** In: Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação, João Pessoa. 2004.

ARAÚJO, J; DANA, SEYYED; MOREIRA, A. **Protótipo de uma máquina desfibradora de sisal de corte paralelo, utilizando uma garra para a realização do movimento de retirada da folha durante o desfibramento.** João Pessoa, 2019.

ARAÚJO, A.; LIRA P.; MACHADO. M.; XIMENES, J. **Inspiração na natureza muito além da forma: a biomimética na arquitetura.** Archdaily, 2018. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/902325>. Acesso em: 26 jul. 2023.

ASIM, M.; ABDAN, K.; JAWAID, M.; NASIR, M.; DASHTIZADEH, Z.; ISHAK, M. R.; HOQUE, M. E. **A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites.** Malásia, Hindawi. V. 2015. P. 10. 2015.

ASTM D638-14: **Método de ensaio padrão para propriedades de tração de plásticos.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.

ASTM D790-16: **Método de ensaio padrão para propriedades de flexão em materiais plásticos e compostos plásticos reforçados.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

ATTHARANGSAN, S; SAIKRASUN, S. **Kinetic analysis of thermal and thermooxidative decomposition of recycled PE/PALF bio-based composites**. Mahasarakham: Plast Technol, v. 17, p. 94-110. 2013.

BARBOZA, R. M. P.; SENA NETO, A. R.; SOUZA, F. V. D.; MATTOSO, L. H. C.; MARCONCINI, J. M. **Caracterização e correlação de propriedades mecânicas e constituintes químicos de doze variedades de abacaxis (gênero *ananas*)**. In: Simpósio Nacional de Instrumentação Agroprecuária. São Carlos, 2014.

BARRICHELO, L; BRITO, J. **Química da madeira**. Piracicaba: ESALQ. 125p. 1985.

BAUDRILLARD, J. A **Sociedade de Consumo**. Arte e Comunicação: Lisboa. Ed. 70. P. 107. 1970.

BENINI, K. C. C. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS/fibra da casca do coco verde e bagaço cana de açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá – SP. 2011.

BHAGAWAN, S. S.; DEVI, L. U.; THOMAS, S. **Dynamic mechanical properties of pineapple leaf fiber polyester composites**, Polymer composites, v. 32, n. 11, p. 1741-1750. 2011.

CANEVALORO, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber Ltda. 2º edição. 2006.

CHEN, H; CHEN, T; HSU, C. **Effects of wood particle size and mixing ratios of HDPE on the properties of the composites**. Taiwan, Original Arbeiten. V. 64. P. 172-177. 2006.

CHOLLAKUP R.; TANTATHERDTAM R.; UJJIN S.; SRIROTH K. **Pineapple leaf fiber reinforced thermoplastic composites: Effects of fiber length and fiber content on their characteristics**. Journal of applied polymer science. p. 1952-1960, 2010.

COLOM, X.; CARRASCO, F.; PAGÈS, P.; CAÑAVALE, J. **Effects of different treatments on the interface of HDPE/ lignocellulosic fiber composites**. Terrassa, Composites Science

and Technology. V. 63. P. 161-169. 2003.

CORREIA, E. **Compósitos de matriz geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e sisal.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB. 2011.

COSTA, L. **Estudo da multiplicação de mudas de abacaxizeiro cv. Pérola via cultura de tecidos.** Revista Brasileira de Fruticultura, v. 42, n. 3, 2020.

COUTINHO, F; MELLO, I. **Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações.** Polímeros: Ciência e Tecnologia 2003, 13, 1.

CRESTANI, M.; BARBIERI, R, L.; HAWERROTH, F. J.; CARVALHO, F.; OLIVEIRA, A. **Das Américas para o Mundo: origem, domesticação e dispersão do abacaxizeiro.** Fitotecnia. V. 40, n. 6, 2010.

DUTTA, A.; BHOWMICK, A. K.; BOSE, S. **Comportamento de degradação térmica de fibras lignocelulósicas e seu efeito nas propriedades mecânicas de compósitos.** Journal of Composite Materials. V. 53, No. 1, p. 3-28. 2019.

FERREIRA, L. C.; TRINDADE, W. G.; FROLLINI, E.; KAWANO, Y. **Raman and infrared spectra of natural fibers.** In: Mattoso LHC, Leão A, Frollini E, editors. 5th international symposium on natural polymers and composites (ISNaPol 2004) proceedings, Sao Pedro, Brasil, 12–15. p. 269–71. 2014.

GANDARA, M.; ZANINI, N. C.; MULINARI, D. R.; SARON, C.; CAPRI, M. R. **Green composites using recycled plastic bags and pineapple fibers waste.** Rio de Janeiro, Journal of Composite Materials. V. 56. P. 1709-1724. 2022.

GARY, B.; COSTA, A.; BRAGIL, A. F.; COSTA, W. **Estudo térmico do PEAD e PEBD através de análise térmica differential scanning calorimeter (DSC).** Grupo Educacional Oswaldo Cruz. 2018.

GEORGE J e BHAGAWAN T. **Thermogravimetric & dynamic mechanical thermal**

**analysis of pineapple fibre reinforced polyethylene composites.** J Thermal Anal. V. 47. P. 1121–40. 1996.

GRILLO, C.C. **Reciclagem de rejeitos de polietileno de baixa densidade provenientes de uma cooperativa de catadores na forma de madeira plástica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Escola de engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2016.

GUIMARÃES, M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M. **Caracterização físico-química de fibra e polpas de Bambusa vulgaris Schrad para utilização em compósitos poliméricos.** Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Caracas. V. 33. 2013.

GURGEL, L. V. A. **Mercerização e modificação química da fibra do abacaxizeiro e do bagaço de cana-de-açúcar com anidrido succínico e trietilenotetramina: preparação de novos materiais quelantes para a adsorção de Pb (II), Cd (II), Cr (IV) e Cu (II).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – MG. 2017.

HIJOSA, C.; LOZANO, A. **From pineapple leaves to Piñatex: An innovative approach to sustainable fashion design.** Journal of Fashion Technology & Textile Engineering, 7(1), p.1-6. 2019.

HIJOSA, C. **Piñatex: An Innovative Natural Textile Made from Pineapple Leaf Fibre.** In The Handbook of Textile Culture (pp. 297-308). Bloomsbury Academic. 2017.

JEBASINGH D, J; GEBRIE, D. **An engineered alternative brick masonry unit for the poor inhabitants at Hawassa village, Etiopia.** International Journal Advanced Technology and Engineering Exploration: Ethiopia, v. 8, p. 717-734, 2021.

KAI, X.; LI, R.; YANG, T.; SHEN, S.; JI, Q.; ZHANG, T. **Study on the co-pyrolysis of rice straw and high density polyethylene blends using TG-FTIR-MS.** Energy Conversion and Management: China. V. 146. P. 20-33. 2017.

KAI, X.; YANG, T.; SHEN, S.; LI, R. **TG-FTIR-MS study of synergistic effects during coprolysis of corn stalk and high-density polyethylene (HDPE)**. Energy Conversion and Management: China. V. 181. P. 202-213. 2019

LAGE, C.; ARGOLLO, J.; SILVA, M. (Orgs.). **O Sisal Baiano**. Salvador: Ed. Governo do Estado da Bahia, 2002.

LAVORATTI, A.; ROMANZINI, D.; AMICO, S.; ZATTERA, A. **Influence of Fibre Treatment on the Characteristics of Buriti and Ramie Polyester Composites**. Polymers and Polymer Composites. v. 25, p. 247-256. 2017.

LEÃO, A.; CHERIAN, B. M.; NARINE, S.; SOUZA, S. F.; SAIN, M.; THOMAS, S. **The use of pineapple leaf fibers (PALFs) as reinforcements in composites**. Biofiber Reinforcement in Composite Materials, São Paulo. P.25. 2015.

LIMA, L. **Caracterização física e físico-química de diferentes cultivares de abacaxi ornamental**. Revista Brasileira de Fruticultura. V. 43(4), P. 217. 2021.

MARGEM, J; MARGEM, F.; SIMONASSI, N.; LOYOLA, R.; MONTEIRO, S. **Infra-red spectroscopy analysis of malva fibers**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências de Materiais. CBECIMAT 2012. Joinvile. SC. 2012.

MISHRA, S.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. **A Review on Pineapple Leaf Fibers, Sisal Fibers and Their Biocomposites**. Manchester: Macromolecular Materials and Engineering. V. 289. p. 955-974. 2004.

MOHANTY, S.; VERMA, S. K.; NAYAK, S. K. **Dynamic mechanical and thermal properties of MAPE treated jute/HDPE composites**. Chennai, Composites Science and Technology. V. 66. P. 538-547. 2005.

MOYA, R.; BERROCAL, A.; RODRÍGUEZ-ZUÑIGA, A.; RODRIGUEZ-SOLIS, M.; VILLALOBOS-BARQUERO, V.; STARBIRD, R.; VEGA-BAUDRIT, J. **Biopulp from Pineapple Leaf Fiber Produced by Colonization with Two White-Rot Fungi: Trametes versicolor and Pleurotus ostreatus**. San Jose: BioResources. V. 11. P. 8576-8776. 2016.

MUMFORD, L. **The City in History: Its Origins, Its Transformations, and Its Prospects.** New York: Harcourt, Brace & World, 1961.

NADIRAH, W. O.; JAWAID, M.; AL MASRI, A. A.; KHALIL, A.; SUHAILY, S. S.; MOHAMED, A. R. **Cell Wall Morphology, Chemical and Thermal Analysis of Cultivated Pineapple Leaf Fibres for Industrial Applications.** J Polym Environ. V. 20, p. 404–411. 2012.

NEGAWO, T; POLAT, Y; KILIC, A. **Effect of compatibilizer and fiber loading on ensete fiber-reinforced HDPE green composites: Physical, mechanical and morphological properties.** Istanbul: Elsevier. V. 213. P.

NUNES, M. **Entre o Capa Verde e a Redenção: a cultura do trabalho com o agave nos Cariris Velhos (1937-1966, Paraíba).** 2006. Tese (Doutorado em História), Universidade de Brasília. Brasília/DF, 2006.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 21: Rio Declaration on Environment and Development.** Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), Rio de Janeiro, Brasil. 1992.

PALANIYANDI, V. SIMONSEN, J. **Effect of compatibilizers on the crystallization kinetics of cellulose-filled high density polyethylene.** Instrumentation Science & Technology, v. 14(1), p. 73-83. 2003.

PERIYASAMY, D.; MANOHARAN, B.; AROCKIASAMY, F. S.; ARAVIND. D.; SENTHILKUMAR, K.; RAJINI, N.; MUHAMMED, F. F.; AL-LOHEDAN, H. A. **Exploring the recycling potential of HDPE films reinforced with flax fiber for making sustainable decorative tiles.** Materials Research and Technology, Tamil Nadu, v. 25, p. 2049-2060. 2023.

QUINTALIANI, C.; MERLI, F.; FIORINI, C. V.; CORRADI, M.; SPERANZINI, E.; BURATTI, C. **Vegetal Fiber Additives in Mortars: Experimental Characterization of Thermal and Acoustic Properties.** Sustainability, Perugia, v. 14, p. 12. 2022.

RIBEIRO, L. **Estudo da flamabilidade e resistência à chama de compósito de poliéster insaturado e fibra da folha de abacaxizeiro (PALF)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/ RN, 2011.

ROSA, M.; SANTULLI, C. **Environmental, social, and economic analysis of Piñatex®: The case of the Italian luxury fashion industry**. Journal of Cleaner Production, v. 279, 2021.

ROTICH, N. **Manufacturing of Bathroom Wall Tile Composites from Recycled Low-Density Polyethylene Reinforced with Pineapple Leaf Fiber**. Journal of Polymer Science. V. 2020, P. 9. 2020.

SADH, P.; CHAWLA, P.; KUMAR, S.; DAS, A.; KUMAR, R.; BAINS, A.; SRIDHAR, K.; DUHAN, J.; SHARMA, M. **Recovery of agricultural waste biomass: A path for circular bioeconomy**. Science of the Total Environment, Haryana. V. 870. P. 15. 2023.

SAENGSUWAN, S.; TONGKASEE, P.; SUDYOADSUK, T.; PROMARAK, V.; KEAWIN, T.; JUNGSUTTIWONG, S. **Non-isothermal crystallization kinetics and thermal stability of the in situ reinforcing composite films based on thermotropic liquid crystalline polymer and polypropylene**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. v. 103, n. 3, p. 1017-1102. 2021.

SANTOS, A. S. F.; AGNELLI, J. A. M.; MANRICH, S. **Estudo da influência de resíduos catalíticos na degradação de plásticos reciclados (blenda/HDPE/PP e PET) provenientes de lixo urbano**. Polímeros: Ciência e Tecnologia. v. 9, n.4, p. 189-194. 2020.

SANTOS, I. **Caracterização físico-química de fibra e polpas de Bambusa vulgaris Schrad para utilização em compósitos poliméricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade de Brasília/DF, 2008.

SARKER, M. **Extraction and characterization of cellulose nanofibers from pineapple leaf fibers**. Journal of Natural Fibers, v. 16, n. 3, p. 319-331, 2019.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. **Studies on Lignocellulosic fibers of Brazil. Part I - Source, production, morphology, properties and applications.** Composites: Part A. v. 38, p.1694-1709. 2017.

SCHMIDT, R III; AUSTIN, S. **Adaptable Architecture: Theory and Practice.** Nova York: Routledge, 2017.

SEIN, H.; YEE, K. T.; MAUNG, M. M.; THEINGI, M. **Preparation And Characterization of Cellulose Nanofibres From Pineapple Leaf Fibres And Sugarcane Bagasse.** Journal Myanmar, Rangum, v. 18, p. 10. 2020.

SILVA, E; MOITA NETO, J. **Possibilidades de melhorias ambientais no processo de reciclagem do polietileno.** Teresina: Polímeros. V. 26. P. 49-54. 2016.

SILVA, O.; BELTRÃO, N. (Org.). **Agronegócio do sisal no Brasil.** Brasília: Embrapa-SPI / Embrapa-CNPA, 1999. p. 205. Disponível em: <https://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00064760.pdf> Acesso em: 19 jul. 2022.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada do óleo de mamona e fibras vegetais.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). São Carlos: USP, 2003.

SINGH, Y.; KUMAR, J.; NAIK, T. P.; PABLA, B. S.; SINGH, I. **Processing and characterization of pineapple fiber reinforced recycled polyethylene composites.** Material Today: Proceedings. p. 5. 2021.

SIREGAR, J. **The Effect of Maleic Anhydride Polyethylene on Mechanical Properties of Pineapple Leaf Fibre Reinforced Polylactic Acid Composites.** International Journal of Precision Engineering and Manufacturing- Green Technology, Pahang. P. 12. 2018.

VIEIRA, A; BORBA, C; RODRIGUES, J. **COBOGÓ De Pernambuco.** 1ª Ed. – Pernambuco. Josivan Rodrigues dos Santos, 2012.

XANTHOPOULOU, E.; CHRYSAFI, I.; POLYCHRONIDIS, P.; ZAMBOULIS, A.; BIKIARIS, D. **Evaluation of Eco-Friendly Hemp-Fiber-Reinforced Recycled HDPE Composites.** Composites Science, Thessaloniki. V. 138. P. 21. 2023.

XIAO, Y.; LIU, Y.; WANG, X.; LI, M.; LEI, H.; XU, H. **Cellulose nanocrystals prepared from wheat bran: Characterization and cytotoxicity assessment.** International Journal of Biological Macromolecules. v. 140, n. 1, p. 225-233. 2019.