



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA BACHARELADO COM HABILITAÇÃO INDUSTRIAL

LUANA BERNARDINO DAMASCENO

**USO DE RESÍDUOS DA CAJUCULTURA PARA A PRODUÇÃO DE EMBALAGENS
DE POLPA MOLDADA**

FORTALEZA
2025

LUANA BERNARDINO DAMASCENO

USO DE RESÍDUOS DA CAJUCULTURA PARA A PRODUÇÃO DE EMBALAGENS DE
POLPA MOLDADA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Química com
habilitação industrial do Centro de Ciências da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Química.

Orientadora pedagógica: Prof.^a Dr.^a Maria
Alexsandra de Sousa Rios.

Orientador profissional: Dr. Adriano Lincoln
Albuquerque Mattos.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- D162u Damasceno, Luana Bernardino.
 Uso de resíduos da cajucultura para a produção de embalagens de polpa moldada / Luana Bernardino Damasceno. – 2025.
 61 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2025.
 Orientação: Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios,.
 Coorientação: Profa. Dra. Adriano Lincoln Albuquerque Mattos.
1. Polpa moldada. 2. Cajucultura. 3. Economia circular. 4. Propriedades de barreira. 5. Ensaios mecânicos. I. Título.

CDD 540

LUANA BERNARDINO DAMASCENO

USO DE RESÍDUOS DA CAJUCULTURA PARA A PRODUÇÃO DE EMBALAGENS DE
POLPA MOLDADA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Química com
habilitação industrial do Centro de Ciências da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Química.

Aprovada em: 10/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Maria Alexsandra de Sousa Rios (Orientadora pedagógica)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Adriano Lincoln Albuquerque Mattos (Orientador profissional)
Embrapa Agro Industria Tropical

Dr. Men de sá Moreira de Souza Filho
Embrapa Agro Industria Tropical

A Deus.

Aos meus pais, Alexandre Oliveira Damasceno
e Cynara Gadelha Bernardino.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho. Inicialmente a Deus pela minha vida, família e oportunidades.

Aos meus pais, Alexandre e Cynara e minha irmã, Sofia, por toda a ajuda e apoio em todos os momentos da minha caminhada, por sempre acreditarem em mim e me fornecerem forças para continuar.

A toda minha família que sempre vibrou com minhas conquistas, me incentivou e são minha base, avós, tios e primos. Agradeço também ao meu namorado, Caio, que esteve ao meu lado desde o início dessa trajetória, me deu amparo em todos os momentos e me ajudou a seguir em frente. Aos colegas e amigos que estiveram ao meu lado nessa trajetória, em especial, minha melhor amiga Gloria, por todos os momentos compartilhados.

Ao GRINTEQUI, que foi onde iniciei minha trajetória na iniciação científica e permaneço até hoje. Agradeço a todos que fazem ou já fizeram parte do laboratório, por todo o conhecimento e ensinamentos compartilhados. Em especial agradeço a Professora Dr.^a Maria Alexsandra, que me acolheu, apoiou e ensinou muito ao longo desses anos.

Ao meu orientador profissional Dr. Adriano Mattos, por toda dedicação, ensinamentos e paciência durante o período do estágio, ao IC Douglas, que me ajudou na realização do trabalho, ao membro da banca, Dr. Men de sá, pelo conhecimento e histórias compartilhadas, ao analista Alex pela produção dos suportes de secagem em impressora 3d e a toda equipe do LTB que me acolheu nesse período.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), pela minha formação acadêmica e por me proporcionar uma experiência universitária, bem como ao órgão de fomento da minha bolsa de Iniciação Científica, CNPq.

Nada na vida é para ser temido, é apenas para ser compreendido. Agora é o momento de entender mais, para que possamos temer menos. (Marie Curie, 1867 - 1934).

RESUMO

A geração de resíduos plásticos é uma preocupação mundial, uma vez que o consumo desenfreado e o descarte inadequado ocasionam diversos problemas ambientais em todos os ecossistemas do planeta, interferindo na água, solo, clima e em diversas espécies de animais. Nesse sentido, em consonância com os conceitos da economia circular, o estudo visou desenvolver diferentes formulações para a produção de embalagens de polpa moldada utilizando resíduos da cajucultura, quais sejam, a fibra da madeira do cajueiro advinda das suas podas periódicas e a fibra bruta do caju, ou bagaço, obtido como rejeito da indústria de beneficiamento do pedúnculo do caju. Foram testadas três formulações para a produção da polpa moldada: 100% de fibra da madeira do cajueiro; 10% de fibra bruta de caju e 90% de fibra da madeira do cajueiro; 20% de fibra bruta do caju e 80% de fibra da madeira do cajueiro. As fibras passaram por tratamento alcalino e em seguida foi feita uma suspensão com 0,4% de matéria seca e água destilada, que posteriormente foi drenada para formar a polpa moldada. Logo após foi realizado um processo de prensagem a frio, seguido de uma secagem por 24 horas, que antecedeu uma prensagem a quente com pressão de 8,87 MPa. Para verificar a efetividade do tratamento alcalino, foram realizadas análises lignocelulósicas nas fibras, com e sem tratamento. Visando verificar a qualidade da fibra moldada foram feitos ensaios mecânicos, de tração e flexão. Objetivando verificar as propriedades de barreira, realizou-se análise de ângulo de contato, inchamento, absorção de água e permeabilidade a vapor de água, nos quais foi possível constatar que a presença de bagaço na formulação causou alterações na textura e densidade do material, tornando o produto menos hidrofílico. Além disso, a análise de PVA verificou um valor inadequado para utilização em embalagens de alimentos com alta atividade de água. Portanto, obteve-se um material de polpa moldada de boa qualidade, classificado como tipo 3 de acordo com o IMFA, composto apenas por resíduos (madeira do cajueiro e bagaço de caju), que pode ser aperfeiçoado com a utilização de ceras ou aditivos para impermeabilização.

Palavras-chave: polpa moldada; cajucultura; embalagem; economia circular; propriedades de barreira; ensaios mecânicos

ABSTRACT

The generation of plastic waste is a global concern, as uncontrolled consumption and improper disposal cause numerous environmental problems across all ecosystems on the planet, impacting water, soil, climate, and various animal species. In this context, in line with the concepts of the circular economy, the study aimed to develop different formulations for the production of molded pulp packaging using waste from cashew cultivation, namely, the wood fiber from the cashew tree resulting from its periodic pruning and the raw cashew fiber, or pomace, obtained as a byproduct of the cashew nut processing industry. Three formulations for the production of molded pulp were tested: 100% cashew tree wood fiber; 10% raw cashew fiber and 90% cashew tree wood fiber; 20% raw cashew fiber and 80% cashew tree wood fiber. The fibers underwent alkaline treatment and then a suspension was made with 0.4% dry matter and distilled water, which was subsequently drained to form the molded pulp. A cold pressing process was then performed, followed by a 24-hour drying period, which preceded a hot-pressing process at a pressure of 8.87 MPa. To verify the effectiveness of the alkaline treatment, lignocellulosic analyses were conducted on the fibers, with and without treatment. To assess the quality of the molded fiber, mechanical tests for tension and bending were carried out. Aiming to examine the barrier properties, contact angle, swelling, water absorption, and water vapor permeability were analyzed, which showed that the presence of pomace in the formulation caused changes in the texture and density of the material, making the product less hydrophilic. Additionally, the PVA analysis revealed an unsuitable value for use in food packaging with high water activity. Therefore, a molded pulp material of good quality was obtained, classified as type 3 according to the IMFA, composed solely of waste (cashew tree wood and cashew pomace), which can be improved with the use of waxes or additives for waterproofing.

Keywords: molded pulp; cashew farming; packaging; circular economy; barrier properties; mechanical tests

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Fruto do cajueiro (<i>Anacardium occidentale</i> L.) chamado de castanha e seu pseudofruto o pedúnculo	17
Figura 2	- Qualidade /preço de produtos de fibra moldada em função da fonte da fibra processo de moldagem e pós tratamento	22
Figura 3	- Exemplos de embalagens da polpa moldada encontradas no mercado atualmente, sendo (a) Frasco de bomba de fibra moldada e embalagens de cosméticos em cores vibrantes; (b) Protótipo de uma garrafa de cerveja fabricada com fibra moldada; (c) caixa de pizza; (d) Embalagem industrial geral	23
Figura 4	- Estrutura molecular da celulose	24
Figura 5	- Balança de infravermelho para realização da análise de teor de matéria seca	29
Figura 6	- Extração da madeira do cajueiro em triplicata, utilizando o Sistema Soxhlet	31
Figura 7	- Resumo do passo a passo para a realização da análise de determinação do teor de lignina insolúvel	32
Figura 8	- Resumo do passo a passo para obtenção do teor de holocelulose	33
Figura 9	- Resumo do processo para obtenção do teor de alfacelulose das amostras	35
Figura 10	- Sistema adaptado para drenagem, visando a formação de corpos de provas de polpa moldada	36
Figura 11	- Suporte para secagem dos corpos de prova de polpa moldada, produzido em impressora 3D	37
Figura 12	- Fluxograma do processo de produção dos corpos de provas de polpa moldada	37
Figura 13	- Máquina universal para ensaio mecânico: a) garra para ensaio de flexão; b) garra para ensaio de tração	38
Figura 14	- Espectrofotômetro da marca Konica Minolta modelo CM – 5	39

Figura 15	- Ensaio de absorção e inchamento	40
Figura 16	- Células de permeação para análise de PVA e dessecador vertical Arsec DCV040	41
Figura 17	- a) amostra de polpa moldada composta por 100% de fibra da madeira do cajueiro; b) amostra composta por 10% de fibra bruta de caju e 90% de fibra da madeira do cajueiro; c) amostra composta por 20% de fibra bruta de caju e 80% de fibra da madeira do cajueiro	42
Figura 18	- a) Tensão de tração máxima (MPa) por deformação (mm) da composição 0FC; b) Tensão de tração máxima (MPa) por deformação (mm) da composição 10FC; c) Tensão de tração máxima (MPa) por deformação (mm) da composição 20FC.....	46
Figura 19	- a) média móvel de força (N) por deformação (mm) da composição 0FC; b) média móvel de força (N) por deformação (mm) da composição 10FC; c) média móvel de força (N) por deformação (mm) da composição 20FC	48
Figura 20	- Imagens utilizadas para calcular o ângulo de contato da gota de água nos corpos de provas de polpa moldada com diferentes formulações, sendo a) 100% Fibra da madeira de cajueiro; b) 90% fibra da madeira de cajueiro e 10% da fibra do bagaço de caju; c) 80% fibra da madeira de cajueiro e 20% da fibra do bagaço de caju	49
Figura 21	Corpos de prova pós ensaio de inchamento; sendo a) a composição sem bagaço; b) com 10% de bagaço e c) com 20% de bagaço	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Composição química da fibra bruta de caju pré e pós tratamento e da fibra da madeira do cajueiro pré e pós tratamento, respectivamente FC, FCT, FM e FMT. Base seca	44
Tabela 2	- Valor médio da resistência máxima a flexão e do modulo de elasticidade das amostras compostas por 100% de fibra de madeira (0FC), 90% de fibra de madeira e 10% de fibra de caju (10FC) e 80% de fibra de madeira e 20% de fibra de caju (20FC)	46
Tabela 3	- Parâmetros de cor das amostras de polpa moldada, sendo 0FC composta por 100% de fibra da madeira do cajueiro; 10FC composta por 90% de fibra da madeira do cajueiro e 10% de fibra do bagaço de caju; 20FC composta por 80% de fibra da madeira do cajueiro e 20% de fibra do bagaço de caju	49
Tabela 4	- Valores de espessura antes e após ensaio de inchamento e grau de inchaço de cada amostra de polpa moldada, 0FC, 10FC e 20FC	50
Tabela 5	- Valores de massa antes e após ensaio de absorção, grau de absorção e densidade de cada amostra de polpa moldada, 0FC, 10FC e 20FC	51
Tabela 6	- Permeabilidade ao vapor de água e espessura dos corpos de prova de polpa moldada, sendo 0FC composto 100% de fibra da madeira do cajueiro, 10FC composto por 10% de fibra do bagaço de caju e 90% de fibra da madeira do cajueiro, 20FC composto por 20% de fibra do bagaço de caju e 80% de fibra da madeira do cajueiro	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ΔP	Diferença entre a pressão parcial da atmosfera na sílica gel e na água pura a 25°C
μm	Micrometro
0FC	Polpa moldada composta por 100% de fibra bruta da madeira do cajueiro
10FC	Polpa moldada composta por 90% de fibra bruta da madeira do cajueiro e 10% de fibra bruta do caju
20FC	Polpa moldada composta por 80% de fibra bruta da madeira do cajueiro e 20% de fibra bruta do caju
A	Área de permeação em metro quadrado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Ângulo de contato
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
FC	Fibra bruta do caju
FCT	Fibra bruta do caju tratada
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FM	Fibra da madeira do cajueiro
FMT	Fibra da madeira do cajueiro tratada
g	Gramma
ha	Hectares
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMFA	International Molded Fiber Association
IUCN	International Union for Conservation of Nature
Kg	Kilograma
kPa	Kilopascal
LCC	Líquido da casca da castanha
m/m	Porcentagem em massa
m ²	Metro quadrado
MA	Massa da amostra
MAH	Massa da amostra de holocelulose
MF	Massa do funil limpo e seco
MFA	Massa do funil pós alfacelulose

MFH	Massa do funil pós holocelulose
MFL	Massa do funil somada a massa da lignina
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
MPa	Megapascal
MR	Massa do recipiente
MRAC	Massa do conjunto (recipiente + amostra) calcinado
MRASE	Massa do conjunto recipiente/amostra sem extrativos
MRC	Massa do recipiente calcinado
N	Newton
nm	Nanômetros
PAE	Poliamida-epicloridrina
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PVA	Permeabilidade à vapor da água
RAs	Resíduos Agrícolas
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
TA%	Teor de alfacelulose percentual
TC%	Teor de cinzas percentual
TE%	Teor de extrativos percentual
TH%	Teor de holocelulose percentual
TLI%	Teor de lignina percentual
TMS	Teor de matéria seca
TU%	Teor de umidade percentual
X	Espessura média dos corpos de prova em metro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Economia circular	18
2.2	Embalagem para alimentos	19
2.3	Polpa Moldada	20
2.4	Fibra Celulósica	23
2.5	Caju	25
3	OBJETIVOS	27
3.1	Objetivo geral	27
3.2	Objetivos específicos	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Matéria prima	28
4.2	Tratamento das matérias primas	28
4.3	Análise lignocelulósica	29
<i>4.3.1</i>	<i>Umidade</i>	<i>29</i>
<i>4.3.2</i>	<i>Cinzas</i>	<i>30</i>
<i>4.3.3</i>	<i>Extrativos.....</i>	<i>30</i>
<i>4.3.4</i>	<i>Lignina</i>	<i>31</i>
<i>4.3.5</i>	<i>Holocelulose</i>	<i>32</i>
<i>4.3.6</i>	<i>Alfacelulose</i>	<i>33</i>
4.4	Produção dos corpos de prova de polpa moldada	35
4.5	Ensaio mecânicos	38
4.6	Ângulo de contato	39
4.7	Colorimetria	39
4.8	Absorção e inchamento	39
4.9	Permeabilidade à vapor da água	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	Produção dos corpos de prova	42
5.2	Composição química das amostras	42
5.3	Ensaio mecânicos	44
<i>5.3.1</i>	<i>Ensaio de tração</i>	<i>44</i>

5.3.2	<i>Ensaio de flexão</i>	47
5.4	Ângulo de contato	49
5.5	Colorimetria	50
5.6	Inchamento	50
5.7	Absorção de água	52
5.8	Permeabilidade ao vapor de água	53
6	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O modelo econômico atual, que se baseia em uma abordagem linear predominantemente pautada em ações como "pegar, fazer, usar, jogar", levará o mundo a uma maior degradação ambiental e a um cenário de escassez de recursos (CERDÁ, 2016). Nesse sentido, surge o termo economia circular, o qual representa um modelo de economia industrial que é, por projeto ou intenção, restaurador e que se concentra no conceito de ciclos contínuos (cradle-to-cradle principles) e na sustentabilidade dos materiais. Dentro dessa perspectiva, a gestão de resíduos desempenha um papel crucial na economia circular (COSENZA, 2020).

Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, PNUMA, o mundo produz 430 milhões de toneladas de plástico anualmente, destes, apenas 9% são reciclados. Estima-se que foram geradas 139 milhões de toneladas métricas de resíduos plásticos descartáveis em 2021 (ONU, 2023).

Atualmente os resíduos plásticos são encontrados em todos os ecossistemas do planeta, nas águas, solo e até no ar, por meio de toxinas liberadas devido a sua queima. Isso se deve ao fato de que polímeros convencionais, derivados do petróleo, têm degradação lenta, podendo levar até 450 anos para sua total mineralização (CHAMAS, 2020).

Além disso, os plásticos podem ser classificados como: plásticos com avaria, macroplásticos (>5 mm), microplásticos (5 mm - $0,1$ μ m) ou nanoplásticos ($<0,1$ μ m). De acordo com estudos, os microplásticos podem permanecer em solos por mais de 100 anos, devido à baixa luz e condições de oxigênio (HORTON, 2017). Sendo assim, os plásticos se acumulam no meio ambiente, causando impactos como a morte de animais, seja por ingestão e bloqueio de seu trato digestivo, ou intoxicação pelos aditivos presentes em sua composição. Além do que, animais podem morrer por aprisionamento ou sufocamento, ao se prenderem em plásticos dispostos inadequadamente em seu habitat.

Nesse sentido, segundo a International Union for Conservation of Nature (IUCN), desde a década de 1950 apenas 10% dos plásticos produzidos foram reciclados, motivo pelo qual se faz necessária a adoção de outras alternativas para combater a poluição, além da reciclagem (IUCN, 2022).

Conforme o relatório da PNUMA, para reduzir a poluição plástica em 80% até o ano de 2040, são necessárias três ações no mercado: reutilizar, reciclar e reorientar. Nesse viés, uma redução de 17% na poluição plástica, segundo o mesmo relatório, pode ser proporcionada com a substituição de embalagens plásticas, sachês e embalagens para viagens, por materiais alternativos, como papel (ONU - BRASIL, 2023).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Plástico, ABIPLAST, no ano de 2023 foram produzidos no país 7,04 milhões de toneladas de produtos plásticos, enquanto o consumo atingiu 7,49 milhões. Um dos setores que têm maior participação nas vendas de plástico é a indústria alimentícia com 19,98%, perdendo apenas para a construção civil, que lidera o ranking com 28,32% (ABIPLAST, 2024).

Dentro desse contexto, um dos possíveis substitutos para as embalagens plásticas utilizadas em alimentos são as produzidas com polpa de papel moldada, a qual consiste em uma pasta formada a partir de papel reciclado, fibras vegetais e água, podendo ser moldada de forma plana ou complexa. Normalmente na produção de polpa moldada são utilizadas fibras de madeira virgem, visando otimizar o desempenho do produto final, assim como fibras recicladas advindas de resíduos de papel e de papelão (DEBNATH, 2022).

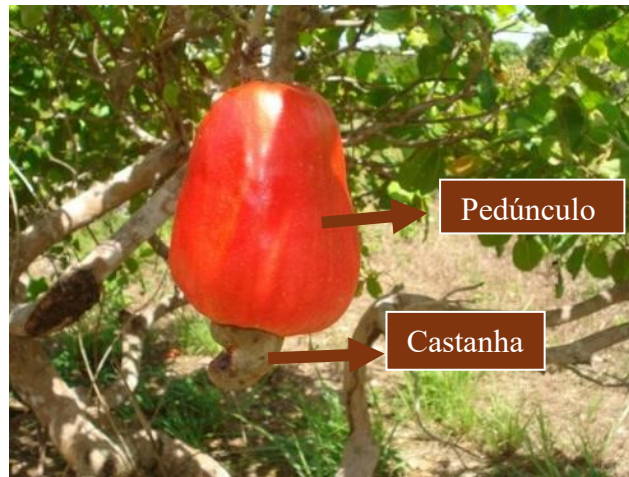
Atualmente a utilização de resíduos agrícolas (RAs) como matérias-primas alternativas vem sendo expandida, visto que eles podem ser usados para produzir celulose e papel com propriedades aceitáveis, reduzindo o uso de madeiras. Polpas de RAs, principalmente bagaço e bambu, já são amplamente utilizadas para a produção de embalagens de alimentos à base de papel e recipientes de celulose moldada (RATTANAWONGKUN, 2020).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil possuía em 2020 426,1 mil hectares (ha) plantados com cajueiro (*Anacardium occidentale L*), localizados principalmente na Região Nordeste (99,7%). O principal produtor nordestino é o Ceará, onde se encontra mais da metade da área colhida (63,5%). Além disso, cerca de 85% da área cultivada do Nordeste brasileiro com cajueiros está ocupada por cajueiro comum, com idade avançada, que possuem um percentual elevado de falhas e baixa produtividade. Uma das principais ferramentas utilizadas para a recuperação dessas plantações é a substituição de copas, que consiste no corte integral da copa da planta e o posterior enxerto dos brotos que surgirão no tronco remanescente, com garfos de clones de genética superior. A adoção dessa tecnologia, aliada às podas periódicas que são recomendadas para a planta, quais sejam, a de formação, a de limpeza e a de manutenção, resulta em uma considerável oferta de lenha. A produção de lenha entre 2012 e 2015 foi estimada em 1,2 milhões de estéreis na substituição de copas de cerca de 15.000 ha. Geralmente, esse material é usado para fim doméstico ou vendido para padarias, olarias, cerâmicas e, muitas vezes, ocorre a queima a céu aberto na própria plantação (RIBEIRO, 2008; MATTOS, 2017).

Já o caju é composto por duas partes distintas, como mostra a figura 1, correspondendo em média a uma distribuição - em peso - de 10% de castanha (fruto) e 90%

de pedúnculo (pseudofruto) (SILVA, 2000). O Brasil é um grande produtor mundial de pedúnculo de caju, tendo produzido em 2020 cerca de 1,100 milhões de toneladas (BNB, 2022).

Figura 1- Fruto do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) chamado de castanha e seu pseudofruto o pedúnculo.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2021

Além disso, ele possui pioneirismo na industrialização do pedúnculo do caju, sendo o maior consumidor de derivados industriais como sucos, cajuínas e doces (OLIVEIRA, 2019). Por outro lado, a cultura do caju apresenta um baixo nível de aproveitamento do pedúnculo, com o desperdício de 80% a 90% da sua produção, valendo ressaltar que no processo de beneficiamento são gerados rejeitos, notadamente o bagaço de caju, o qual é obtido do processamento do pseudofruto. Cerca de 15% do total de pedúnculo processado é formado por esse resíduo (QUEIROZ, 2010).

Com isso, o trabalho avaliou o uso de resíduos da cajucultura, como a fibra bruta de caju (bagaço de caju) e a fibra da madeira do cajueiro (SisGen A9FA0C3), oriunda das podas realizadas nas plantações, para a produção de embalagens de polpa moldada proveniente 100% de resíduos agrícolas.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Economia circular

O modelo econômico atual, linear, que se baseia na extração de matéria prima e sua transformação em produtos, gerando resíduos tanto em seu processo de produção, como também após o seu consumo, tem trazido preocupações de âmbito mundial, devido ao uso excessivo dos recursos naturais em um ritmo mais acelerado do que sua capacidade de regeneração, bem como a formação de montanhas de resíduos urbanos (COSENZA, 2020).

Nesse sentido, os resíduos, cada vez mais presentes, poderiam ter diversas destinações, como a reciclagem e o reuso, porém são majoritariamente descartados de forma inadequada. Na Europa e nos Estados Unidos cerca de 70% dos resíduos estão em aterros sanitários, já o Brasil destina 96% de seus resíduos diretamente para os aterros, sem reciclar e efetuar o devido tratamento da fração não reciclável, o que pode vir a trazer graves danos ao meio ambiente e à saúde pública (SANTANA, 2024; ABREN, 2021).

A forte pressão exercida pela sociedade moderna, em relação à preservação dos recursos naturais do planeta, exige uma reorientação do modelo econômico atual, buscando aplicar uma metodologia de produção-consumo mais sustentável (SIMÕES, 2017). Nessa perspectiva, o conceito de economia circular é apresentado como uma solução alternativa e viável para romper com esse o modelo linear (COSENZA, 2020).

Desde a década de 1980 começaram as exigências de se repensar as estratégias e modelos de mercado, de modo a garantir a competitividade dos setores industriais sem uma degradação excessiva dos recursos naturais, alterando-se o tradicional modelo de economia linear para o modelo de economia circular, que, em termos práticos, refere-se a um modelo de economia industrial que é, por projeto ou intenção, restaurador e que se fundamenta no conceito de ciclos contínuos (cradle-to-cradle principles) e na sustentabilidade dos materiais (COSENZA, 2020).

Portanto, a economia circular é a resposta ao desejo de um crescimento sustentável no contexto da pressão crescente que a produção e o consumo exercem sobre o ambiente e os recursos naturais mundiais (CE, 2014). Com efeito, dentro da perspectiva de avanço para a economia sustentável, faz-se necessário a reutilização dos resíduos conforme as suas características e especificidades, sendo, dessa forma, reinseridos nos processos produtivos ou reutilizados em outras empresas ou utilidades (COSENZA, 2020).

Segundo COSENZA, 2020, são necessárias sete ações de nível macro, que englobam os principais elementos a serem considerados no desenvolvimento e implementação da economia circular no Brasil, com base no Plano de Ação da União Europeia para a Economia Circular (CE, 2014) e no Plano de Ação para a Economia Circular de Portugal (PAEC, 2017). Atualmente no Brasil a mais adotada é a quinta ação, denominada "nova vida aos resíduos: resíduos, subprodutos e matérias-primas secundárias", por meio da política de logística reversa. Assim, a reutilização dos resíduos se torna essencial para o avanço da economia circular no país.

2.2 Embalagem para alimentos

Embalagem significa invólucro usado para conter, proteger, transportar e/ou apresentar mercadorias. Estima-se que as primeiras embalagens surgiram na pré-história há cerca de 10.000 anos, porém com a evolução da sociedade e o nascimento do comércio, a necessidade de se preservar o que era vendido se tornou essencial. Hoje as embalagens, além de conservar, desempenham o papel de representar os produtos que acondicionam e são projetadas se utilizando de uma linguagem visual com a pretensão e a intenção de “substituir” o vendedor (STEFANO, 2012).

Segundo a Associação Brasileira de Embalagem (ABRE), no Brasil, até 1945, poucos produtos eram comercializados pré-condicionados. Já nos dias atuais, de acordo com estudo da Fundação Getúlio Vargas (FGV), o valor bruto da produção física de embalagens no Brasil atingiu em 2023, o montante de R\$ 144,4 bilhões, o que representa um crescimento na ordem de 17,21% em relação ao ano de 2022. Dentre as atividades que apresentam influência na produção de embalagens, se destacam o setor alimentício e agropecuário (ABRE, 2022).

Conforme a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), as embalagens alimentícias são o artigo que está em contato direto com os alimentos, destinado a contê-los desde a sua fabricação até a sua entrega ao consumidor -RDC nº. 91/01- (ANVISA, 2001). Em geral seu principal objetivo é proteger o produto, com a finalidade de preservar as características do alimento, por meio das propriedades de barreira aos fatores ambientais, tais como luz, umidade, oxigênio e microrganismos, mantendo o produto sem alterações indesejáveis durante o transporte e armazenamento (SARANTÓPOULOS, 2002).

De acordo com o artigo 8º da Lei n. 9.782/99 é atribuída à ANVISA a competência de regulamentar, controlar e fiscalizar os produtos e serviços que envolvam risco à saúde

pública, dentre eles embalagens para alimentos (ANVISA, 2024). São reconhecidos os seguintes tipos de materiais que compõe as embalagens e equipamentos para alimentos: materiais plásticos, incluídos os vernizes e revestimentos; celulose regenerada; elastômeros e borrachas; vidro; metais e suas ligas; madeira, incluindo a cortiça; produtos têxteis; ceras de parafina e micro cristalinas, entre outros (ANVISA, 2001).

Vale ressaltar que algumas normas estabelecem princípios gerais referentes aos materiais que entram em contatos com produtos alimentícios. Como exemplo, pode-se citar a resolução da diretoria colegiada (RDC) nº 88 de 2016, que se aplica aos materiais, embalagens e equipamentos produzidos a base de celulose destinados a entrar em contato com alimentos (ANVISA, 2021).

As embalagens de celulose moldada, que geralmente são feitas com fibras celulósicas recuperadas, são usadas desde o final do século XIX para fabricação de caixas de ovos e estão sendo cada vez mais usadas para transporte de objetos tridimensionais (DIDONE et al. 2017; SU et al. 2018; KEYES 1890). Por muito tempo, a tecnologia foi limitada a produtos de baixo custo, porém com os avanços tecnológicos e preocupações ambientais, suas demandas de mercado vem aumentando. Esses produtos estão sendo usados em embalagem industriais, de aparelhos elétricos e eletrônicos como impressoras e computadores (DEBNATH et al, 2022).

2.3 Polpa Moldada

A polpa de papel moldada é uma tecnologia tridimensional de fabricação de papel, em que uma pasta que pode conter, principalmente, água e cerca de 3 a 5% de fibras, pode ser moldada de forma plana ou complexa. Os produtos de celulose moldada surgiram pela primeira vez no século XIX e, nos últimos anos, a adoção desse tipo de embalagem pelo consumidor tem crescido, pois devido à má gestão e a difícil decomposição, muitos resíduos de embalagens plásticas de alimentos são produzidos globalmente todos os dias. Os produtos de fibra moldada são feitos por algumas fibras lignocelulósicas, sendo renováveis e biodegradáveis. Assim, as embalagens de polpa moldada podem de fato reduzir o desperdício ambiental e a poluição plástica (DEBNATH et al, 2022; LIU Y et al, 2023; ZHANG et al, 2022).

A fibra moldada e seus produtos sustentáveis têm atraído cada vez mais atenção em várias aplicações, devido à sua renovabilidade, reciclabilidade, sustentabilidade e biodegradabilidade. Peças de polpa moldada têm sido usadas comercialmente em diferentes

mercados de embalagens, como para itens alimentícios (bandejas para ovos e frutas), industriais (eletrônicos e peças de veículos), descartáveis (comadres e frascos de urina) e hortícolas (LIU Y et al, 2023; ZHANG et al, 2022).

Diversas matérias primas, virgens ou recicladas, podem ser usadas para a produção de celulose moldada, como a fibra de madeira, de bambu, de bagaço, de palha, entre outras. Com a finalidade de fabricar polpa moldada para embalagens de alimentos, a madeira é a mais comumente utilizada. (LIU Y et al, 2023; ZHANG et al, 2022; RATTANAWONGKUN et al, 2020).

Nesse sentido, as fibras recicladas, assim como as virgens, são fontes importantes de fibras naturais para produtos de polpa moldada, podendo ser resíduos de papel de escritório, papelão ondulado, jornal, papel cartão, entre outros. Uma característica importante para a matéria prima de produção de papel moldado é o percentual do teor de celulose que está presente, em alto nível, em alguns resíduos agrícolas (LIU Y et al, 2023; ZHANG et al, 2022; RATTANAWONGKUN et al, 2020).

Além disso, outras vantagens dos resíduos agrícolas são a abundância, o baixo custo, a pronta disponibilidade e um ciclo de vida muito curto. Ressalta-se ainda que a sua polpação requer menos produtos químicos, tempo e consumo de energia devido ao seu menor teor de lignina em comparação com a madeira (SAEED, 2017). As propriedades das polpas extraídas desse tipo de resíduos variam amplamente dependendo da dimensão, estrutura e composição química das fibras. Pesquisas encontradas na literatura demonstraram um aumento significativo na resistência de amostras de papel misturadas com fibras de resíduos agrícolas, devido as suas boas características e capacidade de se moldar em torno de outras e criar excelentes ligações entre elas (RATTANAWONGKUN et al, 2020).

Polpas de bagaço e bambu, já são amplamente utilizadas para a produção de embalagens de alimentos à base de papel e recipientes de polpa moldada. Como uma fonte rica de celulose, as propriedades básicas do bagaço são adequadas para a fabricação desse tipo de produto. No entanto, visando melhorar as propriedades dos produtos de polpa moldada obtidos quando usados sozinhos, pode-se tentar misturá-lo com diferentes fontes de celulose, para obter aprimoramento contributo (EUGENIO et al, 2019).

De acordo com a International Molded Fiber Association (IMFA), os produtos de celulose moldada podem ser categorizados de quatro maneiras. O primeiro, se caracteriza por uma parede de espessura que varia de 5 a 10 mm, é conhecido como "parede espessa" e normalmente são utilizados para embalagens de itens mais pesados e não frágeis. O segundo tipo é conhecido como "*Transfer Molded*", o qual possui paredes mais finas, variando de 3 a

5 mm, com superfícies relativamente lisas nos dois lados e melhor precisão dimensiona. Tem uma gama de usos, como em embalagens de produtos eletrônicos, hospitalares e alimentícios. O terceiro tipo é conhecido como “termoformado” ou “parede fina”, sendo fabricado com a utilização de múltiplos moldes aquecidos e possuindo espessura variando de 2 a 4 mm, com boa precisão dimensional, superfícies lisas e rígidas. Por fim, tem-se os produtos de fibra moldada “processados”. Este tipo abrange produtos que precisam de processamento adicional ou manuseio específico, além da simples moldagem e cura. Para o processo de fabricação, as notas e a qualidade, bem como o preço dos produtos moldados, aumentam do Tipo 1 (parede espessa) para o Tipo 3 (parede fina) e aumentam ainda mais sob o tratamento do Tipo 4 (processado), como é demonstrado na figura 2. (LIU et al, 2023; DEBNATH et al, 2022; ZHANG et al, 2022).

Figura 2 - Qualidade /preço de produtos de fibra moldada em função da fonte da fibra, processo de moldagem e pós-tratamento



A resistência mecânica dos produtos de celulose moldados é um fator importante que afeta sua aplicação mais ampla, sendo que essas características podem ser expostas por testes de tensão e deformação ou flexão. O acréscimo de resinas como a de poliamida-epicloridrina (PAE) e o amido catiônico pode melhorar as propriedades mecânicas da polpa moldada. Além disso, trabalhos presentes na literatura mostraram que o uso de nanofibras de

celulose pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas de materiais à base de papel e diminuir a porosidade (LIU, 2023; DEBNATH, 2022).

De acordo com Jacobson, 2017, fibras Kraft não refinadas, quando formadas em folhas de celulose moldadas, atingem uma tensão de ruptura de tração com aproximadamente 5 MPa, apenas, enquanto após o refino, a resistência atingiu 37 a 47 MPa. A medida em que o TMP atingiu tensões de ruptura na faixa de 25 a 27 MPa e a celulose reciclada atingiu 15 a 18 MPa, ambos sem refino adicional aplicado. As propriedades mecânicas também podem depender da presença de quaisquer defeitos, como instabilidades pós-formação, rachaduras, rugas ou bolsas de água. (JACOBSON, 2017)

Diversas pesquisas na temática de desenvolvimento e explorações do mercado de produtos da fibra moldada estão em andamento em várias partes do mundo. Os produtos advindos da polpa de papel moldada estão em ascensão para substituir os produtos plásticos convencionais para vários propósitos de embalagem, sendo o incentivo ambiental o grande responsável por esse movimento. Espera-se, assim, que tal tendência continue e cresça com o passar dos anos.

Figura 3 – Exemplos de embalagens da polpa moldada encontradas no mercado atualmente, sendo (a) Frasco de bomba de fibra moldada e embalagens de cosméticos em cores vibrantes; (b) Protótipo de uma garrafa de cerveja fabricada com fibra moldada; (c) caixa de pizza; (d) Embalagem industrial geral.



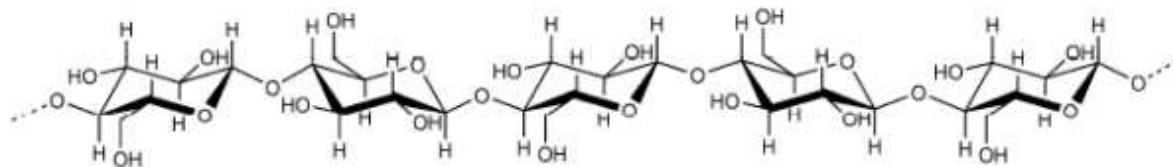
Fonte: Adaptado de ZHANG et al, 2022

2.4 Fibra Celulósica

A celulose é um polissacarídeo linear de fórmula molecular $C_6H_{10}O_5$. Ela possui característica fibrosa e é o principal elemento estrutural da parede celular, que também é composta por elementos como a lignina e a hemicelulose. A celulose pode ser encontrada em

uma vasta variedade de plantas e algas, podendo ter uma gama de estruturas como fibras, nanofibras, cristais entre outras. (VIDAL,2014; MAGALHÃES, 2018; DOS REIS, 2014)

Figura 4 – Estrutura molecular da celulose



Fonte: RODRIGUES, 2010.

O grau de cristalinidade da celulose depende da sua fonte. A celulose tipo I é um composto homopolissacarídeo anfifílico, que possui regiões amorfas desordenadas e regiões cristalinas altamente ordenadas ao longo de sua cadeia. Diferentes polimorfos de celulose podem ser produzidos a partir de sua forma nativa, como a celulose tipo II, que possui um arranjo de fita antiparalela e arranjo de rede monoclinica e pode ser produzida a partir da celulose tipo I, por meio de mercerização ou regeneração. A celulose tipo III, exibe uma estrutura cristalina monoclinica semelhante à de tipo II e pode ser produzida reversivelmente a partir de celulose I e II por meio de tratamento com NH_3 (NAGARAJAN, 2017).

As fibras vegetais típicas são constituídas de 40-50% de celulose, 20-30% de hemicelulose e 20-28% de lignina, além de outras substâncias em menores teores (COSTA, 2016; ALEXANDRE, 2010). Além disso, elas podem ser classificadas de acordo com sua fonte nas plantas, fibras do caule ou do líber, derivadas dos feixes fibrosos da casca interna dos caules das plantas, fibras foliares, que correm longitudinalmente através das folhas de plantas monocotiledôneas e fibras de pelos de sementes, como algodão (QIN, 2016).

A celulose de madeira destinada à fabricação de papéis, tende a ser menos cristalina e costuma ser classificada de acordo com três critérios: tipo de fibra (curta ou longa), processo de fabricação (químico ou mecânico) e destinação (mercado ou integrada). Sendo a de fibra curta originada das angiospermas e a longa das gimnospermas ou coníferas. Cada tipo de fibra confere ao papel características específicas, sendo que, de forma geral, a celulose de fibra longa confere maior resistência e a de fibra curta maior maciez e absorção. (VIDAL,2014)

A celulose nanofibrilada consiste em um material obtido pela desintegração da celulose, podendo ser adquiridas por diversos processos mecânicos ou químicos, que abram a estrutura da fibra, expondo as microfibrilas. As nanopartículas têm dimensão na ordem de

aproximadamente 100 nm. Devido ao aumento da área superficial, em escala nanométrica, as nanofibrilas apresentam aspectos estruturais e físicos únicos, que lhes conferem propriedades de tração, óptica, elétrica e química distintas de suas contrapartes macroscópicas (MAGALHÃES, 2018).

Existem três tipos de nanocelulose, que se diferem em suas formas de extração e em suas estruturas, sendo eles os nanocristais de celulose, as nanofibrilas de celulose e a celulose bacteriana. Para extrair celulose de biomassas lignocelulósicas, se faz necessário empregar um processo de pré-tratamento para a remoção de materiais não celulósicos, como lignina, hemicelulose, pectina e cera, que estão ligados à estrutura da celulose (CRUZ, 2017).

2.5 Caju

O cajueiro (*Anacardium occidentale L.*) é uma angiosperma pertencente à família Anacardiaceae, Dicotyledonea e ao gênero *Anacardium*. É uma planta tropical que alcança até 10m de altura e possui copa larga. De junho a novembro a árvore apresenta flores pequenas, branco-rosadas e perfumadas e sua safra acontece de janeiro a fevereiro. O cajueiro é encontrado em grande parte do mundo, sendo cultivado atualmente em 27 países. No Brasil, o litoral nordestino apresenta as melhores condições ecológicas para o seu cultivo (CORREIA, 2013).

O caju é composto pelo fruto verdadeiro da espécie, a castanha, que é um aquênio reniforme que corresponde apenas a 10% do seu peso, possui em média 7,0 g e é composta por três partes: casca, película e amêndoa. O líquido da casca da castanha (LCC) é cáustico e inflamável, sendo alvo de diversas pesquisas científicas. A película representa aproximadamente 3% do seu peso e a amêndoa é a parte comestível (PAIVA, 2000).

O pseudofruto do caju, o pedúnculo, corresponde a 90% em massa do seu peso. No Brasil seu principal uso é para a produção de suco integral, onde possui uma produção na ordem de 70 mil toneladas/ano, porém o aproveitamento global por processos de agroindustrialização do pedúnculo beneficia somente de 10 a 20% da sua produção anual. Desta forma, o aproveitamento do pedúnculo dentro da cultura do caju é baixo, ocorrendo um desperdício de 80 a 90% da sua produção (CORREIA, 2013; QUEIROZ, 2010).

Além disso, durante o processamento do pseudofruto do caju é gerado um resíduo orgânico industrial, chamado de bagaço de caju. Os processos industriais para obtenção de pedúnculo resultam na produção de 40% m/m de bagaço, o que essencialmente não tem valor comercial e é geralmente descartado pela indústria. Este material apresenta em sua

composição, além da carga orgânica, nutrientes vegetais, especialmente nitrogênio, potássio e fosforo (CORREIA, 2013; QUEIROZ, 2010).

Vale ressaltar que a fibra do bagaço do caju é um material lignocelulósico, composto por biopolímeros de interesse industrial, possuindo aproximadamente 21% de celulose, 17% de hemicelulose e 35% de lignina, sendo então um resíduo de excelente potencial. Esses fatores tornam o bagaço do caju um substrato interessante e de baixo custo para diversas aplicações, como a produção de polpa moldada (CORREIA, 2013; QUEIROZ, 2010).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Desenvolver material de polpa moldada de diferentes formulações, compostas por fibra bruta da madeira do cajueiro (lenha) e fibra bruta de caju (bagaço), visando a produção de embalagens alimentícias.

3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência dos teores da fibra bruta de caju nas propriedades de barreira do material de polpa moldada produzido;
- Avaliar a influência dos teores da fibra bruta de caju nas propriedades mecânicas do material de polpa moldada produzido.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os reagentes utilizados são de grau analítico e os equipamentos foram manuseados no Laboratório de Tecnologia da Biomassa, da Embrapa Agroindústria Tropical, localizada em Fortaleza.

4.1 Matéria-Prima

As matérias-primas utilizadas no trabalho foram a fibra bruta da madeira do cajueiro (advinda do campus experimental da Embrapa de Pacajus-CE) e a fibra bruta de caju (bagaço de caju), que foram cedidas pela empresa Natvita (Palhanos – CE) - SisGen A9FA0C3-.

As amostras das fibras brutas de caju estavam armazenadas em câmara fria a -17 °C, por seis meses e foram descongeladas por 12 horas a temperatura ambiente. Em seguida, as duas matérias primas foram moídas em um moinho de facas Wiley em uma malha de 2,0 mm.

4.2 Tratamento das matérias primas

As matérias-primas passaram por um tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH), conhecido como polpação química na indústria do papel. O tratamento alcalino com NaOH é um dos mais usados no processo de mercerização, pois é capaz de hidrolisar e remover impurezas presentes na celulose. Esse processo visa remover, ou diminuir a hemicelulose, lignina, ceras naturais e óleos presentes nas fibras, além de alterar a cristalinidade da celulose (SANTOS, 2023).

O procedimento consistiu em acrescentar 100 g da fibra bruta da madeira do cajueiro em um béquer contendo 2000 mL de uma solução 5% (m/m) de NaOH a 60 °C, mantido sob agitação constante por 60 min. Decorrido o tempo de reação, a amostra foi filtrada e lavada em água corrente até atingir o pH 7,0. O processo para a fibra bruta de caju foi similar ao descrito acima, porém utilizando uma solução de 0,5% (m/m) de NaOH e uma temperatura de 80 °C.

4.3 Análise lignocelulósica

A determinação dos componentes lignocelulósicos das amostras: fibra bruta do caju (FC); fibra bruta do caju tratada (FCT); fibra da madeira do cajueiro (FM) e fibra da madeira do cajueiro tratada (FMT) seguiu a metodologia presente no documento 236 (EMBRAPA, Procedimentos para análise Lignocelulósica), tendo sido priorizada a realização de análises em triplicata.

4.3.1 Umidade

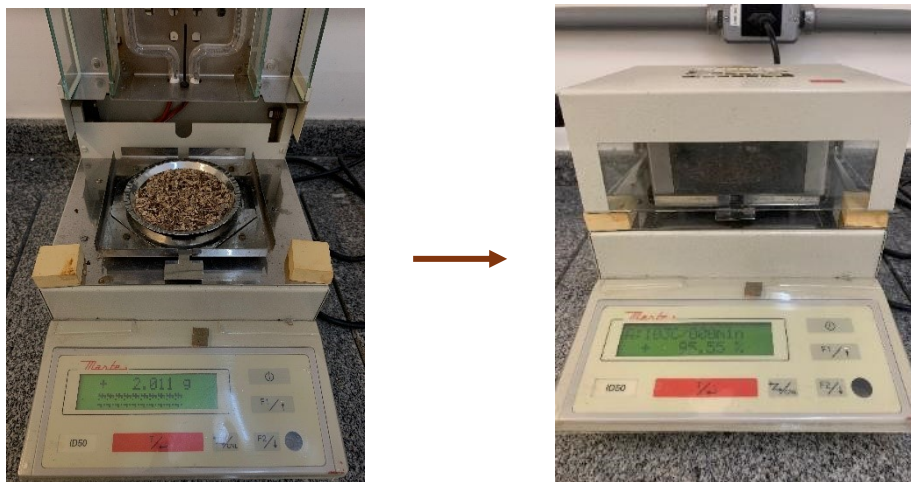
A umidade é equivalente ao teor de água presente na amostra. O teor de matéria seca das amostras foi medido em uma balança Marte ID50 (Figura 6), a qual possui uma fonte de calor infravermelho produzido por resistência encapsulada em quartzo. Foram pesadas duas gramas de cada amostra e analisadas a 105°C. Com base na equação 1 é possível determinar o teor de umidade:

$$TU(\%) = 100 - TMS \quad (1)$$

Onde,

TMS - Teor de matéria seca da amostra

Figura 5 – Balança de infravermelho para realização da análise de teor de matéria seca.



Fonte: Autora

4.3.2 Cinzas

Resumidamente, as cinzas representam os minerais que estão presentes na amostra, podendo então o teor de cinzas ser determinado pela combustão da amostra, o que irá promover a formação de gases e a consequente eliminação de carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, permanecendo apenas os minerais.

Para determinar o teor de cinzas, 2,0 g de cada amostra foram acrescentadas em cadinhos previamente calcinados a uma temperatura de 200 °C e pesados. O conjunto foi colocado em forno mufla e feita uma rampa de aquecimento até atingir 600 °C, onde permaneceram por 3 horas. Decorrido esse tempo, a temperatura foi reduzida para 200 °C. O conjunto, ao ser retirado da mufla, foi resfriado em dessecador e em seguida feita a pesagem.

De acordo com a equação 2 é possível determinar o teor de cinzas (%):

$$\frac{MRAC - MR}{MA} \times 100\% = TC(\%) \quad (2)$$

Onde,

MRAC - Massa do conjunto (recipiente + amostra) calcinado

MRC - Massa do recipiente calcinado

MA - Massa da amostra

4.3.3 Extrativos

Os extrativos são componentes que não fazem parte da parede celular de materiais lignocelulósicos e podem ser extraídos por solventes. O teor de extrativos foi determinado utilizando o sistema Soxhlet (Figura 6). Primeiramente, adicionaram-se 10 g da amostra a um filtro de papel seco e previamente pesado. Em seguida, foram adicionados 400 mL de hexano P.A. a um balão. Após o aquecimento do sistema, foram realizados 24 ciclos de refluxo. Por fim, a amostra sem extrativos foi seca em estufa a 105 °C e posteriormente pesada.

De acordo com a equação 3, pode-se determinar o teor de extrativos (%):

$$\frac{(MA - (MRASE - MR))}{MA} \times 100\% = TE(\%) \quad (3)$$

Onde,

MRASE - Massa do conjunto recipiente/amostra sem extrativos

MR - Massa do recipiente

MA- Massa da amostra

Figura 6 – Extração da madeira do cajueiro em triplicata, utilizando o Sistema Soxhlet.



Fonte: Autora

4.3.4 Lignina

A lignina é uma substância presente na parede celular dos vegetais, conferindo suporte estrutural, impermeabilidade e resistência contra ataques microbianos e estresse oxidativo (PEREZ et al., 2002).

Para determinação do teor de lignina insolúvel utilizou-se aproximadamente 1,00 g de amostra sem extrativos. O material foi acrescentado a um almofariz e a ele foi adicionado 17 mL de ácido sulfúrico 72% (m/m). Foi realizada uma maceração da matéria com o auxílio de um pistilo e, após a solubilização das partículas, a amostra ficou em repouso por 24 horas.

Decorrido o tempo de digestão, acrescentou-se 306 mL de água destilada ao almofariz e o conteúdo foi transferido para um balão de 1000 mL, que foi conectado a um sistema de refluxo por 4 horas.

Passado o tempo de refluxo, o conteúdo do balão foi transferido para um funil de vidro sinterizado - ASTM tipo 4 - previamente lavado, seco e pesado, sendo posteriormente

realizada uma filtração com auxílio de bomba a vácuo. O precipitado foi lavado com água destilada até que atingisse o pH da água utilizada. Após a filtração, o funil foi colocado na estufa a 105 °C por aproximadamente 12 horas, até obter peso constante, conforme esquema demonstrado na figura 7.

De acordo com a equação 4, pode-se determinar o teor de lignina insolúvel (%):

$$\left(\frac{MFL - MF}{MA} \times 100\% \right) - TC\% = TLI\% \quad (4)$$

Onde,

MF - Massa do funil limpo e seco

MFL - Massa do funil somada a massa da lignina

MA - Massa da amostra

TC % - Teor de cinzas

Figura 7 – Resumo do passo a passo para a realização da análise de determinação do teor de lignina insolúvel.



Fonte: Autora

4.3.5 Holocelulose

O termo "holocelulose" faz referência aos carboidratos totais presentes em células vegetais, ou seja, ela engloba as celuloses e os demais carboidratos como as pentoses. Dessa forma, conhecendo-se os valores de holocelulose e de alfacelulose de um material, pode-se, por meio do cálculo da diferença, determinar o teor de hemicelulose.

Para determinar a holocelulose utilizou-se cerca de 3,00 g de amostra sem extrativos. Em um erlenmeyer foi acrescentado à amostra previamente pesada, 120 mL de

água e um agitador magnético. O conjunto foi colocado em banho maria a 70 °C. Em seguida, foram feitos acréscimos de clorito de sódio e de ácido acético glacial, dentro de um período total de reação de 5 horas.

Posteriormente o conteúdo do erlenmeyer foi transferido para um funil de vidro sinterizado - ASTM tipo 2 (figura 8) - e prosseguiu-se com uma filtração semelhante à descrita na seção 4.3.4. Por fim, foram feitas as pesagens dos funis e calculado o teor de holocelulose (%), de acordo com a equação 5.

$$\frac{MFH - MF}{MA} \times 100\% = TH\% \quad (5)$$

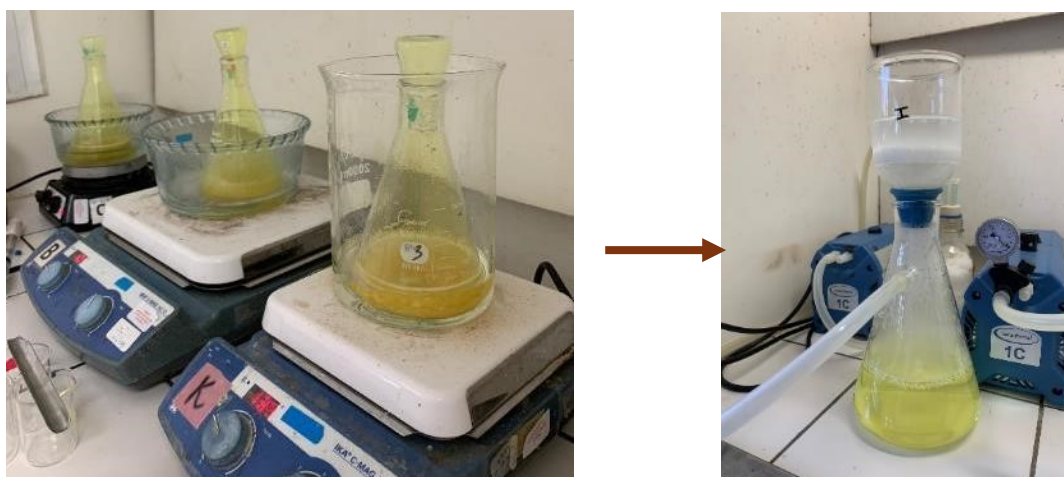
Onde,

MFH - Massa do funil pós holocelulose

MF - Massa do funil

MA - Massa da amostra

Figura 8 – Resumo do passo a passo para obtenção do teor de holocelulose.



Fonte: Autora

4.3.6 Alfacelulose

A alfacelulose corresponde à celulose degradada, a qual possui uma molécula e um número de resíduos de glicose maior do que a betacelulose não degradada.

Para determinar o teor de alfacelulose, pesou-se aproximadamente 1,00 g de holocelulose seca e transferiu-se para um almofariz. Em seguida, adicionaram-se 15 mL de

uma solução de NaOH a 17,5%. Aguardou-se aproximadamente dois minutos de contato entre a celulose e a base e depois iniciou-se uma maceração, que durou cerca de oito minutos. Terminando esse tempo, transferiu-se 40 mL de água destilada ao almofariz e a solução foi acrescentada a um funil de vidro sinterizado - ASTM tipo 2 - previamente seco e pesado.

Por fim, realizou-se uma filtração semelhante à descrita anteriormente. Quando o precipitado atingiu o mesmo pH da água destilada utilizada, o funil foi colocado em estufa a 105 °C até atingir peso constante. Após esse processo, foi verificado o peso do funil contendo a alfacelulose.

O teor de alfacelulose pode ser determinado de acordo com a equação 6:

$$\frac{MFA - MF}{MAH} \times 100\% = TA\% \quad (6)$$

Onde,

MFA - Massa do funil após alfacelulose

MF - Massa do funil

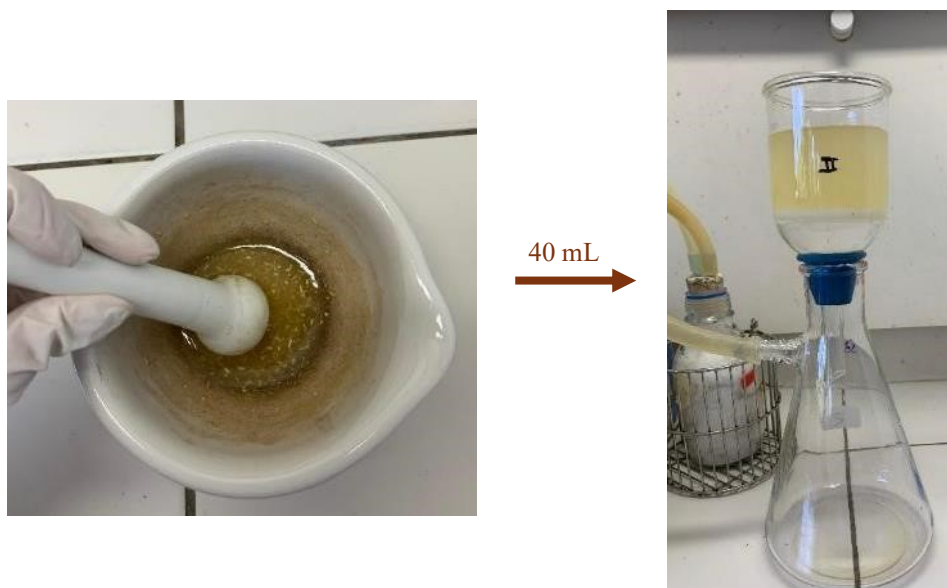
MAH - Massa da amostra de holocelulose

É necessário corrigir o valor do teor de alfacelulose, pelo teor de holocelulose, de acordo com a equação 7:

$$\frac{TH \times TA}{100} = TA\%_{corrigido} \quad (7)$$

Finalmente o valor do teor percentual de hemicelulose pode ser calculado pela diferença do teor de holocelulose e de alfacelulose.

Figura 9 – Resumo do processo para obtenção do teor de alfacelulose das amostras.



Fonte: Autora

4.4 Produção dos corpos de prova de polpa moldada

A metodologia para produção dos corpos de provas de polpa moldada visando testes posteriores foi adaptada de TAPPI - T 205 sp-02. Foram produzidos 7 corpos de provas de cada formulação, cada um contendo 0,3 g de matéria seca, sendo elas: 100% de fibra bruta da madeira do cajueiro (0FC); 90% de fibra bruta da madeira do cajueiro e 10% de fibra bruta do caju (10FC); 80% de fibra bruta da madeira do cajueiro e 20% de fibra bruta do caju (20FC).

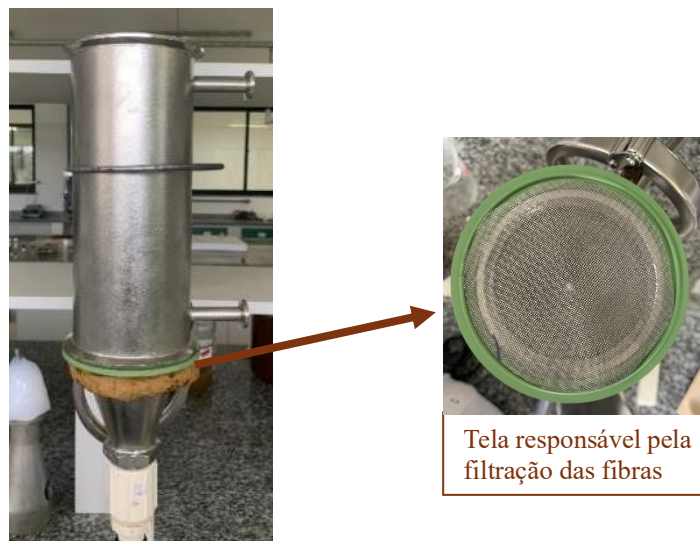
Inicialmente foram preparadas suspensões contendo 0,4% de matéria seca das amostras com água destilada. As amostras de poda tratada foram emulsificadas por 9 minutos e 50 segundos, na velocidade 5 de um liquidificador da marca vitamix serie profissional 750 e, em seguida, foram acrescentadas as amostras de bagaço, que emulsificaram em 10 segundos na velocidade 1. O processo se repetiu para todas as composições previamente definidas.

Após o preparo, 800 mL de polpa foi acrescentada a um sistema adaptado de drenagem à vácuo (cone, borracha e tela de aço) demonstrado na figura 10. Para a polpa 0FC utilizou-se uma tela com malha de 0,5 mm e o tempo de drenagem foi de aproximadamente 50 segundos. Já para as formulações 10FC e 20FC, o tempo de drenagem médio foi de 13 minutos e 15 segundos, sendo utilizada uma tela com malha de 1,01 mm.

Em seguida, os corpos de provas foram retirados das telas e passaram por um processo gradual de prensagem, sendo iniciado com 700 g por 5 minutos e sofrendo um aumento gradual da carga, respeitando o intervalo de 5 minutos para cada prensagem, até atingir a carga final de 3,0 kg. Logo após, o corpo de prova foi prensado entre plásticos Myler de 70 μm e colocados no suporte de secagem (figura 11) por aproximadamente 24 horas.

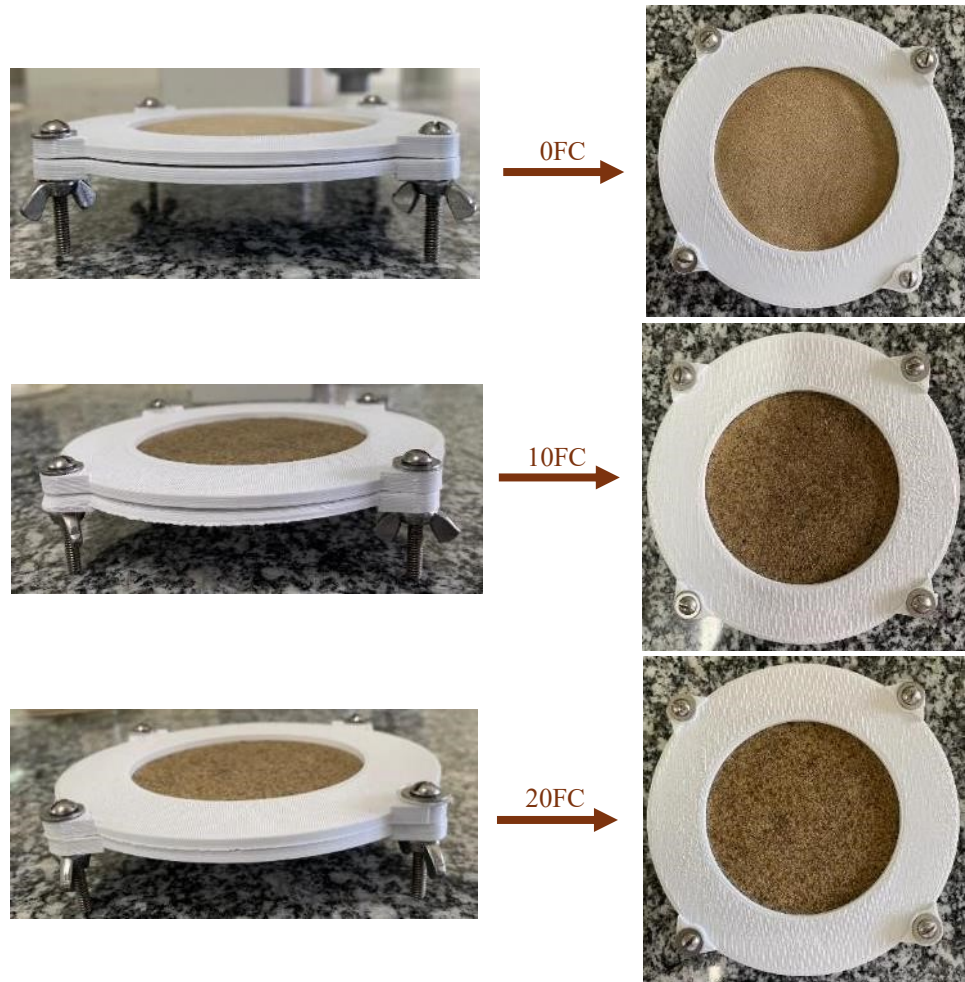
Por fim, foi utilizada uma prensa hidráulica aquecida da marca Marconi, MA 098/50A a 150 °C, na qual os corpos de provas foram prensados entre plásticos Myler por 2 min e 30 segundos a uma pressão de 8,87 MPa. Em seguida a pressão foi sendo lentamente aliviada em intervalos de 10 segundos até atingir 0. Visando um melhor entendimento do processo de produção foi fornecido um fluxograma, resumindo todas as etapas, presente na figura 12.

Figura 10 – Sistema adaptado para drenagem, visando a formação de corpos de provas de polpa moldada.



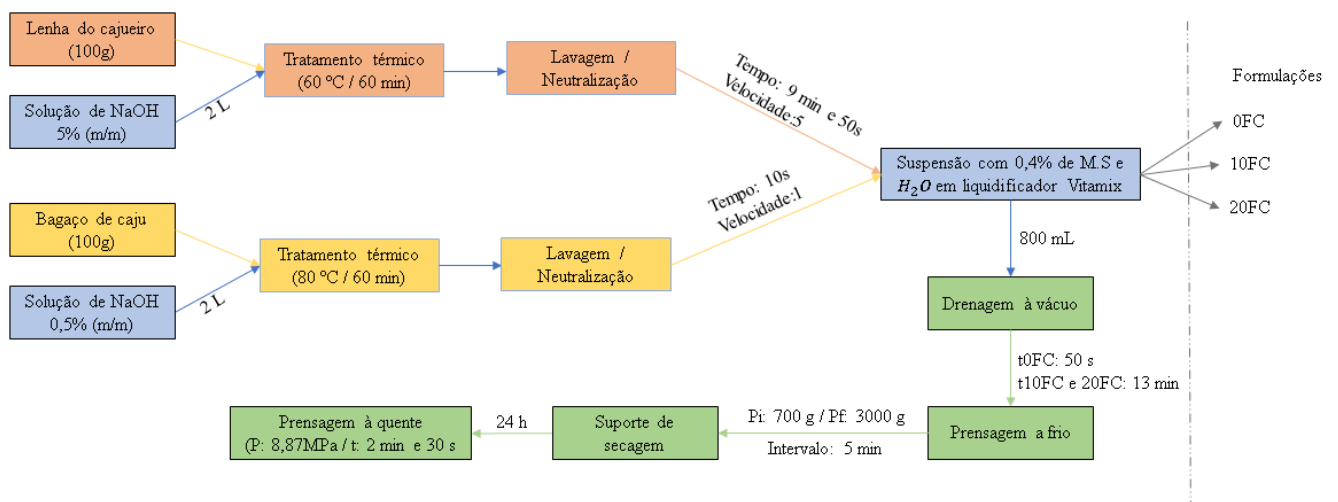
Fonte: Autora

Figura 11 – Suporte para secagem dos corpos de prova de polpa moldada, produzido em impressora 3D.



Fonte: Autora

Figura 12: Fluxograma do processo de produção dos corpos de provas de polpa moldada.



Fonte: Autora

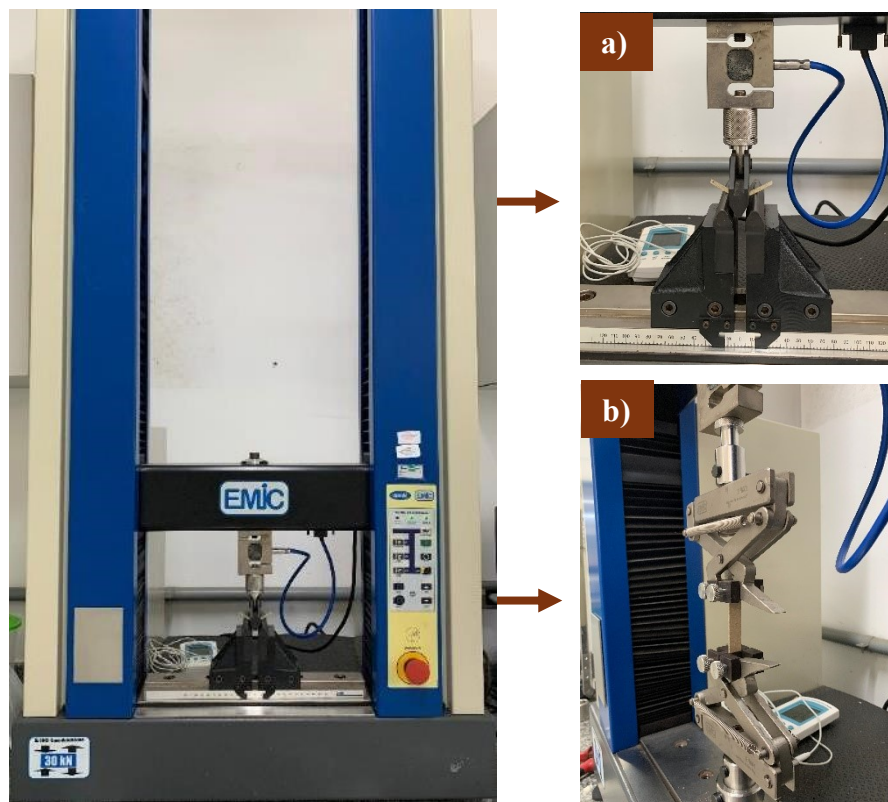
4.5 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados com corpos de prova com 64 mm de comprimento por $12,6 \pm 0,2$ mm de largura, cortados em estampadora pneumática e armazenados em dessecador com atmosfera de umidade controlada por 24 horas.

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados em uma máquina de ensaio universal (EMIC DL 30000) - figura 13 b) - que foi utilizada com célula de carga de 500 N e o ensaio realizado com velocidade constante de 4 mm/min, seguindo a ASTM D1037 – 99. Os resultados refletem a média de 7 corpos de prova.

Os ensaios de flexão também foram realizados na máquina de ensaio universal (EMIC DL 30000) - figura 13 a) - a qual foi utilizada com célula de carga de 500 N e espaçamento entre os apoios de 25 mm. A velocidade do ensaio foi de 0,7 mm/min, em concordância com o estabelecido na norma ASTM D1037 – 99. Os resultados refletem a média de 7 corpos de prova.

Figura 13 – Máquina universal para ensaio mecânico: a) garra para ensaio de flexão; b) garra para ensaio de tração.



Fonte: Autora

4.6 Ângulo de contato

Foi medido o ângulo de contato entre uma gota de água destilada e a superfície das amostras dos diferentes tratamentos (0FC, 10FC e 20FC), seguindo a norma ASTM D-5725-99. Este método consiste em depositar uma gota de água sobre a amostra com o auxílio de uma seringa contendo uma agulha de diâmetro interno de 0,713 mm (Hamilton AG®, Suíça). As imagens foram capturadas por uma câmera de vídeo da marca pixeLINK (resolução de 752×582 pixels) e processadas pelo software C20, onde o ângulo de contato entre a gota e o material foi medido. Foram realizadas 10 medidas de cada tratamento e os resultados são uma média.

4.7 Colorimetria

A análise de cor dos materiais foi realizada em um espectrofotômetro da marca Konica Minolta modelo CM – 5 mostrado na figura 14, previamente calibrado, na função de refletância em uma superfície de 30 mm. As medidas foram feitas em triplicata e a interpretação dos resultados obtida com base no diagrama de cromaticidade da marca.

Figura 14 - Espectrofotômetro da marca Konica Minolta modelo CM – 5.



Fonte: Autora

4.8 Absorção e inchamento

As análises de absorção e inchamento seguiram a norma técnica da ABNT 15316-2 e foram realizadas em triplicata nos mesmos corpos de prova simultaneamente. Eles

possuíam 24 mm de diâmetro, tiveram suas medidas de espessuras tomadas com um micrometro e foram pesados em balança analítica. Após as medições, os corpos de prova foram imersos em um béquer contendo 50 mL de água a 25 °C, durante 2 horas (figura 15). Após esse período, as amostras foram secas com papel toalha, medidas e pesadas individualmente. As variações na espessura foram calculadas como inchamento e as variações na massa como absorção de umidade. O resultado apresentado é a média dos três corpos de prova, juntamente com seus respectivos desvios-padrões.

Figura 15 – Ensaio de absorção e inchamento.



Fonte: Autora

4.9 Permeabilidade à vapor da água

A determinação da PVA foi realizada com base no método ASTM E96-95/ E96M-05. Inicialmente os corpos de prova de cada formulação foram cortados e suas medidas de espessuras tomadas com um micrometro. Em seguida foram posicionados nas células de permeação (diâmetro interno: 24 mm; altura: 10 mm), que estavam preenchidas com 2 mL de água. Foi realizada uma pesagem inicial e depois as amostras foram armazenadas a 25 °C, utilizando sílica gel como dessecante em um dessecador vertical da marca Arsec modelo DCV040, mostrado na figura 16. Em um período de 24 horas foram realizadas oito pesagens em balança analítica (1ª hora, 2ª hora, 3ª hora, 4ª hora, 21ª hora, 22ª hora, 23ª hora e 24ª hora). A PVA foi obtida usando a equação 8:

$$WVP = \frac{\omega \cdot X}{t \cdot A \cdot \Delta P} \quad (8)$$

Onde:

X é a espessura média dos corpos de prova (m);

A é a área de permeação (0,00452 m²);

ΔP é a diferença entre a pressão parcial da atmosfera na sílica gel e na água pura (3,168 kPa, a 25°C);

ω/t foi calculado por regressão linear utilizando dados de ganho de massa, em função do tempo (g/s).

Os dados foram expostos com média e desvio-padrão.

Figura 16 – Células de permeação para análise de PVA e dessecador vertical Arsec DCV040.



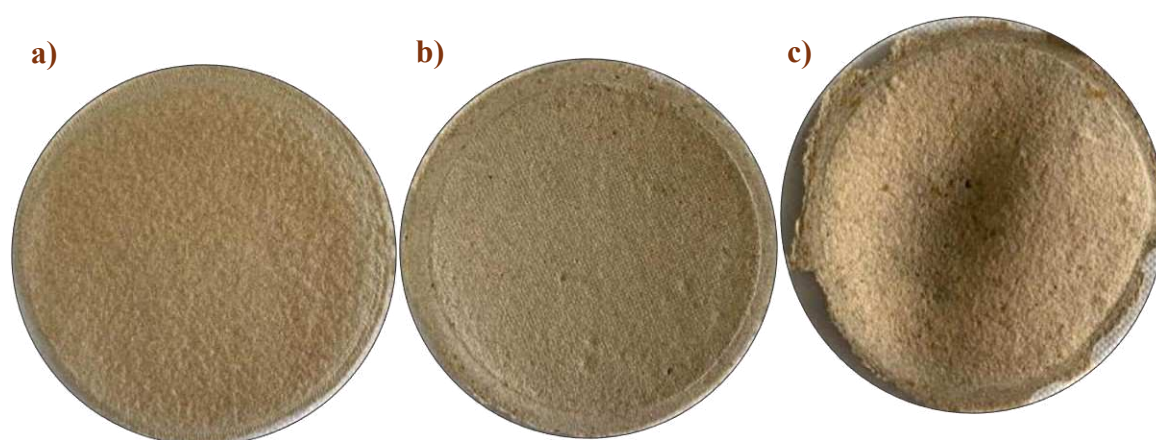
Fonte: Autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Produção dos corpos de provas

Na figura 17 estão presentes os resultados da produção dos corpos de prova de polpa moldada antes da prensagem a quente.

Figura 17 – a) amostra de polpa moldada composta por 100% de fibra da madeira do cajueiro; b) amostra composta por 10% de fibra bruta de caju e 90% de fibra da madeira do cajueiro; c) amostra composta por 20% de fibra bruta de caju e 80% de fibra da madeira do cajueiro.



Fonte: Autora

Como apresentado anteriormente, o corpo de prova composto por 20% de bagaço de caju apresenta um grau de deformação superior às demais amostras. Tal comportamento se deve ao fato de que a fração volumétrica de bagaço é maior no tratamento 20FC, então, devido o maior caráter higroscópico do bagaço ocorreu uma retração maior nesse tratamento. Vale ressaltar que após a utilização da prensa em alta temperatura, as amostras ficaram alinhadas e mais uniformes.

5.2 Composição química das amostras

A composição química das amostras com e sem tratamento alcalino estão presentes na tabela 1. A análise do teor de extrativos apresentou inconsistências, uma vez que foi realizada com a matéria úmida. Considera-se a possibilidade de que compostos presentes

no material, solúveis em água, possam ter sido arrastados junto com os extrativos, comprometendo a confiabilidade dos resultados.

Em relação a fibra da madeira de cajueiro bruta (FM), os valores encontrados de hemicelulose, alfacelulose e holocelulose assemelham-se com os verificados por MATTOS et al, 2017. Após o tratamento da fibra (FMT), pode-se observar um aumento no teor de alfacelulose, que está relacionado com a remoção de parte dos componentes não celulósicos da amostra, como a hemicelulose e os extrativos. Como a holocelulose é o somatório da alfacelulose e da hemicelulose, sua concentração irá aumentar. Em relação a lignina, como se trata de um resultado percentual, mesmo que a sua quantidade absoluta diminua, a concentração relativa pode ser maior, pois os outros componentes são removidos em proporções maiores (MATTOS et al, 2017).

De acordo com RODRIGUES, 2010 para o bagaço de caju isento de pré-tratamento (FC), as porcentagens de alfacelulose, hemicelulose e lignina foram, respectivamente, $19,21\% \pm 0,35$, $12,05\% \pm 0,37$ e $38,11\% \pm 0,08$. Os valores encontrados no presente trabalho para celulose e hemicelulose ficaram inferiores aos presentes na literatura e a lignina foi superior. Vale ressaltar que discrepâncias são esperadas, visto que as análises foram feitas com frutos advindos de ambientes distintos, que passaram por diferentes processamentos do pedúnculo para gerar o bagaço.

Em relação ao bagaço pós tratamento, ocorreu um aumento percentual de holocelulose, devido ao aumento da alfacelulose. Pode-se observar também a diminuição do teor de lignina, que é um polímero amorfo de alta complexidade, considerada a principal responsável pela resistência e durabilidade da madeira. Desta forma, são necessários estudos mais específicos em relação a lignina do pedúnculo de caju, objetivando compreender os seus altos teores na fibra bruta e a alta proporção de redução pós tratamento.

Os resultados obtidos indicam um tratamento de mercerização efetivo para as amostras, pois ocorreu um aumento no percentual de celulose e uma diminuição dos constituintes não celulósicos das amostras.

Tabela 1 – Composição química da fibra bruta de caju pré e pós tratamento e da fibra da madeira do cajueiro pré e pós tratamento, respectivamente FC, FCT, FM e FMT. Base seca.

Parâmetros (%)	Fibras			
	FC	FCT	FM	FMT
Cinzas	1,24 ± 0,04	0,10 ± 0,03	1,63 ± 0,10	0,4 ± 0,02
Matéria Seca	63,16 ± 7,48	10,89 ± 0,43	88,29 ± 4,42	22,72 ± 0,81
Umidade	36,84 ± 7,48	89,11 ± 0,43	11,71 ± 4,42	77,28 ± 0,81
Lignina	48,93 ± 1,82	28,15 ± 1,58	14,88 ± 5,97	30,49 ± 0,49
Holocelulose	21,49 ± 3,07	70,24 ± 2,52	64,72 ± 3,71	62,20 ± 2,67
alfacelulose	14,18 ± 2,56	60,28 ± 3,06	36,64 ± 1,23	51,15 ± 3,86
Hemicelulose	7,31	9,96	28,08	14,06

Fonte: Autora

5.3 Ensaios Mecânicos

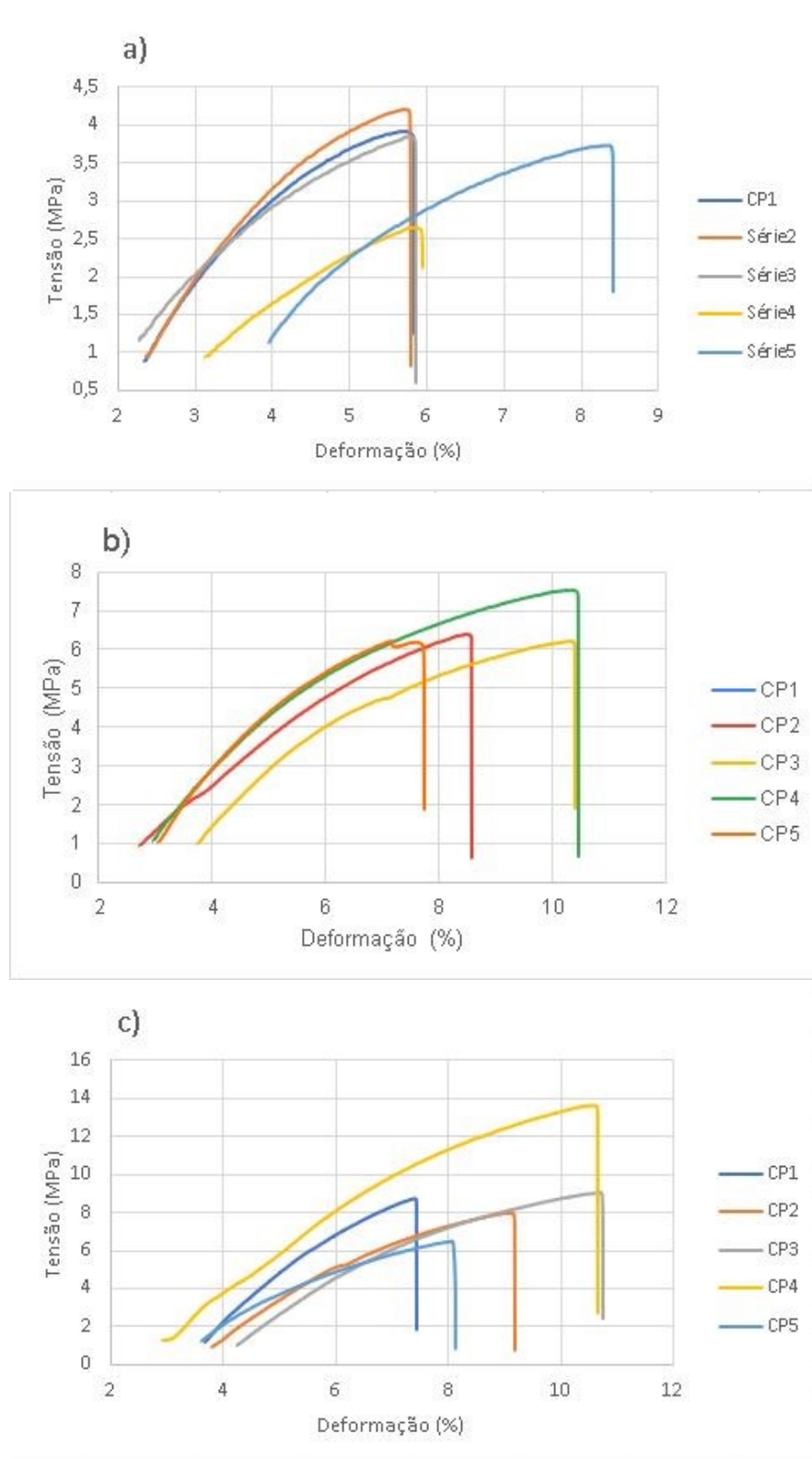
5.3.1 Ensaio de tração

As curvas de tensão (MPa) por deformação (%) das três composições de polpa moldada testadas estão apresentadas na figura 18. Foram encontrados valores médios de tensão máxima de 3,67 MPa ± 0,6 para os corpos de prova produzidos com 100% de fibra de madeira e 0% de fibra bruta de caju (0FC). Enquanto os produzidos com 90% de fibra de madeira e 10% de fibra bruta de caju (10FC) apresentaram 6,83 MP ± 0,79, os compostos por 80% de fibra de madeira e 20% de fibra bruta de caju (20FC) apresentaram 8,30 MPa ± 0,63.

Segundo a literatura, pratos de uso comercial feitos de celulose moldada de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram uma resistência a tração de $12,25 \text{ MPa} \pm 1,11$ (RATTANAWONGKUN et al, 2020). Além disso, GURAV et al 2003, ao avaliar suportes para embalagem de equipamentos eletrônicos feitos em polpa moldada, encontraram um valor médio da tensão máxima de tração de 4,42 MPa.

Pode-se observar que o acréscimo de 10% de fibras de bagaço proporcionou um aumento de 86,10% da tensão máxima de ruptura dos corpos de prova e ao acrescentar 20% gerou um aumento de 126%. Ou seja, a adição da fibra de bagaço à composição da celulose moldada melhorou a qualidade mecânica de tração, aproximando os valores encontrados em produtos de celulose moldada de uso comercial.

Figura 18 - a) Tensão de tração máxima (MPa) por deformação (mm) da composição 0FC; b) Tensão de tração máxima (MPa) por deformação (mm) da composição 10FC; c) Tensão de tração máxima (MPa) por deformação (mm) da composição 20FC.



Fonte: Autora

5.3.2 Ensaio de flexão

Quanto à resistência à flexão e ao módulo de elasticidade, os valores encontrados estão apresentados na tabela 2, na qual pode-se observar que a formulação composta por 10% de bagaço obteve o melhor resultado, podendo considerar que esse percentual foi o suficiente para melhorar as ligações fibras-fibras da polpa moldada, de modo a torna-la menos rígida.

Tabela 2 – Valor médio da resistência máxima a flexão e do módulo de elasticidade das amostras compostas por 100% de fibra de madeira (0FC), 90% de fibra de madeira e 10% de fibra de caju (10FC) e 80% de fibra de madeira e 20% de fibra de caju (20FC).

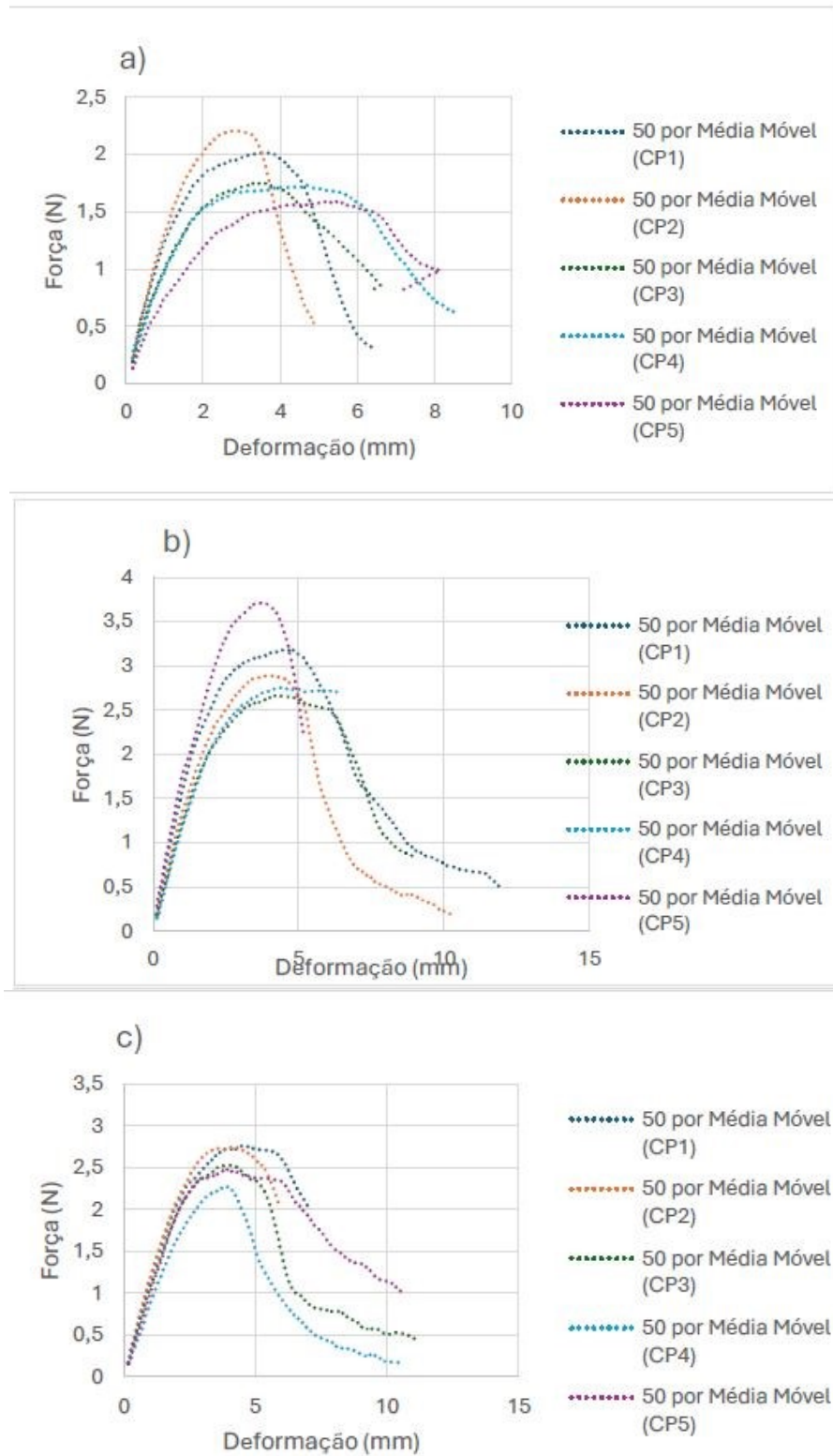
Amostras	Resistência máxima a flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
0FC	4,58 ± 0,48	307,78 ± 52,69
10FC	10,78 ± 1,08	601,33 ± 94,13
20FC	9,51 ± 0,82	499,00 ± 71,79

Fonte: Autora

Segundo GURAV et al, 2003 os suportes de polpa moldada para eletrônicos obtiveram o valor médio do módulo de elasticidade de 225 MPa; LANG et al, 2022, encontrou módulos de elasticidades entre 211,1–577,6 MPa para amostras de polpa moldada a base de bagaço de maçã com e sem aditivos. Além disso, bandejas comerciais de polpa de pseudocaule de bananeira têm resistência à flexão em torno de $4,11 \pm 0,40$ MPa e módulo de elasticidade em torno de $631,00 \pm 200,00$ MPa.

Com isso, pode-se considerar que os resultados encontrados para o módulo de elasticidade, assim como a resistência máxima à flexão corrobora com a literatura. As curvas de força (N) por deformação (mm) das amostras estão representadas na figura 19. Visando suavizar as flutuações e melhor identificar as tendências, as curvas foram plotadas com base na média móvel de 50 períodos de cada ponto.

Figura 19 – a) média móvel de força (N) por deformação (mm) da composição 0FC; b) média móvel de força (N) por deformação (mm) da composição 10FC; c) média móvel de força (N) por deformação (mm) da composição 20FC.



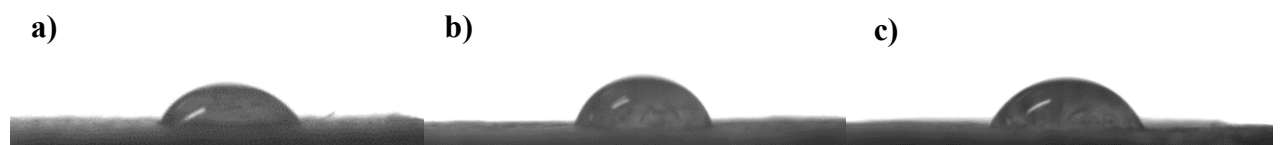
5.4 Ângulo de contato (AC)

Um material é classificado como hidrofóbico quando o ângulo de contato com a água (AC) é $>90^\circ$ e super-hidrofóbico quando o AC é $>150^\circ$ (WANG, 2021). No presente trabalho o menor ângulo de contato foi observado na polpa moldada composta por 100% de fibra de madeira, $47,98^\circ \pm 3,64$. Enquanto as polpas moldadas que contém 10% e 20% de bagaço nas formulações obtiveram $67,03^\circ \pm 4,45$ e $67,39^\circ \pm 4,59$, respectivamente, como pode ser observado na figura 20.

Diante do exposto, evidencia-se que o acréscimo do bagaço aumenta o caráter hidrofóbico da polpa. Esse fator pode ser explicado pela textura do material, pois de acordo com o efeito de Cassie-Baxter, a microrrugosidade de uma superfície pode aumentar o seu ângulo de contato, devido ao aprisionamento de ar nas pequenas cavidades sob a gota d'água, porém se a rugosidade do material for acentuada observa-se a presença de poros grandes que irão absorver a água por capilaridade, quebrando o efeito hidrofóbico, predominando o efeito Wenzel (WAINBERG, 2014).

Porém, há uma necessidade de melhoria na hidrofobicidade para chegar aos níveis desejados, para isso pode-se utilizar camadas de ceras ou de aditivos que são capazes de retardar a absorção de água. Para fins de comparação, segundo YIMLAMAI, 2023 produtos de polpa moldada de cânhamo sunn (*Crotalaria juncea* L.) sem aditivos obtiveram um ângulo de contato com a água de $30,52^\circ$ e com aditivos atingiram $128,5^\circ$. Isso se deve aos efeitos do aditivo de dimensionamento hidrofóbico.

Figura 20 – Imagens utilizadas para calcular o ângulo de contato da gota de água nos corpos de provas de polpa moldada com diferentes formulações, sendo a) 100% Fibra da madeira de cajueiro; b) 90% fibra da madeira de cajueiro e 10% da fibra do bagaço de caju; c) 80% fibra da madeira de cajueiro e 20% da fibra do bagaço de caju.



Fonte: Autora

5.5 Colorimetria

A coloração de embalagens irá variar de acordo com o tipo e concentração do material utilizado para a sua produção (JACOMETTI,2015). Pelos dados apresentados na tabela 3, pode-se observar que não ocorreu uma variação considerável nos parâmetros de cor em relação às composições das amostras.

Ambos os materiais apresentaram uma Luminosidade em torno de 66 e os parâmetros a^* e b^* foram positivos, apresentando então tendências à cores vermelhas e amarelas.

Tabela 3 – Parâmetros de cor das amostras de polpa moldada, sendo 0FC composta por 100% de fibra da madeira do cajueiro; 10FC composta por 90% de fibra da madeira do cajueiro e 10% de fibra do bagaço de caju; 20FC composta por 80% de fibra da madeira do cajueiro e 20% de fibra do bagaço de caju.

Amostras	Parâmetros		
	L^*	a^*	b^*
0FC	$66,19 \pm 1,25$	$3,50 \pm 0,24$	$18,39 \pm 0,37$
10FC	$66,91 \pm 1,54$	$3,83 \pm 0,39$	$17,93 \pm 0,69$
20FC	$65,41 \pm 0,94$	$3,59 \pm 0,38$	$18,74 \pm 0,88$

Fonte: Autora

5.6 Inchamento

O grau de inchaço é influenciado pela estrutura da fibra e pelas características químicas da polpa moldada. De acordo com os cálculos os resultados da diferença de espessura nas amostras de polpa moldada estão apresentados na tabela 4:

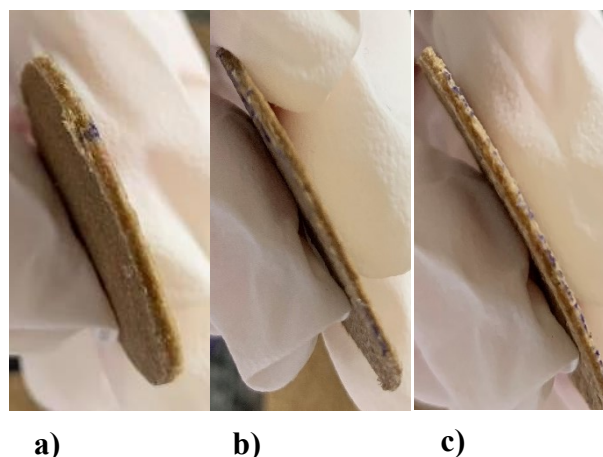
Tabela 4: Valores de espessura antes e após ensaio de inchamento e grau de inchaço de cada amostra de polpa moldada, 0FC, 10FC e 20FC

Amostras	Parâmetros		
	Espessura inicial (mm)	Espessura final (mm)	Ef/Ei
0FC	1,05	1,41	$1,36 \pm 0,17$
10FC	0,95	1,27	$1,34 \pm 0,06$
20FC	0,92	1,20	$1,31 \pm 0,03$

Fonte: Autora

Como visto acima, nas formulações compostas por 100% de fibra da madeira do cajueiro, ocorreu um aumento de 33,88% da espessura, na amostra constituída por 10% de fibra do bagaço de caju e 90% de fibra da madeira do cajueiro o aumento percentual foi de 33,99%. Contudo, as amostras que continham 20% de fibra do bagaço de caju e 80% de fibra da madeira do cajueiro apresentaram um resultado relativamente diferente, apresentando um aumento de 30,81%.

Figura 21 – Corpos de prova pós ensaio de inchamento; sendo a) a composição sem bagaço; b) com 10% de bagaço e c) com 20% de bagaço



Fonte: Autora

5.7 Absorção de água

A absorção de água é um fator que descreve a quantidade de água absorvida pelos materiais ao serem saturados em sua presença, de modo que uma absorção baixa indica uma boa resistência de um material à água (LANG, 2022).

Com os dados de espessura, massa e o raio de cada corpo de prova usados para o ensaio de absorção e inchamento foi possível calcular a densidade das amostras. Materiais que possuem uma maior densidade exibem uma menor porosidade, o que indica uma superfície menos suscetível a absorção de água (ZAKALUK, 2024).

Nesse sentido, os resultados de densidade e de absorção nos corpos de provas de celulose moldada estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Valores de massa antes e após ensaio de absorção, grau de absorção e densidade de cada amostra de polpa moldada, 0FC, 10FC e 20FC

Amostras	Parâmetros			Densidade (g/mL)
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Mu/Ms	
0FC	0,18	0,94	5,24 ± 0,33	0,38
10FC	0,23	0,83	3,58 ± 0,08	0,54
20FC	0,23	0,78	3,41 ± 0,03	0,55

Fonte: Autora

A formulação com 100% de fibra da madeira do cajueiro, apresentou um peso úmido aproximadamente 5 vezes maior que o da matéria seca. Já as com 10% e 20% de bagaço na composição o peso da matéria úmida foi aproximadamente 3 vezes maior que o da matéria seca. Dessa forma, indicando que o acréscimo da fibra bruta do caju (bagaço) diminuiu a absorção de água por parte do material, e aumenta a sua densidade, como pode ser observado na tabela 5. Os resultados apresentados indicam que a adição do bagaço de caju na formulação diminuiu o seu caráter hidrofílico, pois diminuiu a absorção e aumentou a sua densidade,

assim como ocorreu no teste do ângulo de contato, onde a formulação com 20% de bagaço possuiu o ângulo mais próximo ao de materiais hidrofóbicos.

5.8 Permeabilidade à vapor da água

O coeficiente de permeabilidade à vapor da água é definido como a transferência do vapor permeante através de um material (KESTER, et al, 1986). Para embalagens de alimentos é importante que se evite a transferência de umidade com o ambiente externo, motivo pelo qual a permeabilidade de vapor de água deve ser a mais baixa possível (ZAVAREZE et al., 2012).

Os resultados obtidos no intervalo de 24 horas de análise estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Permeabilidade ao vapor de água e espessura dos corpos de prova de polpa moldada, sendo 0FC composto 100% de fibra da madeira do cajueiro, 10FC composto por 10% de fibra do bagaço de caju e 90% de fibra da madeira do cajueiro, 20FC composto por 20% de fibra do bagaço de caju e 80% de fibra da madeira do cajueiro.

Amostras	Espessura (mm)	PVA (g.mm/kPa.h.m ²)
0FC	1,13 ± 0,04	30,46 ± 4,55
10FC	1,01 ± 0,07	19,29 ± 2,74
20FC	0,92 ± 0,11	18,12 ± 0,87

Fonte: Autora

Os valores de PVA encontrados são considerados altos para embalagens de alimentos que possuem alta atividade de água, pois pode ocorrer a migração da água do alimento para o ambiente e vice-versa, provocando alterações nas suas características (LABUZA et al,1981).

De acordo com os resultados da tabela 6, pode-se observar que o acréscimo do bagaço diminuiu a permeabilidade do material, o que corrobora com o resultado de densidade

apresentado anteriormente, pois quanto mais denso o material menor a quantidade de poros e espaços vazios para a passagem do vapor de água. Dessa forma, o material com 20% de bagaço possui uma melhor propriedade de barreira.

6 CONCLUSÃO

Este estudo visou testar diferentes formulações para a produção de embalagens de polpa moldada utilizando resíduos da cajucultura, quais sejam, a fibra da madeira do cajueiro advinda das suas podas periódicas e a fibra bruta do caju, ou bagaço, obtido do rejeito da indústria de beneficiamento do pedúnculo do caju. Dessa forma, visa contribuir com a diminuição no uso de embalagens plásticas e implementação de uma economia circular, por meio do aproveitamento de resíduos gerados em grande quantidade no nordeste do país.

Diante dos resultados, foi produzida celulose moldada que, de acordo com o IMFA, pode ser classificada como de tipo 3, ou parede fina, possuindo uma boa precisão dimensional, superfícies lisas e rígidas. Esse tipo de polpa moldada pode ser utilizado para embalagens de alimentos, cosméticos, eletrônicos, entre outros.

Além disso, foi observado que o acréscimo do bagaço de caju na polpa moldada a torna mais maleável e diminui o seu caráter hidrofílico. Em relação as duas formulações contendo fibra bruta de caju que foram produzidas, 10% e 20%, os ensaios de resistência mecânica indicam que 10% de fibra torna a embalagem mais tenaz, sendo uma vantagem para possíveis modelagens, diminuindo as chances de rachaduras na superfície.

Em relação as propriedades de barreira do material, a formulação contendo 20% de bagaço se mostrou moderadamente superior à com de 10% de bagaço e significativamente superior a composta somente por madeira do cajueiro, indicando que o acréscimo de bagaço aumentou o caráter hidrofóbico do material, tendo esse resultado relação com as alterações de densidade e textura do material após o acréscimo da fibra bruta do caju. Porém, o índice de hidrofobicidade e permeabilidade atingidos ainda não são os ideais, pois o ângulo de contato (AC) está abaixo de 90° e os valores para permeabilidade a vapor de água estão altos para embalagens de alimentos que possuem alta atividade de água (18,12 g.mm/kPa.h.m²).

Portanto, pode-se afirmar que os resíduos da cajucultura podem ser utilizados para produzir embalagens de polpa moldada, sendo vantajoso o acréscimo do bagaço na sua formulação. A depender da utilização da embalagem e da disponibilidade de resíduos, pode-se optar por utilizar 10% ou 20% da fibra bruta do caju na composição. Para utilização em embalagens com fins alimentícios, se faz necessário posteriores estudos com aplicação de ceras ou aditivos para melhorar as propriedades de barreira do material, visando uma melhor conservação do alimento.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Perfil 2023: indústria do plástico impulsiona economia brasileira gerando mais de 370 mil empregos, 2024. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/perfil-2023-industria-do-plastico-impulsiona-economia-brasileira-gerando-mais-de-370-mil-empregos/>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- ABRE - Associação Brasileira de Embalagem. Estudo abre macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo, 2022. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2022-2/>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- ABRE - Associação Brasileira de Embalagem. Dados de mercado, 2008, 2009, 2010, 2011 e 2023. Disponível em: <http://www.abre.org.br>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- ABREN - Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos. Brasil destina 96% de seus resíduos para aterros sem reciclar (Jornal da BioEnergia), 2021. Disponível em: <https://abren.org.br/2021/06/11/brasil-destina-96-de-seus-residuos-para-aterros-sem-reciclar-jornal-da-bioenergia/>. Acesso em: 25 março 2025.
- ALEXANDRE, M. E. O.; Ladchumananadasivam, R., Nunes, Van M. S.; Sales, H. S.; Almeida, R.J.S; Moraes, J. C. Protótipo de máquina desfibradora da fibra da folha do abacaxizeiro. Congresso nacional de engenharia mecânica, Campina Grande, Paraíba, 2010.
- ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Anvisa aprova norma que altera critérios para embalagens plásticas e celulósicas, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2021/aprovada-norma-que-altera-criterios-para-embalagens-plasticas-e-celulosicas>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Embalagens, atualizado em 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/ptbr/setorregulado/regularizacao/alimentos/embalagens>. Acesso em 14 fev. 2025.
- ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC Nº 91, DE 11 DE MAIO DE 2001. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2001/rdc0091_11_05_2001.html. Acesso em: 14 fev. 2025.
- BNB – BANCO DO NORDESTE. Cajucultura. Caderno setorial ETENE, 2022. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1328/1/2022_CDS_230.pdf. Acesso em 22 jan.2025.
- CE -Comissão Europeia. A Economia Circular: interligação, criação e conservação de valor. Bruxelas, 2014. Disponível em: <https://op.europa.eu/pt/publication-detail/-/publication/c8cfd1ae-6285-40ba-879f-f2e78e4c2b6e>. Acesso em: 25 março 2025.
- CERDÁ Tena, Emilio, & Khalilova, Aygun. Economía circular. Revista Economía Industrial, 401, p11-20, 2016.

CHAMAS, Ali; Moon, Hyunjin; Zheng, Jiajia; Qiu, Yang; Tabassum, Tarnuma; Jang, Jun Hee; Abu-Omar, Mahdi; Scott, Susannah L.; Suh, Sangwon. Degradation Rates of Plastics in the Environment. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. American Chemical Society, 2020.

CORREIA, J. A. C. Estudo do pré-tratamento do bagaço de caju com peróxido de hidrogênio alcalino para a produção de etanol. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

COSENZA, J. P., Andrade, E. M., & Assunção, G. M. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Rev. Gest. Ambient. e Sust. -GeAS, v. 9(1), p. 1-30, 2020.

COSTA, S. S.; Silva, R. P.; Alves, A. R.; Guarieiro, L. L.; Machado, B. A. S. Estudo Prospectivo sobre a obtenção e incorporação de nanocristais de celulose em filmes Biodegradáveis. Revista Virtual de Química, v. 8, n. 4, p. 1104-1114, 2016.

CRUZ, Luciani Paola Rocha. Obtenção de nanocelulose por hidrólise ácida e enzimática de fibras de algodão de resíduo de tecido tingido com corante índigo. 125 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2017.

DEBNATH, Mrityika et al. Molded pulp products for sustainable packaging: production rate challenges and product opportunities. BioResources, v. 17, n. 2, p. 3810, 2022.

DIDONE, M., Saxena, P., Brilhuis-Meijer, E., Tosello, G., Bissacco, G., Mcaloon, TC, Pigosso, DCA e Howard, TJ. Fabricação de celulose moldada: Visão geral e perspectivas para a tecnologia de processo. *Packaging Technology and Science*, v. 30, n.6, 2017.

DOMINGOS, ALM, Pereira, ACM, Noletto, APR, & Reis, AB. Caracterização de revestimento biopolimérico visando aplicação em embalagens celulósicas. *A Revista de Engenharia e Ciências Exatas*, v. 4, n.2, 2018.

DOS REIS, Joana Raquel Sequeira Quintela. Funcionalização de Fibras de Celulose em Papel com Nanopartículas: Aplicação como bactericida. 2014.

EUGENIA Eugenio, M., Ibarra, D., Martín-Sampedro, R., Espinosa, E., Bascón, I., & Rodríguez, A. Alternative Raw Materials for Pulp and Paper Production in the Concept of a Lignocellulosic Biorefinery. IntechOpen, pp. 1 – 26, 2019.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/caju/pre-producao>. Acesso em: 22 jan.2025.

GURAV S.P, A Bereznitski, A Heidweiller, P.V Kandachar. Mechanical properties of paper-pulp packaging, Composites Science and Technology. Volume 63, Issue 9, 2003.

HORTON, Alice A., Alexander Walton, David J. Spurgeon, Elma Lahive, Claus Svendsen. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current

understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities, *Science of The Total Environment*, Volume 586, Pages 127-141, 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. IBGE/LSPA. Tabela 7832 - Área plantada, área colhida, produção e rendimento médio, por ano da safra e produto das lavouras. Dezembro 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7832>. Acesso em: 22 jan.2025.

IUCN - INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. A crise da poluição plástica, 2022. Disponível em: <https://iucn.org/story/202207/plastic-pollution-crisis>. Acessado em: 12 fev. 2025.

JACOBSEN, UE. Materiais de fibra sustentáveis para substituir plásticos em aplicações de formação 3D, Dissertação de Mestrado em Ciências, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, 155 pp. 2017.

JACOMETTI, Giselle de Assis. Utilização de resíduo fibroso do pseudocaule de bananeira na produção de bandejas biodegradáveis de amido de mandioca por processo de termoformagem – Londrina, 2015.

KEYES, FE (1890). “Método de moldagem de artigos de celulose”, Patente dos EUA.

LABUZA, T. P.; CONTRERAS-MEDLIN, R. Prediction of protection requirements for foods. *Cereal Food World*, v. 26, p. 335-343, 1981.

LANG Clara V., Jooyeoun Jung, Taoran Wang, Yanyun Zhao. Investigation of mechanisms and approaches for improving hydrophobicity of molded pulp biocomposites produced from apple pomace. *Food and Bioproducts Processing*. Volume 133, 2022.

LIMA, Ezenildo Emanuel; Luiz Honorato da Silva, Flavio; de Sousa Conrado Oliveira, Libia; Sant'ana Silva, Adriano; Mariano da Silva Neto, José. Produção de etanol de segunda geração proveniente do bagaço de pendúculos do caju. *Revista Caatinga*; Mossoro Vol. 28, Ed. 2, 2015.

LIU Y, Ma S, Wang F, Wang L. Avanços na pesquisa de polpa moldada para embalagens de alimentos. *J Renew Mater*. V. 11, 2023.

MADRUGA, K. M.; RADÜNZ, M.; VERGARA, M.; PINTO, V. Z.; COLUSSI, R.; DIAS, A. R. G. Permeabilidade ao vapor de água e propriedades mecânicas dos filmes de amido de pinhão nativo e modificado com tratamento térmico de baixa umidade. XXIII Congresso de Iniciação Científica UFPel, 2014.

MAGALHÃES, Washington Luiz Esteves, Francine Ceccon Claro. Produção de filmes de celulose nanofibrilada. EMBRAPA comunicado técnico 413, Colombo PR, 2018.

MAHDAVI, A.V S. Mistura de polpas químico-mecânicas de choupo branco branqueado e palha de trigo para melhorar as características mecânicas e óptica. *Biorecursos*.11, pp. 2987 – 2997, 2016.

MATTOS, Adriano L. A.; LOMONACO, Diego; ROSA, Morsyleide de Freitas; SOUZA FILHO, Men de Sá S. M.; ITO, Edson N. Cashew tree wood flour activated with cashew nut shell liquid for the production of functionalized composites. *Composite Interfaces*, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 93-107, 13 jun. 2017.

MATTOS, Adriano Lincoln Albuquerque. Valorização de resíduos lignocelulósicos da biomassa regional com potencial para obtenção de compósitos poliméricos. 2017. 126f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

NAGARAJAN Sanjay, Nathan C. Skillen, John T.S. Irvine, Linda A. Lawton, Peter K.J. Robertson. Cellulose II as bioethanol feedstock and its advantages over native cellulose. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 77, 2017.

OLIVEIRA, V. Canal da Cajucultura. O caju de mesa ganhou o Brasil. Youtube, 13 maio 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=YiKJG8T4kAo>. Acesso em: 13 fev. 2025

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Agência da ONU adverte que “ciclo de vida do plástico” precisa ser repensado. *ONU News, clima e meio ambiente*, 2023. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/06/1815442>. Acesso em: 13 fev. 2025.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – BRASIL. Relatório da ONU aponta soluções para reduzir a poluição plástica, 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/231688-relat%C3%B3rio-da-onu-aponta-solu%C3%A7%C3%B5es-para-reduzir-polui%C3%A7%C3%A3o-pl%C3%A1stica>. Acesso em: 13 fev. 2025.

PAIVA, FF De A. et al. Aproveitamento industrial do caju. 2000.

PÉREZ, J.; MUÑOZ-DORADO, J.; DE LA RUBIA, RUBIA, T. de la; MARTÍNEZ, J. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International Microbiology*, v. 2, n. 5, p. 53-63, 2002.

PAEC -Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal. Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017. *Diário da República*, 1ª série, nº 236 de 11 de dezembro de 2017.

POTULSKI, DC, Viana, LC, Muñiz, GI, Andrade, AS, & Klock, U. Caracterização de nanofilmes de celulose nanofibrilada obtida em diferentes consistências. *Scientia Forestalis*, 44, 2016.

QIN Yimin. A brief description of textile fibers. In *Woodhead Publishing Series in Textiles, Medical Textile Materials*, Woodhead Publishing, 2016.

QUEIROZ, Ronialison Fernandes; Márcio Cleber de Medeiros Corrêa; Lindbergue Araujo Crisostomo; Fabrício Ferreira de Lima; Romulo Diniz Cavalcante. APROVEITAMENTO DO BAGAÇO DE CAJU COMO FERTILIZANTE ORGÂNICO EM POMAR DE CAJUEIRO EM PRODUÇÃO, 2010.

RATTANAWONGKUN Phattharasaya, Noppadon Kerddonfag, Nattaya Tawichai, Uraiwan Intatha, Nattakan Soykeabkaew. Improving agricultural waste pulps via self-blending

concept with potential use in moulded pulp packaging. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 8, Issue 5, 2020.

RIBEIRO, José Lopes; Aurinete Daienn Borges do Val; Pedro Rodrigues de Araujo Neto. Recomendações técnicas para o cultivo do Cajueiro-Anão-Precoce na Região Meio-Norte do Brasil. Circular Técnica, 50, EMBRAPA. Teresina, PI, 2008.

ROBERTS, J. C. *The Chemistry of Paper*. The Royal Society of Chemistry, 1996.

RODRIGUES, T. H. S. Estudo do pré-tratamento alcalino em microondas da fibra do caju (*Anacardium occidentale* L.) seguido de hidrólise enzimática para produção de etanol. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

SAEED HA, Y. Liu , LA Lucia , H. Chen. Avaliação do sorgo e do bagaço sudanês como matéria-prima para celulose e papel. *Biorecursos*. 12, pp. 5212 – 5222, 2017.

SANTANA, V. R., Garcia, J. S., Moura, I. do N., & Costa, I. de M. Descarte de resíduos plásticos e economia circular. *Revista Contemporânea*, v. 4(12), e6831, 2024.

SANTOS, Déborah Júlia Costa dos. a influência do tratamento alcalino nas fibras do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de matriz poliéster ortoftálica. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 78 f. 2023.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L., Oliveira, L. M., Coltro, L., Vercelino, A. R. M., & Corrêa, G. E. E. Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades. Campinas: CETEA/ ITAL, 2002.

SGHAIER Ben AEO, Chaabouni Y, Msahli S, et al. Morphological and crystalline characterization of NaOH and NaOCl treated *Agave americana* L. fiber. *Ind Crops Prod.*; 36:257–266, 2012.

SILVA NETO, R. M. da. Inspeção em indústria de beneficiamento da castanha de caju visando a implantação das boas práticas de fabricação. 128 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.2000.

SIMÕES, A. F. B. S. Economia Circular na Indústria Cerâmica Proposta de classificação do resíduo “caco cozido como subproduto. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental) - Instituto Politécnico de Coimbra / Escola Superior Agrária de Coimbra, Coimbra, 2017.

STEFANO, Nara Medianeira; Nelson Casarotto Filho. Percepção dos consumidores: atributos considerados importantes nas embalagens. *Revista Produção Online*, Florianópolis, SC, v.12, n. 3, p. 657-681, jul./set. 2012

SU, Y., Yang, B., Liu, J., Sun, B., Cao, C., Zou, X., Lutes, R., e He, Z. Perspectivas para substituição de alguns plásticos em embalagens por materiais lignocelulósicos: uma breve revisão”, *BioResources* v. 13, n. 2, 2018.

VIDAL, André Carvalho Foster, André Barros da Hora. Celulose de fibra longa: uma oportunidade para a indústria brasileira? BNDES Setorial 39, p. 281-342, Volume 8, Issue 5, 2014.

WANG T., Y. Zhao. Fabricação de revestimentos super-hidrofóbicos termicamente e mecanicamente estáveis para substratos à base de celulose com ingredientes naturais e comestíveis para aplicações alimentícias. Alimentos Hidrocol, 120, p. 12, 2021.

WAINBERG, Rodrigo. Molhabilidade e rugosidade de superfícies: caracterização interferométrica e sua correlação com a rugosidade. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Física. Curso de Pesquisa Básica: Bacharelado, 2014.

YIMLAMAI Piyawan, Theerat Ardsamang, Pratuang Puthson, Phichit Somboon, Buapan Puangsin, Soda pulping of sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) and its usage in molded pulp packaging, Journal of Bioresources and Bioproducts, Volume 8, Issue 3, 2023.

ZAKALUK, Izabelli Cristiani Barcelar. Tratamento com plasma frio na produção de sistemas multicamadas sustentáveis. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Curitiba, 2024.

ZHANG Yanling, Chao Duan, Swetha Kumari Bokka, Zhibin He, Yonghao Ni. Molded fiber and pulp products as green and sustainable alternatives to plastics: A mini review, Journal of Bioresources and Bioproducts, Volume 7, Issue 1, 2022.