



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

LEONARDO MAPURUNGA DE MENEZES

**ESTUDO COM ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES APLICADOS EM
EMBALAGENS DE POLPA MOLDADA A PARTIR DE RESÍDUOS DA
CAJUCULTURA**

FORTALEZA

2025

LEONARDO MAPURUNGA DE MENEZES

**ESTUDO COM ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES APLICADOS EM
EMBALAGENS DE POLPA MOLDADA A PARTIR DE RESÍDUOS DA
CAJUCULTURA**

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.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Avelino
Figueredo Sobrinho

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)

- M511e Menezes, Leonardo Mapurunga de.
Estudo com aditivos impermeabilizantes aplicados em embalagens de polpa moldada a partir de resíduos da cajucultura / Leonardo Mapurunga de Menezes. – 2025.
57 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis Avelino Figueredo Sobrinho.
Coorientação: Prof. Dr. Adriano Lincoln Albuquerque Mattos.
1. Cajucultura. 2. Polpa moldada. 3. Agentes impermeabilizantes. I. Título.

CDD 540

LEONARDO MAPURUNGA DE MENEZES

**ESTUDO COM IMPERMEABILIZANTES APLICADOS EM EMBALAGENS DE
POLPA MOLDADA A PARTIR DE RESÍDUOS DA CAJUCULTURA**

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: 04/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco de Assis Avelino de Figueredo Sobrinho (Orientador Pedagógico)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Adriano Lincoln Albuquerque Mattos (Orientador Profissional)
Embrapa Agro Indústria Tropical

Prof.^a Dr.^a Malena Gomes Martins (Membro Externo)
Universidade Regional do Cariri (URCA)

A Deus.

Aos meus pais, Maria Cristina Saraiva

Mapurunga de Menezes e Francisco Terto de
Menezes.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo ao órgão de fomento da minha bolsa de iniciação científica, CNPq. A todas as pessoas que me acompanharam na realização desse trabalho e que ajudaram nas coisas mais simples até as mais complicadas, de forma direta ou indireta.

À minha família, em especial, aos meus pais Cristina e Chico, meu irmão Chiquinho que foram a minha grande fonte de apoio emocional e financeiro ao longo dessa jornada. Aos meus amados pets Whitney, Millie e Jack por serem meus grandes amigos e parceiros há muitos anos.

Aos meus colegas e amigos de graduação, principalmente, meus melhores amigos Cida, Vitinho e Pat por estarem comigo na dor e na alegria, dentro e fora dos limites do Campus do Pici. Aos meus grandes amigos fora da graduação também, que tiveram muita paciência com a minha ausência em alguns momentos, mas nunca me deixaram e me apoiaram de alguma forma.

Ao LPT e todos os membros (professores, pós graduandos e colegas ICs) que me ensinaram bastante ao longo desses três anos, mais do que eu jamais poderia imaginar, não apenas no ramo científico e laboratorial, mas também na convivência. Em especial, agradeço à examinadora da minha banca Prof.^a Dr.^a Malena Martins que me guiou, incentivou e ensinou quase tudo que aprendi dentro do laboratório, e também, ao meu orientador pedagógico Prof. Dr. Francisco Avelino que me auxiliou nessa etapa final com bastante eficiência e zelo.

Ao meu orientador Profissional Dr. Adriano Mattos por toda paciência e ensinamentos durante o período de estágio e por ter me acolhido de última hora. Agradeço também ao Douglas e Maiza por me ajudarem bastante nos procedimentos desse trabalho, ao Keven por ter sido um grande companheiro e apoiador, e toda a equipe do LTB que me acolheu nessa estadia.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Ceará (UFC) pela minha formação e ter sido a minha segunda casa ao longo de todos esses anos.

“Nada se cria, nada se perde, tudo se transforma” (Antoine Lavoisier, 1743 - 1794).

RESUMO

Renovação, restauração e reutilização são os princípios da economia circular, um modelo econômico que visa máxima utilização de um material ou produto, indo contra os impactos ambientais gerados pelo uso excessivo e descarte inadequado do plástico. A geração de resíduos plásticos é uma preocupação mundial, podendo afetar a água, o solo e, principalmente, o ecossistema marinho. Nesse sentido, o estudo testou diferentes formulações para produção de embalagens de polpa moldada, advindas de resíduos da cajucultura, com acréscimo de aditivos impermeabilizantes para melhorar suas propriedades de barreira, visando diminuir o uso de embalagens plásticas provenientes da indústria de alimentos. Foram testadas 7 composições para a produção da polpa moldada, sendo uma delas o referencial contendo 80% da fibra da madeira de cajueiro e 20% da fibra do bagaço do caju, e as outras contendo a mesma composição mais algum agente impermeabilizante, dímero de alquil ceteno (AKD) nas concentrações de 1%, 2% e 3% (m/v), ou cera de carnaúba (CC), nas concentrações de 10%, 15% e 20% (m/m). As fibras passaram por tratamento alcalino e em seguida foi feita uma suspensão com 0,4% m/v 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. A fibra da madeira e a fibra do bagaço foram caracterizadas por meio da análise lignocelulósica, avaliando os teores de lignina e hemicelulose em suas composições. Em seguida, foi verificado a qualidade das fibras moldadas por meio de ensaios de tração e flexão, que revelaram uma maior resistência mecânica e melhor maleabilidade para as amostras contendo os aditivos. Objetivando verificar o caráter hidrofóbico, realizou-se as análises de ângulo de contato, inchamento e absorção de água, e permeabilidade ao vapor de água, mostrando um resultado favorável para embalagens de alimentos com alta atividade de água. Além disso, foi feita a análise qualitativa de colorimetria que permitiu conhecer as tendências de cor do material. Portanto, o trabalho obteve materiais de polpa moldada impermeabilizada, compostos por resíduos da cajucultura, com uma maior resistência mecânica e caráter hidrofóbico em relação ao material de referência devido aos mecanismos de interação entre as fibras e os aditivos.

Palavras-chave: cajucultura; polpa moldada; agentes impermeabilizantes.

ABSTRACT

Renovation, restoration, and reuse are the principles of the circular economy, an economic model that aims for the maximum utilization of a material or product, countering the environmental impacts caused by excessive use and improper disposal of plastic. The generation of plastic waste is a global concern, as it can affect water, soil, and especially the marine ecosystem. In this regard, the study tested different formulations for the production of molded pulp packaging derivated from cashew cultivation waste, with the addition of waterproofing additives to enhance their barrier properties, aiming to reduce the use of plastic packaging from the food industry. Seven compositions were tested for the production of molded pulp, one of which served as the reference containing 80% cashew wood fiber and 20% cashew pulp fiber, while the others contained the same composition plus some waterproofing agent, either alky ketene dimer (AKD) at concentrations of 1%, 2%, and 3% (w/v), or carnauba wax (CC) at concentrations of 10%, 15%, and 20% (w/w). The fibers underwent alkaline treatment and then a suspension was made with 0.4% (w/v) of dry matter and distilled water, which was subsequently drained to form the molded pulp. Shortly thereafter, a cold pressing process was carried out, followed by 24-hour drying period, which preceded a hot pressing with a pressure of 8.87 MPa. The wood fiber and the bagasse fiber were characterized through lignocellulosic analysis, assessing the contents of lignin and hemicellulose in their compositions. Then, the quality of the molded fibers was assessed through tensile and bending tests, which revealed greater mechanical strength and better malleability for the samples containing the additives. In order to verify the hydrophobic character, contact angle, swelling and water absorption, and water vapor permeability analyses were conducted, showing a favorable result for food packaging with high water activity. In addition, a qualitative colorimetry analysis was conducted that allowed for the understanding of the color trends of the material. Therefore, the work obtained materials of waterproof molded pulp, composed of cashew cultivation waste, with greater mechanical resistance and hydrophobic character compared to the reference material due to the interaction mechanisms between the fibers and the additives.

Keywords: cashew cultivation; molded pulp; waterproof agent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do cajueiro, caju e castanha	16
Figura 2 – Evolução dos setores por valor bruto da produção de embalagens	19
Figura 3 – Esquema do processo de termoformagem da polpa	20
Figura 4 – Estrutura linear da molécula de celulose com suas cadeias.....	21
Figura 5 – Participação percentual dos estados na.....	22
Figura 6 – Representação da cadeia alquílica da cola AKD	24
Figura 7 – Estrutura molecular do triacontanol, principal componente da cera de	25
Figura 8 – Balança de infravermelho	28
Figura 9 – Sistema de extração por.....	30
Figura 10 – Sistema de drenagem adaptado para a.....	35
Figura 11 – Suporte de secagem das amostras de polpa moldada	35
Figura 12 – Máquina universal para ensaio mecânico: a) Garra para.....	37
Figura 13 – Equipamento de captura do ângulo	38
Figura 14 – Espectrofotômetro da marca.....	39
Figura 15 – Ensaios de absorção e inchamento das amostras de polpa	40
Figura 16 – Células de permeação para análise de PVA das amostras de polpa moldada	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulações contendo a quantidade utilizada de cada fibra e aditivo para a produção das amostras de polpa moldada	34
Tabela 2 – Composição lignocelulósica da fibra bruta do bagaço de	43
Tabela 3 – Resistência máxima a flexão e módulo de elasticidade das amostras de	44
Tabela 4 – Tensão máxima das amostras de polpa moldada.....	45
Tabela 5 – Ângulo de contato das amostras de polpa moldada	46
Tabela 6 – Parâmetros de cor das amostras de polpa moldada da análise de colorimetria	47
Tabela 7 – Variação de espessura e massa das amostras de polpa moldada do ensaio de absorção e inchamento	48
Tabela 8 – Permeabilidade ao vapor de água e espessura das amostras de polpa moldada.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

µm	Micrômetro
°C/min	Grau Celsius por minuto
ABISPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABRE	Associação Brasileira de Embalagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
aC	Antes de Cristo
AC	Ângulo de Contato
ACC	Amêndoa da Casca da Castanha
AKD	Alkyl Ketene Dimer
ASA	Anidrido Alquenil Succínico
ASTM	American Society for Testing and Materials
BNB	Banco do Nordeste do Brasil
CC	Cera de Carnaúba
CCCC	Cinzas da Casca da Castanha de Caju
cm	Centímetro
DRX	Difratometria de Raios X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMIC	Ensaio de Mecânica de Impacto e Compressão
FBC	Fibra bruta do bagaço de caju
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FPC	Fibra bruta da poda de cajueiro
g	Grama
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Organization for Standardization
Kg	Kilogramas
KPa	Kilopascal
LCC	Líquido da Casca da Castanha de Caju
LTB	Laboratório de Tecnologia da Biomassa
m/m	Porcentagem massa-massa
m/v	Porcentagem massa-volume
m ²	Metro quadrado

MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
MPs	Microplásticos
N	Newton
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
nm	Nanômetro
PVA	Permeabilidade à vapor de água
PVAm	Polivinilamida
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o meio ambiente
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
TAPPI	Technical Association of Paper and Pulp Industries
TRIA	Triacantanol

LISTA DE SÍMBOLOS

\$	Dólar
%	Porcentagem
Δ	Variação (delta)
°	Grau
μ	Micro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Embalagem para alimentos	18
2.2	Polpa moldada	19
2.3	Fibra celulósica	21
2.4	Caju	21
2.5	Aditivos impermeabilizantes	23
3	OBJETIVOS	26
3.1	Objetivos gerais	26
3.2	Objetivos específicos	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	Matéria-prima	27
4.2	Análise lignocelulósica	27
4.2.1	<i>Umidade</i>	<i>27</i>
4.2.2	<i>Cinzas</i>	<i>28</i>
4.2.3	<i>Extrativos</i>	<i>29</i>
4.2.4	<i>Lignina</i>	<i>30</i>
4.2.4	<i>Holocelulose</i>	<i>31</i>
4.2.5	<i>Alfacelulose</i>	<i>32</i>
4.3	Tratamentos das fibras brutas para a produção dos corpos de prova.....	33
4.4	Produção dos corpos de prova de polpa moldada impermeabilizada	33
4.5	Ensaio mecânicos	36
4.6	Ângulo de contato	37
4.7	Colorimetria	38
4.8	Absorção e inchamento	39
4.9	Permeabilidade ao vapor de água	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	Composição lignocelulósica	42
5.2	Ensaio mecânicos	43
5.2.1	<i>Ensaio de flexão</i>	<i>43</i>
5.2.2	<i>Ensaio de tração</i>	<i>44</i>

5.3	Ângulo de contato	45
5.4	Colorimetria	46
5.5	Absorção e inchamento	47
5.6	Permeabilidade ao vapor de água	48
6	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

A Economia Circular é um modelo econômico que repensa as práticas do modelo linear em que se “compra – usa – descarta”, repensando o *design* dos materiais e produtos para que eles atinjam o maior nível de utilização, regenerando sistemas naturais, gerando um fluxo dinâmico de renovação, restauração e reutilização (Valle et al., 2023.; Silva et al., 2021). Esse modelo destaca a atenção das organizações para os impactos ambientais gerados pelo descarte inadequado do plástico, influenciando diretamente o comportamento dos consumidores.

Ao longo dessa poluição plástica, pedaços maiores desses resíduos sólidos são decompostos em minúsculas partículas conhecidas como microplásticos. Em um contexto mais amplo, o termo macroplástico descreve partículas de plástico com diâmetro superior a 5 mm e microplástico (MP) é definido como partículas de plástico com diâmetro inferior a 5 mm, enquanto nanoplástico tem tamanhos em nanoescala (Gago et al., 2018). As fibras resultantes da fragmentação e decomposição estão entre os tipos mais comuns de detritos micro/nanoplásticos (Gago et al., 2018; Napper e Thompson, 2016; Sait et al., 2021).

Essa transformação, que ocorre ao longo do tempo, é significativa para o meio ambiente e apresenta riscos e impactos aos ecossistemas (Kaandorp et al., 2023; Kibria et al., 2023; Thushari e Senevirathna, 2020;). A exposição de organismos marinhos a MPs pode levar a vários riscos, incluindo danos aos tecidos, estresse oxidativo e alterações na expressão gênica relacionada ao sistema imunológico, neurotoxicidade, retardo de crescimento e anormalidades comportamentais. No ser humano, as principais vias de exposição foram identificadas como ingestão (principalmente frutos do mar), inalação e exposição dérmica (Oliveira et al., 2025; Emmerik e Schwarz, 2020).

Segundo dados do Programa das nações unidas com o meio ambiente (PNUMA, 2023), estimam-se que são descartados 430 milhões de toneladas de plástico no mundo anualmente e que apenas 9% desse plástico produzido é reciclado, 19% são incinerados, 49% são depositados em aterros sanitários e 22% são mal administrados, acumulando-se em ambientes naturais e acabando em mares e oceanos, causando um prejuízo de US\$ 1,3 trilhão por ano, além dos custos sociais e ambientais.

No Brasil, o setor alimentício é responsável pelo segundo maior volume de produção de peças plásticas, respondeu por 21,9% do total de plástico transformado em 2022, segundo dados da Associação brasileira de plástico (ABIPLAST, 2023). Diante desse cenário, torna-se essencial que o mercado adote alternativas sustentáveis, visando não apenas a

mitigação dos impactos já mencionados, mas também a manutenção de sua competitividade.

Uma alternativa para isso é a adoção de embalagens feitas a partir da polpa de papel moldado, proveniente de uma indústria relativamente "simples" e experiente que se desenvolveu no final do século 19 como um caminho para reciclar celulose, papel e papelão. Uma ampla gama de materiais de embalagem descartáveis e biodegradáveis, vasos de planta, recipientes para alimentos e bandejas foram produzidos usando a tecnologia antes do surgimento da indústria de plásticos (Zhou et al., 2020; Semple et al., 2022).

A polpa de papel moldado é produzida a partir de uma pasta contendo celulose reciclada, fibras vegetais e água, podendo ser moldada de diferentes formas. Normalmente na produção desse material 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 et al., 2022; Singh et. al, 2022). Como matéria-prima para o desenvolvimento de papel moldado, os resíduos provenientes da cajucultura como a poda de cajueiro e do bagaço de caju são opções viáveis de um ponto social, econômico e ambiental.

Segundo dados do Banco do nordeste brasileiro (BNB, 2021), o Brasil possuía em 2020, 426,1 mil hectares plantados com cajueiro, localizados, principalmente, na Região Nordeste (99,7%). Os principais produtores nordestinos são o Ceará, onde se encontra mais da metade da área colhida (63,5%), Piauí e Rio Grande do Norte, cujas áreas somam 28,7%, restando 7,8% que ficam distribuídos entre os demais produtores dessa mesma Região. Vale destacar que o Ceará também possui a maior parcela da área nacional (63,3%).

No Nordeste brasileiro, aproximadamente 85% da área ocupada com o cultivo de cajueiros corresponde ao cajueiro comum, muitas vezes com idade avançada, baixa produtividade e presença significativa de falhas. Para reverter esse cenário, uma das práticas mais adotadas é a substituição de copas, técnica que envolve o corte total da parte aérea da planta, seguido do enxerto de brotações emergentes com materiais genéticos superiores. Quando combinada com podas regulares — como as de formação, limpeza e manutenção —, essa prática gera grande volume de resíduos lenhosos. Entre 2012 e 2015, estima-se que a substituição de copas em cerca de 15 mil hectares resultou na produção de aproximadamente 1,2 milhão de resíduos lenhosos. Esse material é comumente utilizado em residências ou comercializado para padarias, olarias e cerâmicas; em alguns casos, é queimado diretamente nas áreas de plantio. (Ribeiro, 2008; Mattos, 2017).

O cajueiro é uma planta tropical nativa do nordeste brasileiro, pertencente à família *Anacardiaceae*. O caju (Figura 1) é erroneamente considerado por muitos como o fruto do cajueiro, quando na realidade trata-se de seu pseudofruto. Ele é constituído basicamente de duas

partes: a castanha (fruto) e o pedúnculo (pseudofruto) (Mazzetto e Lomonaco, 2020).

Figura 1 – Ilustração do cajueiro, caju e castanha



Fonte: Adaptado de Lomonaco et. al., 2017.

Além disso, O pedúnculo (pseudofruto), que representa 90% em peso do caju, possui 5% de aproveitamento devido à sua alta perecibilidade (Araripe, 2000; Cruz et al, 2007), já outros autores citam um aproveitamento de 12% (Paiva et al., 2000), e também é citado que entre 10 a 15 toneladas de pseudofruto são obtidas, como subproduto, para cada tonelada de castanha de caju produzida (Talasila e Shaik, 2015). Ademais, conforme dados do Instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE, 2016), em 2015 foram produzidos entre 1,3 e 2,0 milhões de toneladas de resíduo de pseudofruto de caju, sendo o bagaço correspondente a 15% desse resíduo.

Apesar de tudo isso, Damasceno (2025) mostra que, embalagens de polpa moldada formadas apenas das fibras da poda de cajueiro e do bagaço de caju não são viáveis para alimentos com uma atividade de água, principalmente, devido à baixa hidrofobicidade desse compósito, necessitando o uso de aditivos. Os aditivos são necessários para atender a uma ampla gama de requisitos de processamento e qualidade/desempenho do produto. Estes são utilizados para aumentar a resistência à umidade, maleabilidade e a resistência à ligação seca da teia de fibra, ajustar o pH para evitar a floculação de finos, aumentar a drenagem da teia, reduzir bolhas de ar, melhorar a estabilidade dimensional do produto, resistência à umidade e ao óleo, melhorar a capacidade de impressão da tinta, reduzir os custos de fibra e produção, melhorar a brancura, o brilho e a estabilidade da cor (Huang et al., 2009; Semple et al., 2022).

Nesse viés, o trabalho em questão, realizado no Laboratório de Tecnologia da Biomassa (LTB) dentro da Empresa brasileira de pesquisa agropecuária (EMBRAPA), unidade Agroindústria Tropical, avaliou o uso de resíduos agroindustriais provenientes da cajucultura (fibra do bagaço de caju e fibra da madeira de cajueiro) em conjunto com aditivos

impermeabilizantes, como a cera de carnaúba (CC) e o dímero de alquil ceteno (AKD), para a produção de embalagens alimentícias de polpa moldada, visando a substituição/diminuição do uso de embalagens comerciais à base de plástico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Embalagens para alimentos

Embalagens de alimentos são um dos recursos utilizados que funcionam como uma barreira inerte entre o alimento e o ambiente, proporcionando a segurança do produto e permitindo que estes tenham uma ampla distribuição (Landim et al., 2016). Esses argumentos são fundamentos pela Resolução da diretoria colegiada (RDC 259/2002) da ANVISA que define como o recipiente, o pacote ou a embalagem destinada a garantir a conservação e facilitar o transporte e manuseio dos alimentos

A embalagem representou uma grande importância para o desenvolvimento do comércio e para o crescimento das cidades ao longo da história (Mestriner, 2022). 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 (Sarantopóulos, 2002).

Em tempos onde o consumo é alto, a competitividade é algo em que as empresas se deparam frequentemente, portanto criar e inovar são soluções fundamentais para se destacar nesse mercado. A inovação está envolvida, na maioria das vezes à resistência mecânica, associada com propriedades de barreira a gases e aromas, além de novos sistemas de fechamento e impermeabilização, garantindo maior segurança e praticidade para o consumidor. Porém, ainda é baixo o investimento para as inovações realmente sustentáveis. As poucas indústrias que optam por embalagens sustentáveis, geralmente voltam-se para o uso de materiais reciclados, muitas vezes por estratégia de *marketing*, não se preocupando com a produção de embalagens que utilizam matérias primas sustentáveis, e com baixo tempo de degradação (Schmelfenig, 2009; Landim et al., 2016).

De acordo a Associação brasileira de Embalagens (ABRE, 2024), existem quatro tipos de materiais básicos para produção de embalagens de alimentos, os plásticos, metais, vidro e celulose-papel/papelão. Existe também múltiplos tipos de embalagens que atendem a diversas funcionalidades, de acordo com o que se deseja para o produto final. Dentre elas, destacam-se as embalagens multicamadas, que podem ser cartonadas, laminadas, entre outras. As laminadas são formadas pela sobreposição de materiais, como filmes plásticos, metalizado e/ou papeis.

A Fundação Getúlio Vargas (FGV), em parceria com a ABRE, divulgou os resultados mais recentes de seu estudo macroeconômico exclusivo da indústria brasileira de

embalagem. De acordo com o estudo, o valor bruto da produção física de embalagens atingiu em 2024, o montante de R\$ 165,9 bilhões, um crescimento na ordem de +14,89% em relação ao ano de 2023. Com destaque para o aumento de produção física dos segmentos de embalagens plásticas e metálicas de 2023 para 2024 e a queda do setor de papel conforme a Figura 2.

Figura 2 – Evolução dos setores por valor bruto da produção de embalagens

Embalagens	2023*	2024*
Plástico	34,1%	34,4%
Metal	18,8%	19,4%
Papelão Ondulado	21,2%	20,4%
Cartolina e Papel-Cartão	10,6%	10,5%
Vidro	4,7%	4,8%
Papel	5,5%	5,4%
Têxtil	2,7%	2,7%
Madeira	2,4%	2,5%

Fonte: Adaptada de FGV, 2024.

Nesse contexto, a celulose moldada poderia ser mais valorizada, uma vez que é feita basicamente de fibras celulósicas virgens ou recuperadas, sendo considerada por muito tempo uma tecnologia limitada a produtos de baixo custo (Didone et al., 2017). Porém, pesquisas da COHERENT MARKET INSIGHTS (2025), corporação indiana especializada em análises de mercado, destacam que os elevados custos de produção da polpa moldada (devido a processos intensivos em capital e volatilidade dos preços da polpa) tornam-na menos competitiva em mercados sensíveis ao preço, favorecendo o uso continuado de embalagens de plástico tradicionais, oriundas da indústria petroquímica.

2.2 Polpa moldada

Em uma base global, países como Coreia do Sul, Alemanha, Japão, Reino Unido e Espanha apresentam as maiores taxas de recuperação do consumo aparente de papel, que estão entre 73,8% e 91,6%. O Brasil registra uma taxa de recuperação de apenas 45,5% de seu consumo aparente de papel, ocupando a décima segunda posição no mundo, e incentivando o desenvolvimento de processos industriais que utilizam retalhos de papel como matéria-prima.

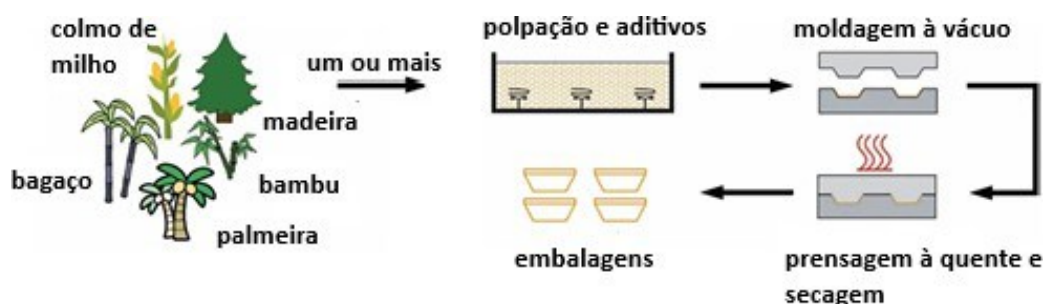
Nesse contexto, a indústria de embalagens de celulose moldada é relevante e tem grande perspectiva de crescimento no Brasil, assim como em muitos outros países (Bracelipa, 2015; Martínez et al., 2016).

A polpa moldada usa apenas resíduos fibrosos não comestíveis (caules, folhas, bagaço, vagens de sementes) de culturas alimentares primárias, incluindo cana-de-açúcar, caju, milho e trigo. Essa fabricação de papel é uma tecnologia tridimensional, em que uma pasta pode conter, principalmente, água e cerca de 3 a 5% de fibras, podendo também ser moldada de forma plana ou complexa (Debnath et al., 2022; Zhang et al., 2022).

Existem revisões (Dey et al., 2020; Didone et al.; 2017, Zhang et al., 2022) sobre produtos de celulose moldada e tecnologia de fabricação. No entanto, eles não colocam a opção de embalagem no contexto mais amplo nem se concentram na fabricação, aditivos e requisitos específicos do recipiente para alimentos para viagem, por exemplo.

Para embalagens que entram em contato direto com alimentos, levando em consideração os requisitos de segurança e higiene da embalagem alimentícia, a polpa moldada para embalagem de alimentos deve usar matérias-primas de fibra não poluente e não tóxica. Portanto, os produtos de polpa moldada para embalagem de alimentos costumam utilizar fibra vegetal primária, principalmente, como matéria-prima e esses produtos necessitam a ausência de pelinhos e descamação, um certo grau de rigidez, resistência mecânica e propriedades hidrofóbicas e antioleo (Yifan et. al., 2023). A Figura 3 mostra um diagrama esquemático do processo de termoformagem a vácuo de polpa moldada para embalagens de alimentos.

Figura 3 – Esquema do processo de termoformagem da polpa moldada para embalagens de alimentos



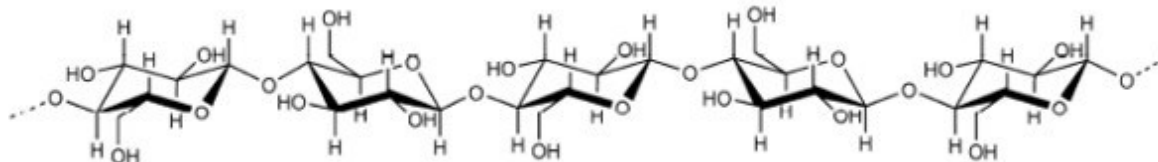
Fonte: Adaptada de Yifan et. al., 2023.

2.3 Fibra celulósica

A celulose é um material abundante e natural, que tem sido usado há séculos para suprir as necessidades humanas e como fonte primária para a produção de papel é formado pelas fibras por meio de interações intermoleculares (Klemm et al., 2005; Dufresne, 2017). O primeiro material baseado em papel foi desenvolvido por volta de 105 aC na China; naquela época, os fabricantes de papel inconscientemente levavam em consideração as propriedades da celulose (Sixta, 2006). O processo de fabricação do papel baseava-se na hidratação dos tecidos vegetais em água, seguida do corte e prensagem do material. Ao fazer isso, uma fina rede de fibras de celulose foi formada em um tecido, levando à produção da primeira folha de papel (Iglesias et al., 2015).

A celulose é um polissacarídeo linear, formado por $(C_6H_{10}O_5)_n$. Ela possui características fibrosa e é o principal elemento estrutural da parede celular, que também é composta por elementos como a lignina e a hemicelulose. Além disso, suas cadeias (β -D-glicose 1,4-ligadas) representadas na Figura 4, forma um arranjo em microfibrilas com fortes ligações de hidrogênio (Vidal, 2014; Magalhães, 2018; Dos Reis, 2014; Yi et al; 2020).

Figura 4 – Estrutura linear da molécula de celulose com suas cadeias β -D-glicose 1,4-ligadas



Fonte: Rodrigues, 2010.

2.4 Caju

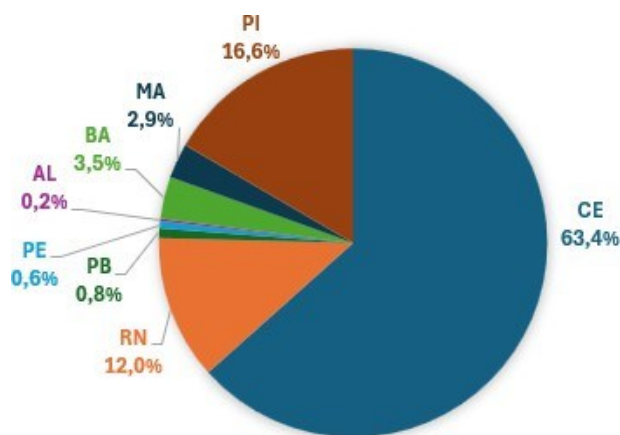
O cajueiro (*Anacardium occidentale L.*) é uma planta tropical nativa do nordeste brasileiro, pertencente à família *Anacardiaceae*. Designada por Lindley em 1830, essa família inclui mais de 700 espécies distribuídas em 82 gêneros que são encontradas majoritariamente em zonas tropicais, embora algumas espécies se estendam a zonas temperadas. Membros dessa família são cultivados em várias partes do mundo devido os seus frutos e sementes comestíveis, seus compostos medicinais, sua madeira e seu efeito paisagísticos. O caju, cujo nome tem origem da palavra tupi-guarani *acaju*, que significa ano, é erroneamente considerado por muitos

como o fruto do cajueiro, quando na realidade trata-se de seu pseudofruto. Ele é constituído basicamente de duas partes: o pseudofruto, o caju, e o fruto propriamente dito, a castanha de caju (Mazzetto e Lomonaco, 2020).

A fruticultura brasileira cresce a cada dia contribuindo para o desenvolvimento da agricultura brasileira, na região nordeste o destaque é para a cajucultura que contribui como uma atividade de elevada importância socioeconômica (Barbosa, 2021)

Dados do IBGE, disponibilizados pelo BNB, indicam que os estados do Ceará, Paraíba, e Rio Grande do Norte representam o maior peso em produção de amêndoa da castanha de caju (ACC), já o pedúnculo é aproveitado sob a forma de sucos, doces, farinha, geleias, néctares, e fermentados, representando apenas 15% da produção do pedúnculo. Por meio do processamento da cajucultura são gerados 3 principais resíduos que são o bagaço de caju que é proveniente do pedúnculo de caju, líquido da casca da castanha de caju (LCC) e as cinzas da casca da castanha de caju (CCCC) ambos pertencentes a castanha de caju. A Figura 5 mostra um panorama de contribuição percentual dos estados do nordeste brasileiro na área colhida com cajueiro em 2020.

Figura 5 – Participação percentual dos estados na área colhida com cajueiro no Nordeste



Fonte: Adaptado de IBGE, 2020.

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. Além disso, o aproveitamento do pedúnculo dentro da cultura do caju é baixo, ocorrendo um desperdício de 80 a 90% da sua produção. Este material apresenta em sua composição 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 (menos de R\$ 0,25/Kg) para diversas aplicações potenciais, como a produção de polpa moldada (Correia, 2013; Queiroz, 2010).

2.5 Aditivos impermeabilizantes

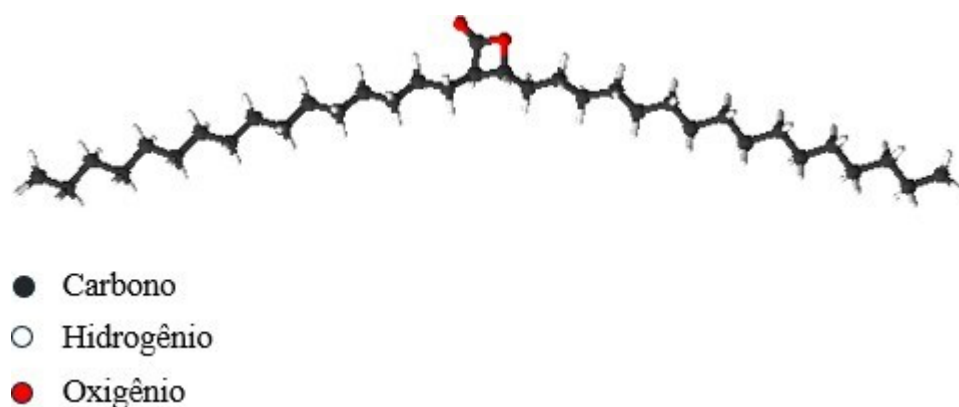
As fibras vegetais são naturalmente hidrofílicas e absorvem prontamente umidade, graxa e óleos, necessitando do uso de aditivos que são usados para dar à polpa moldada e aos papéis uma qualidade à resistência mecânica, umidade e graxa. Dependendo do tipo de fibra e refino, uma interação complexa de ligações de hidrogênio, ligações iônicas, interações dipolares, interações polares induzidas, forças de van der Waals e forças covalentes (para resinas de resistência a úmido) afetam a resistência e outras propriedades da celulose e seus produtos; tanto durante a formação quanto no produto final (Lindström et al., 2005; Semple et al., 2022)

Resinas de colagem, como dímero de alquil ceteno (AKD), anidrido alquenil succínico (ASA) ou polivinilamida (PVAm) são usadas para fornecer repelência à umidade para a celulose na polpa (Lindstrom e Soderberg, 1986) e são cruciais na fabricação de toda a polpa moldada, especialmente embalagens de alimentos. Esses aditivos melhoram a drenagem da teia da celulose e, quando usados em maiores quantidades, ajudam a reter as propriedades estruturais e de isolamento térmico quando a embalagem é exposta a líquidos quentes e/ou vapor. A entrada excessiva de umidade no substrato cliva as ligações naturais de hidrogênio entre as fibras de celulose e a maioria dos agentes repelentes de umidade envolve o revestimento de fibra com um forte agente de reticulação formador de ligação que continua a ligar as fibras se o produto ficar úmido. Os aditivos devem se ligar à superfície da fibra durante a mistura da polpa e não se perder durante a desidratação (Fassler, 2019; Semple et al., 2022).

Existem dois mecanismos principais de interação entre as fibras da polpa moldada e o aditivo impermeabilizante. O primeiro consiste na modificação superficial, em que o aditivo irá atuar como um revestimento, formando um filme hidrofóbico na superfície na polpa (Basak et. al., 2024; Kwon et. al., 2023). O segundo mecanismo consiste na modificação interna, o aditivo se mistura se fixa entre as fibras celulósicas por meio de um fenômeno físico ou químico, tornando-as menos hidrofílicas (Nitfafa et. al., 2023; Li e Neivandt, 2019).

Os dímeros de alquil cetenos são compostos orgânicos baseados no sistema de anéis de 4 membros do oxetano-2-ona. Ligado ao anel de oxetano de dímeros de alquil ceteno tecnicamente relevantes, há um grupo alquil $C_{12}-C_{16}$ na posição 3 e um grupo alquilideno $C_{13}-C_{17}$ na posição 4 (Miller, 2001). O AKD é muito utilizado como agente de colagem neutra e alcalino, conferindo propriedades hidrofóbicas a diversos tipos de papel e cartão e apresentando uma excelente performance em pH de 6 a 8,5. Como todas as colas reativas com a celulose, possui um grupo hidrófobo ligado a um grupo funcional de celulose reativa como mostra a Figura 6 (Degani-vaduz, 2021).

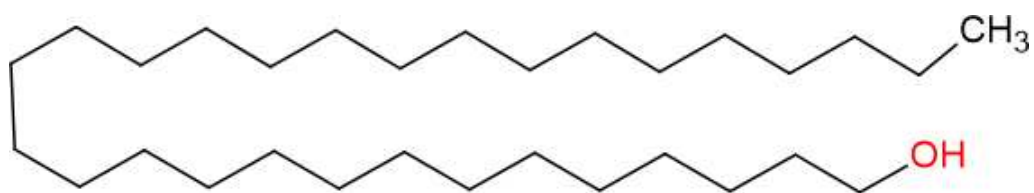
Figura 6 – Representação da cadeia alquílica da cola AKD



Fonte: Do autor.

A cera de carnaúba também é uma boa opção de aditivo impermeabilizante para embalagens de polpa moldada. A cera possui na composição o triacontanol (TRIA) que na forma natural se encontra como um éster e a sua hidrólise o dispõem na forma de álcool. O TRIA é um álcool alifático de cadeia longa cuja fórmula química é $C_{30}H_{61}OH$ (Figura 7). De um modo geral, 85% da cera de carnaúba compõem de ésteres de ácidos graxos, além de pequenas porcentagens de ácidos graxos livres, de álcoois livres, além de pequena quantidade de resinas e hidrocarbonetos. (Júnior e Marques, 2008).

Figura 7 – Estrutura molecular do triacontanol, principal componente da cera de carnaúba



Fonte: Do autor.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo com diferentes concentrações dos agentes impermeabilizantes (cera de carnaúba e AKD), para produção de polpa de papel moldado, composta pela fibra bruta da madeira de cajueiro e fibra bruta do bagaço de caju, visando a produção de embalagens alimentícias.

3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as fibras brutas da madeira de cajueiro e do bagaço de caju por meio da análise lignocelulósica;
- Realizar a caracterização físico-química (colorimetria, absorção, inchamento, ângulo de contato e PVA) e mecânica (ensaios de flexão e tração) dos corpos de prova de polpa moldada impermeabilizados, avaliando as suas propriedades de barreira (hidrofobicidade e resistência mecânica).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

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). As amostras das fibras brutas de madeira estavam armazenadas em temperatura ambiente, enquanto as fibras brutas do bagaço estavam uma câmara fria a 17 °C e descongelada por 12 horas a temperatura ambiente. Em seguida, as duas matérias primas foram homogeneizadas em um moinho de facas Wiley em uma malha de 1,5 mm.

4.2 Análise Lignocelulósica

A caracterização dos componentes lignocelulósicos das matérias-primas, bem como do composto contendo 80% da fibra bruta da poda de cajueiro (FPC) e 20% da fibra bruta do bagaço de caju (FBC), foi realizada por meio da análise lignocelulósica seguindo a metodologia presente no documento 236 (EMBRAPA, Procedimento para análise Lignocelulósica) e cada parâmetro do procedimento feito em triplicata.

4.2.1 Umidade

A umidade de uma amostra está relacionada ao teor de água presente nela. A medição da quantidade de matéria seca foi realizada em uma balança Marte ID50 (Figura 8), que por meio de uma resistência encapsulada em quartzo é capaz de fornecer uma fonte de calor infravermelho. Assim, foram pesadas 1,1 g para cada amostra e analisadas a 105 °C, sendo possível determinar também o teor de umidade (TU%) com base na equação 1:

$$TU\% = \frac{MU-MS}{MU} \times 100 = 100 - \%MS \quad (1)$$

Onde,

MU – Massa Úmida

MS – Massa Seca

Figura 8 – Balança de infravermelho utilizada para análise de umidade



Fonte: Do autor.

4.2.2 Cinzas

As cinzas de uma amostra representam o teor de minerais que estão presentes nela, podendo ser determinado a partir da ignição da amostra, o que irá promover a formação de gás, eliminando a presença de elementos orgânicos como o carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre, consequentemente, restando apenas os elementos minerais.

A determinação do teor de cinzas de uma amostra consistiu na pesagem de 2,00 g do material em um cadinho previamente pesado e calcinado a 600 °C por 30 minutos e resfriado no dessecador. Em seguida, o conjunto amostra-cadinho são levados para a mufla em temperatura ambiente e submetidos a uma rampa de aquecimento 9,6 °C/min, fazendo com que a temperatura de trabalho de 600 °C seja atingida após 60 minutos, permanecendo nessa temperatura por 3 horas.

Ao final do tempo, a temperatura foi reduzida para 200 °C para então retirar o conjunto da mufla e resfriar no dessecador por 30 minutos, pesando logo em seguida. Sendo assim, foi possível calcular o teor de cinzas (TC%) a partir da equação 2:

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

Onde,

MRAC – Massa do conjunto (cadinho + amostra) calcinado

MR – Massa do recipiente (cadinho) calcinado

MA – Massa da amostra calcinada

4.2.3 Extrativos

Componentes que não fazem parte da parede celular de materiais lignocelulósicos e que podem ser extraídos por solventes polares ou apolares são chamados de extrativos.

A determinação do teor de extrativos consistiu em um sistema Soxhlet (Figura 9), no qual foi inserido um filtro de papel seco previamente pesado, contendo 5,0 g do material. A extração foi realizada com 400 mL de hexano P.A. em um balão com pedras de ebulição e sob aquecimento constante até completar 24 ciclos de refluxo. Após isso, o papel é coletado, seco em estufa a 105° e pesado até adquirir uma massa constante. O teor de extrativos (TE%) foi determinado a partir da equação 3:

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

Onde,

MRASE – Massa do conjunto (recipiente + amostra) sem extrativos

MR – Massa do recipiente (filtro de papel)

MA – Massa da amostra

Figura 9 – Sistema de extração por Soxhlet



Fonte: Do autor.

4.2.4 Lignina

A lignina, o segundo polímero vegetal mais abundante na Terra, é um recurso econômico e renovável que pode ser utilizado para aplicações sustentáveis de embalagens de alimentos. A lignina é rica em polifenóis que fornecem excelente funcionalidade, como atividade antioxidante, atividade antibacteriana, propriedades de proteção contra radiação ultravioleta e biocompatibilidade (Priyadarshi, 2024).

Para determinar o teor de lignina na amostra foi necessário pesar cerca 1,00 g do material, sem umidade nem extrativos, acrescentando-o a um almofariz onde foi adicionado 17 mL de ácido sulfúrico 72% (v/v) resfriado em geladeira. Após isso, a amostra foi macerada por 15 minutos com um auxílio de um pistilo e deixada em repouso por 24 horas.

Decorrido o tempo de digestão, foram adicionados 306 mL de água destilada ao almofariz e seu conteúdo transferido para um balão de 1000 mL, que foi conectado a um sistema de refluxo por 4 horas. Finalizado o tempo de refluxo, o conteúdo do balão foi transferido para um funil com placa sinterizada de porosidade 4 (40–100 μm), conforme especificação da norma ISO 4793 — *Laboratory sintered (fritted) filters* (ISO, 2010). (previamente lavado, seco e pesado) que estava conectado a um kitassato, iniciou-se a filtração à vácuo e lavagem do precipitado até obter o pH da água utilizada no procedimento.

Em sequência, o funil foi levado à estufa a 105 °C por aproximadamente 12 horas e pesado em intervalos de 60 minutos até obter uma massa constante. A partir disso, o teor de

lignina insolúvel (TLI%) foi calculado seguindo a equação 4:

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

Onde,

MFL – Massa do conjunto (funil + lignina)

MF – Massa do funil

MA – Massa da amostra

TC% – Teor de cinza

4.2.5 Holocelulose

A “holocelulose” de uma matéria vegetal, geralmente, é utilizada para designar os carboidratos totais presentes nela, ou seja, o termo engloba os valores não apenas da celulose, mas também dos demais carboidratos do tipo pentose.

Primeiramente, para determinar o teor de holocelulose foram pesadas cerca de 3,00 g do material, sem extrativos nem umidade. Acrescentou-se a amostra em um Erlenmeyer, imerso em banho de glicerina a 70 °C, onde foram adicionados 150 mL de água destilada e o agitador magnética.

Na sequência, foram realizadas três adições de 2,5 g de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético glacial em um intervalo de uma hora entre elas e permaneceu por mais 3 horas, percorrendo um total de 5 horas a reação. O sistema foi fechado com um Erlenmeyer menor que permitiu o refluxo do gás cloro formado.

Decorrido o tempo da reação, o conteúdo foi transferido para um funil de placa sinterizada porosidade 2 (10–16 µm), conforme especificação da norma ISO 4793 (ISO, 2010), previamente lavado, seco e pesado, e repetiu o procedimento de filtração e lavagem descrito na seção 4.3.4. Realizadas as pesagens do funil até obtenção de massa constante, foi determinado o teor de holocelulose (TH%) a partir da equação 5:

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

Onde,

MFH – Massa do conjunto (funil + holocelulose)

MF – Massa do funil

MA – Massa da amostra

4.2.6 Alfacelulose

A alfacelulose refere-se à celulose não degradada, possuindo um tamanho molecular maior e mais resíduo de glicose em relação à betacelulose, a fração de celulose degradada.

A determinação do teor de alfacelulose consistiu na pesagem de aproximadamente 1,00 g de holocelulose seca que foi acrescentado em um almofariz contendo NaOH 17,5% (m/v), deixando dois minutos de contato até iniciar o processo de maceração por mais oito minutos. Após isso, adicionou-se 40 mL de água destilada e transferiu o conteúdo do almofariz para um funil de placa sinterizada porosidade 2 (10–16 µm) que foi previamente lavado, seco e pesado.

Ao final, foi repetido a filtração e lavagem descrita anteriormente no procedimento da holocelulose. Após o funil obter uma massa constante, foi determinado o teor de alfacelulose (TA%) por meio da equação 6:

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

Onde,

MFA - Massa do conjunto (funil + alfacelulose)

MF - Massa do funil

MA - Massa da amostra

Além disso, faz-se necessário corrigir o valor do teor de alfacelulose, utilizando o teor de holocelulose, através da equação 7:

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

Com isso, faz-se possível determinar o valor do teor percentual de hemicelulose (THemi%) pela diferença do teor de holocelulose e de alfacelulose, como mostra na equação 8:

$$\text{THemi\%} = \text{TH} - \text{TA} \quad (8)$$

4.3 Tratamentos das fibras brutas para a produção dos corpos de prova

Primeiramente, as matérias-primas utilizadas na produção de polpa moldada foram submetidas a um tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH), procedimento conhecido como polpação química na indústria do papel. O processo de mercerização, termo que também se refere a esse tratamento alcalino com NaOH, é muito empregado na indústria de tecido devido à sua capacidade de hidrolisar e remover impurezas presentes na celulose (Fischer, 2011). Nas fibras brutas, esse processo irá promover a remoção, ou diminuição da hemicelulose, lignina, ceras naturais e óleos presentes, além de reduzir a cristalinidade da celulose (Zunginmaier, 2008).

O procedimento consistiu na adição de 100 g da fibra bruta da madeira de cajueiro em um béquer, contendo uma solução de 2000 mL de NaOH 5% (m/v), aquecido a uma temperatura de 60°C e sob agitação constante por 60 minutos. Após o tempo reacional, a amostra foi filtrada e lavada em água corrente até pH neutro. Essas condições foram testadas e estabelecidas por Damasceno (2025).

Para o tratamento da fibra bruta do bagaço de caju, foi realizado um procedimento semelhante ao descrito acima, substituindo a solução de NaOH para uma concentração de 0,5% (m/v), em uma temperatura reacional de 80°C.

4.4 Produção dos corpos de prova de polpa moldada impermeabilizada

A metodologia empregada na preparação dos corpos de prova foi adaptada de *Association of the Pulp and Paper Industry – T 205 sp-02* (TAPPI, 2002). Os corpos de prova das amostras de controle (00) foram produzidos a partir de 800 mL de água destilada, sendo utilizado 0,4% (m/v) de matéria seca (M.S.) de fibra, onde dessa quantidade 80% é composto de FPC e 20% de FBC. Enquanto, para as amostras impermeabilizadas foi acrescentado o aditivo CC nas concentrações de 10%, 15% e 20% (m/m) em relação a quantidade de M.S. ou AKD nas concentrações de 1%, 2% e 3% (m/v) em relação ao volume da solução. Para cada formulação foram produzidos seis corpos de prova e a quantidade de fibra e aditivo estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1 – Formulações contendo a quantidade utilizada de cada fibra e aditivo para a produção das amostras de polpa moldada

Amostras	Formulações			
	FPC (g)	FBC (g)	AKD (g)	Cera de carnaúba (g)
00	2,56	0,64	—	—
AKD-1	2,56	0,64	8	—
AKD-2	2,56	0,64	16	—
AKD-3	2,56	0,64	24	—
CC-10	2,56	0,64	—	0,32
CC-15	2,56	0,64	—	0,48
CC-20	2,56	0,64	—	0,64

Fonte: Do autor.

Primeiramente, em um liquidificador da marca Vitamix série profissional, foram preparadas suspensões com 800 mL de água destilada e 2,5 g em matéria seca de FPC tratada, processadas na velocidade 5 por 9 minutos até adicionar 1,7 g em matéria seca de FBC tratada, reduzindo para a velocidade 1 por mais 50 segundos de processamento. Após isso, nos últimos 10 segundos, adicionou-se o agente impermeabilizante, completando um tempo de processamento de 10 minutos.

Além disso, nas formulações contendo a cera de carnaúba, foi necessário o seu derretimento antes de adicionar à suspensão, com o liquidificador ainda ligado, realizando o procedimento rapidamente para o aditivo não solidificar antes da filtração.

A solução foi, então, despejada em um sistema de filtração adaptado (Figura 10) imediatamente após o processamento no Vitamix, conectado a uma bomba à vácuo. Ao cessar a drenagem, o sistema foi desmontado, retirando a tela com a polpa, colocando-a sobre um disco de papel de filtro, cuidadosamente, e retirando da tela.

Figura 10 – Sistema de drenagem adaptado para a produção de polpa moldada



Fonte: Aptado de Damasceno, 2025.

A seguir, iniciou-se o processo de secagem e moldagem da polpa que consistiu em prensagens com pequenos pesos (250, 500, 1000, 1500 e 2000 g) de forma gradativa e por 5 minutos cada. Na prensagem por compressão, o material foi colocado entre dois papéis de filtro que estavam cobertos por dois discos de feltro e colocada uma placa de Petri sobre o conjunto de forma que a cada troca de peso também fazia necessária a troca dos filtros ou sempre que estivessem encharcados. Logo após isso, o material quase seco foi deixado em repouso em um molde de amostra preso por parafusos durante 24 horas (Figura 11), permitindo que secasse completamente até a próxima etapa.

Figura 11 – Suporte de secagem das amostras de polpa moldada



Fonte: Do autor.

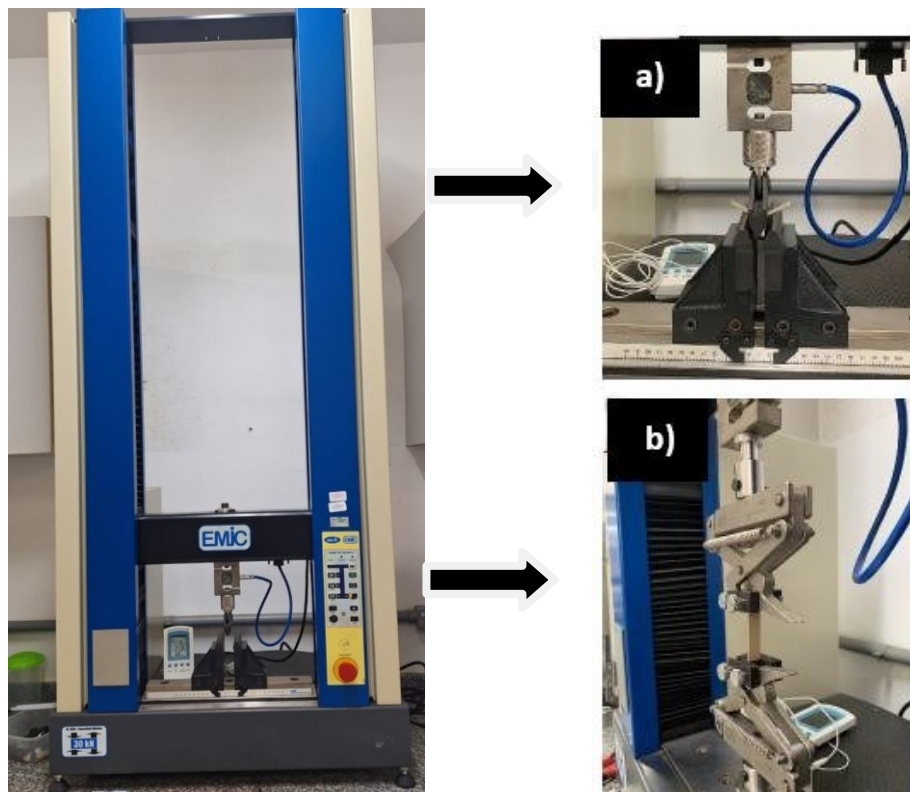
Por fim, o corpo de prova passou por uma prensa hidráulica aquecida da marca Marconi, Ma 098/50A a 150 °C, na qual os corpos de provas foram prensados entre plásticos Myler por 2 minutos e 30 segundos a uma pressão de 8,87 MPA. Em seguida, a pressão foi sendo levemente aliviada em intervalos de 10 segundos até atingir 0.

4.5 Ensaios mecânicos

Foram cortados 14 corpos de prova (7 para cada ensaio mecânico), com 64 mm de comprimento por $12,6 \pm 0,2$ mm de largura, em uma estampadora pneumática e armazenados em dessecador com atmosfera de umidade controlada por 24 horas ($23 \text{ °C} \pm 2$; 50% umidade). Em uma máquina de ensaio universal modelo EMIC DL 30000 (Figura 9) com célula de carga de 500 foram os ensaios de tração uniaxial, operando com velocidade constante de 4 mm/min, seguindo a *American Society for Testing and Materials* - D1037 (ASTM, 1999).

Os ensaios de flexão também foram realizados no EMIC (Figura 9), operando com espaçamento de 25 mm entre os apoios e velocidade de 0,7 mm/min, também em concordância com o estabelecido na norma ASTM D1037 (ASTM, 1999).

Figura 12 – Máquina universal para ensaio mecânico: a) Garra para ensaio de flexão; b) Garra para ensaio de tração



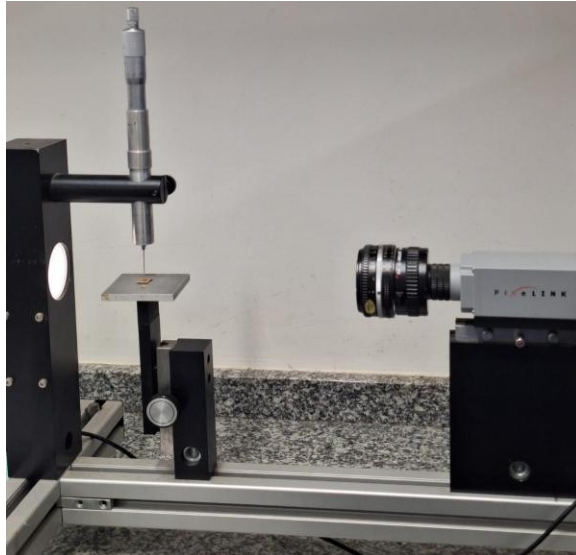
Fonte: Adaptado de Damasceno, 2025.

4.6 Ângulo de contato

Foram cortados 10 quadrados de 12 x 12 mm de cada tratamento, depositada uma gota de água sobre a amostra com o auxílio de uma seringa contendo uma agulha de diâmetro 0,713 mm (Hamilton AG®, Suíça).

Utilizando uma câmera de vídeo da marca pixeLINK (resolução de 752 x 582 pixels), foi capturada uma imagem do software Image J, medido os ângulos formados entre a gota e a superfície da amostra de ambos os lados (Figura 13). O resultado foi representado pela média da medição de 10 amostras, seguindo a norma ASTM D-5725 (ASTM, 1999).

Figura 13 – Equipamento de captura do ângulo de contato entre a superfície do material e a gota de água



Fonte: Do autor.

4.7 Colorimetria

A coloração de embalagens irá variar de acordo com o tipo e concentração do material utilizado, bem como os aditivos empregados para a sua produção (Jacometti, 2015).

A análise de cor dos materiais foi realizada utilizando um espectrofotômetro Konica Minolta, modelo CM-5, ilustrado na Figura 14. O equipamento foi previamente calibrado e operado na função de reflectância, com área de leitura de 30 mm. As medições foram feitas em triplicata, e a interpretação dos resultados foi baseada no diagrama de cromaticidade fornecido pela fabricante e de acordo com o sistema CIELAB.

A análise por meio desse sistema permite conhecer L^* (Luminosidade), que varia de 0 a 100, a^* e b^* que são as coordenadas de cromaticidade. A coordenada a^* , quando o desvio é positivo indica uma tendência a coloração vermelho e, quando negativa indica a cor verde. A coordenada b^* indica uma tendência a cor amarela quando o desvio é positivo e azul quando negativo.

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



Fonte: Do autor.

4.8 Absorção e inchamento

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). Enquanto, o grau de inchamento de um material refere-se ao aumento de volume ou dimensão que um material compósito sofre quando absorve um líquido, geralmente água. É uma propriedade importante que indica a interação entre a matriz polimérica e o agente de reforço (como fibras) em um compósito, além de afetar suas propriedades mecânicas e durabilidade (Kumode, 2011).

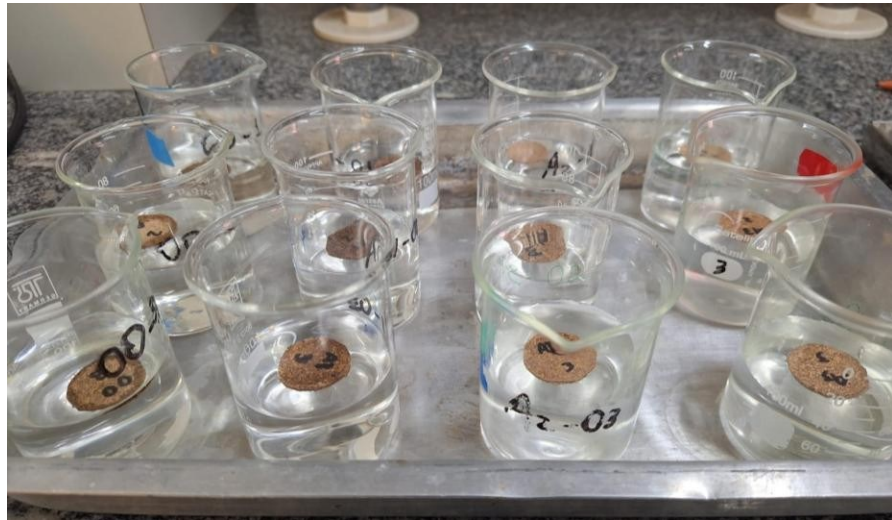
Seguindo a norma técnica da ABNT 1516-2, as análises de absorção e inchamento foram realizadas simultaneamente em triplicata nos mesmos corpos de prova, cujos diâmetros eram de 24 mm. As amostras tiveram suas medidas tomadas com um paquímetro e pesadas em balança analítica, na sequência, foram imersas em um béquer contendo 50 mL de água destilada a 25 °C por 2 horas (Figura 15).

Após isso, os corpos de prova foram secos em papel toalha, repetindo as medidas de espessuras e pesagens. As variações de espessura foram calculadas como inchamento e as variações da massa como absorção de umidade, representando o resultado como a média das 3 amostras e os seus respectivos desvios-padrões. A porcentagem de inchamento e absorção foram obtidas a partir das equações 9 e 10, respectivamente:

$$\text{Inchamento(\%)} = \left(\frac{\text{ESPESSURA FINAL} - \text{ESPESSURA INICIAL}}{\text{ESPESSURA INICIAL}} \right) \times 100 \quad (9)$$

$$\text{Absorção(\%)} = \left(\frac{\text{MASSA FINAL} - \text{MASSA INICIAL}}{\text{MASSA INICIAL}} \right) \times 100 \quad (10)$$

Figura 15 – Ensaio de absorção e inchamento das amostras de polpa moldada



Fonte: Do autor.

4.9 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A determinação da PVA foi realizada conforme os procedimentos descritos na norma ASTM E96-95/E96M (ASTM, 2005). Inicialmente, os corpos de prova de cada formulação foram cortados e suas espessuras determinadas com o uso de um micrômetro. Em seguida, as amostras foram posicionadas em células de permeação, com dimensões internas de 24 mm de diâmetro e 10 mm de altura, contendo 2 mL de água em seu interior.

Após a pesagem inicial, os dispositivos foram armazenados a uma temperatura controlada de 25 °C, em dessecador vertical da marca Arsec, modelo DCV040 (Figura 16), utilizando sílica gel como agente dessecante. Ao longo de 24 horas, foram realizadas oito pesagens em balança analítica, nos seguintes tempos: 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 21 h, 22 h, 23 h e 24 h. Os dados da PVA foram expostos como média e desvio padrão, calculada por meio da equação 11:

$$\text{WVP} = \frac{\omega \cdot X}{t \cdot A \cdot \Delta P} \quad (11)$$

Onde,

X - Espessura média dos corpos de prova (m)

A - Área de permeação ($0,00452 \text{ m}^2$)

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

ω/t - Calculado por regressão linear utilizando ganho de massa, em função do tempo (g/s)

Figura 16 – Células de permeação para análise de PVA das amostras de polpa moldada



Fonte: Do autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Composição lignocelulósica

A composição lignocelulósica das fibras brutas encontra-se na Tabela 2 e os parâmetros destacados correspondem aos seus valores corrigidos. Vale ressaltar que a FBC foi previamente aquecida na estufa a 105°C por 2 horas, resultando em um baixo teor de umidade. Isso foi necessário para não provocar alterações nos extrativos, considerando que poderia haver compostos presentes no material solúveis em água. Tal preparo não foi necessário para a FPC, pois naturalmente possui um baixo percentual de umidade.

A fibra bruta da poda de cajueiro apresentou um teor de lignina de 26,80% e 29,71% para hemicelulose, enquanto a fibra bruta do bagaço de caju apresentou 27,14% de lignina e 10,58 % de hemicelulose. Os resultados do teor de hemicelulose estão próximos dos obtidos por Damasceno (2025) que obteve 28,08% \pm para FPC e 7,31% \pm para FBC.

No entanto, segundo a mesma fonte, o teor de lignina obtido foi de 14,88% \pm 5,97 para FPC e 48,93% \pm 1,82 para FBC, o que pode justificar isso é a própria natureza da molécula em questão que é muito complexa e sua estrutura pode variar a depender da origem da matéria-prima e, principalmente, pelo fato de a autora mencionar que teve problemas na análise de extrativos, interferindo no teor real de lignina das amostras.

De acordo com outro autor (Rodrigues, 2010), o bagaço de caju isento de tratamento alcalino, 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 próximos aos dessa referência, enquanto o da lignina foi inferior. Ressaltando mais uma vez que essas discrepâncias são esperadas, visto que as análises foram feitas com matéria-prima advinda de ambientes distintos, que passaram por diferentes processamentos do pedúnculo para gerar o bagaço.

Tabela 2 – Composição lignocelulósica da fibra bruta do bagaço de caju e fibra bruta da poda de cajueiro

Parâmetros (%)	Fibras	
	FBC	FPC
Umidade	0,88 ± 0,09	4,80 ± 0,11
Matéria Seca	99,12 ± 0,09	95,20 ± 0,11
Cinzas	2,54 ± 0,03	1,27 ± 0,07
Extrativos	6,52 ± 0,87	8,53 ± 0,65
Lignina	27,14 ± 0,77	26,80 ± 0,75
Holocelulose	30,61 ± 2,75	59,86 ± 2,17
Alfacelulose	20,03 ± 2,77	30,15 ± 1,85
Hemicelulose	10,58	29,71

Fonte: Autor.

5.2 Ensaio Mecânicos

5.2.1 Ensaio de Flexão

A resistência máxima a flexão e o módulo de elasticidade das amostras encontram-se na Tabela 3, onde é possível notar que a maioria das formulações com os agentes impermeabilizantes contribuíram para um aumento considerável desses parâmetros. Em destaque, as amostras de CC-10 e AKD-1 obtiveram uma resistência máxima a flexão de 15,61 e 15,33 MPa, respectivamente e em média. Amostra de CC-10 também obteve um maior valor do módulo de elasticidade em média 1546,51 MPa, ou seja, as ligações fibra-fibra da polpa moldada ficaram menos rígidas nessa formulação.

Para fins de comparação, Lang et al. (2022) encontrou bandejas comerciais de polpa de pseudocaule de bananeira com 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 e, para amostras de polpa moldada a partir do bagaço de maçã com e sem aditivos, módulos de elasticidades entre 211,1–577,6 MPa. Isso revela que essas formulações geradas a partir das fibras do bagaço de caju e madeira de cajueiro apresentam, em geral, uma maior maleabilidade.

A razão para isso pode ser compreendida melhor através de uma análise complementar de microscopia eletrônica de varredura (MEV) a fim de averiguar a morfologia e estrutura das fibras e suas interações entre si e com os aditivos. Alguns trabalhos se concentraram nesse tipo de estudo das fibras celulósicas, utilizando essa técnica mencionada (Zaini, 2025; Mott, 1996; Spadetti, 2017).

Tabela 3 – Resistência máxima a flexão e módulo de elasticidade das amostras de polpa moldada obtidas no ensaio de flexão

Amostras	Resistência Máxima a Flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
00	$7,56 \pm 0,85$	$566,03 \pm 245,35$
AKD-1	$15,33 \pm 3,34$	$1154,96 \pm 443,90$
AKD-2	$8,45 \pm 2,86$	$619,21 \pm 252,06$
AKD-3	$12,17 \pm 1,74$	$842,46 \pm 147,07$
CC-10	$15,61 \pm 3,59$	$1546,51 \pm 602,34$
CC-15	$10,61 \pm 1,14$	$1121,17 \pm 334,08$
CC-20	$11,45 \pm 3,39$	$1176,78 \pm 587,31$

Fonte: Do autor.

5.2.2 Ensaio de Tração

Em relação aos ensaios de tração, cujos resultados de tensão máxima estão expostos na Tabela 4, apenas 3 formulações apresentaram uma maior resistência que as amostras sem aditivos, com destaque para as formulações de AKD-1, CC-15 e CC-20 que apresentaram $10,66 \pm 0,42$, $12,52 \pm 1,99$ e $12,48 \pm 1,34$ MPa, respectivamente.

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). Dessa forma, as formulações de CC-15 e CC-20 estão dentro do padrão de qualidade mecânica em termos de tração, próximos de valores encontrados em produtos de celulose moldada de uso comercial.

O que foi dito sobre os ensaios mecânicos de flexão, também pode ser aplicado para os ensaios de tração a respeito da morfologia das fibras e suas interações com os aditivos que influenciam nas propriedades mecânicas do material final, podendo sendo melhor compreendida através da MEV.

Tabela 4 – Tensão máxima das amostras de polpa moldada obtida no ensaio mecânico de tração

Amostras	Tensão Máxima (MPa)
00	$6,71 \pm 1,90$
AKD-1	$10,66 \pm 0,42$
AKD-2	$5,62 \pm 0,53$
AKD-3	$6,98 \pm 0,53$
CC-10	$4,75 \pm 2,78$
CC-15	$12,52 \pm 1,99$
CC-20	$12,48 \pm 1,34$

Fonte: Do autor.

5.3 Ângulo de Contato

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). Desta forma, a partir da Tabela 5, apenas duas das formulações atingiram essa classificação de hidrofóbica que foram as amostras de AKD-2 e AKD-3, apresentando um ângulo de contato ($^\circ$) de $91,67 \pm 6,43$ e $90,08 \pm 4,17$, respectivamente.

Em um estudo semelhante, Roman (2024) obteve um AC de $63,8^\circ$ para uma amostra de papel virgem (não revestido ou sem aditivo) e $87,21^\circ$ com a adição de revestimento biodegradável de polissacarídeo.

Tanto nesse estudo referencial quanto o do presente trabalho, é revelado que as amostras com aditivos contribuem para um ângulo de contato maior que as amostras sem eles, evidenciando os efeitos de dimensionamento hidrofóbico proporcionado por esses aditivos a partir dos mecanismos de modificação interna ou de revestimento.

Por fim, vale ressaltar que não existe nenhum regulamento nacional que exija o AC de uma embalagem de um determinado material seja superior a 90°, pois depende muito do tipo de alimento e mesmo que esse apresentasse uma alta atividade de água, não seria possível viabilizar o uso dessa embalagem apenas por essa análise.

Tabela 5 – Ângulo de contato das amostras de polpa moldada

Amostras	Ângulo de Contato (°)
00	62,16 ± 3,75
AKD-1	86,02 ± 3,42
AKD-2	91,67 ± 6,43
AKD-3	90,08 ± 4,17
CC-10	84,56 ± 3,00
CC-15	81,00 ± 4,26
CC-20	81,80 ± 2,51

Fonte: Do autor.

5.4 Colorimetria

Pelos dados apresentados na tabela 6, pode-se observar que todos os valores das amostras com aditivos apresentaram uma menor luminosidade (L*) em comparação com a amostra de controle, ou seja, as amostras contendo os agentes impermeabilizantes tornaram o compósito mais escuro, o que não necessariamente seria um ponto negativo, uma vez que a cor não influencia nas propriedades de barreira do material e é utilizada apenas como um parâmetro qualitativo.

Para os parâmetros a* e b* (coordenadas de cromaticidade), todas as amostras apresentaram um resultado positivo, indicando que há uma tendência do material para tons

avermelhados e amarelados.

Por fins de comparação, Singh (2020) obteve um L^* variando entre 79 a 90, a^* negativo e b^* positivo em seus filmes compostos de bagaço de mirtilo.

Tabela 6 – Parâmetros de cor das amostras de polpa moldada da análise de colorimetria

Amostras	Parâmetros		
	L^*	a^*	b^*
00	$61,31 \pm 1,57$	$4,62 \pm 0,37$	$17,66 \pm 0,52$
AKD-1	$48,71 \pm 2,95$	$6,91 \pm 0,31$	$17,05 \pm 0,71$
AKD-2	$55,24 \pm 1,71$	$6,62 \pm 0,31$	$18,62 \pm 0,80$
AKD-3	$55,17 \pm 0,66$	$6,27 \pm 0,16$	$18,29 \pm 0,50$
CC-10	$54,77 \pm 4,42$	$5,59 \pm 0,46$	$18,08 \pm 0,63$
CC-15	$55,15 \pm 2,99$	$5,23 \pm 0,35$	$17,76 \pm 0,57$
CC-20	$52,05 \pm 5,24$	$5,01 \pm 0,37$	$17,55 \pm 0,88$

Fonte: Do autor.

5.5 Absorção e Inchamento

Conforme os dados da Tabela 7, as formulações com AKD apresentaram uma menor porcentagem de absorção e inchamento. A formulação de AKD-1 apresentou $11,91 \pm 1,90$ para absorção e $16,95 \pm 1,27$ para inchamento, enquanto AKD-2 e AKD-3 também apresentaram valores inferiores a 20% para os respectivos parâmetros.

O que pode explicar esse melhor desempenho das formulações contendo AKD é o próprio mecanismo de interação desse aditivo com as fibras celulósicas, a modificação interna promove uma maior aglutinação entre as fibras por meio de forças intermoleculares, evitando fendas que permitiriam uma maior interação com o meio aquoso e deixaria o material mais molhado/úmido, algo indesejável para embalagens alimentícias por causa do risco de contaminação microbiológica

Tabela 7 – Variação de espessura e massa das amostras de polpa moldada do ensaio de absorção e inchamento

Amostras	Absorção (%)	Inchamento (%)
00	174,14 ± 32,20	51,79 ± 11,07
AKD-1	11,91 ± 1,90	16,95 ± 1,27
AKD-2	13,17 ± 1,09	14,42 ± 4,80
AKD-3	12,86 ± 0,71	13,19 ± 0,19
CC-10	134,05 ± 8,63	31,49 ± 6,70
CC-15	61,69 ± 1,89	37,61 ± 4,09
CC-20	43,08 ± 1,21	33,85 ± 1,04

Fonte: Do autor.

5.6 Permeabilidade ao vapor de água

O coeficiente de permeabilidade ao vapor de 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).

A partir da definição acima, a Tabela 8 mostra que a amostra contendo CC-15 apresentou um valor para PVA de 2,39 g.mm/kPa.h.m², e a amostra de CC-20 apresentou 2,96 g.mm/kPa.h.m², essas duas formulações apresentaram uma grande redução desse parâmetro em relação a amostra de controle. Isso pode ser justificado através da atuação da cera de carnaúba como um filme que reveste as fibras superficialmente, impedindo que vapores entrem e interajam com a teia celulósica, o que pode ser visualmente notado após o processo de drenagem da polpa, pois foi possível observar um brilho nos corpos de prova contendo esse revestimento.

Ademais, esse resultado mostrou que a cera de carnaúba nessas concentrações seria um aditivo mais viável para embalagens contendo alimentos quentes, ou seja, que liberam mais vapor.

Tabela 8 – Permeabilidade ao vapor de água e espessura das amostras de polpa moldada

Amostras	Espessura (mm)	PVA (g.mm/kPa.h.m²)
00	0,84 ± 0,09	10,87 ± 2,00
AKD-1	1,13 ± 0,13	7,48 ± 2,78
AKD-2	1,06 ± 0,09	9,35 ± 1,50
AKD-3	0,94 ± 0,14	6,12 ± 0,33
CC-10	1,00 ± 0,18	9,77 ± 2,47
CC-15	0,66 ± 0,08	2,39 ± 1,11
CC-20	0,69 ± 0,05	2,96 ± 0,30

Fonte: Do autor.

6 CONCLUSÃO

O estudo realizado nesse trabalho foi baseado no modelo de economia circular, com a proposta de reaproveitar o bagaço de caju que é um resíduo da indústria de beneficiamento do caju, assim como a madeira proveniente das podas periódicas de cajueiro e transformá-los (suas fibras) em polpa de papel moldado para a produção de embalagens com adição de agentes impermeabilizantes em sua composição, como uma forma alternativa de minimizar o uso de embalagens plásticas.

Diante dos resultados obtidos, foi possível observar que os agentes impermeabilizantes, no geral, contribuíram na modificação das propriedades físico-química das fibras da polpa, conferindo um maior caráter hidrofóbico ao material, tendo como base as análises de absorção e inchamento, PVA e AC, o que favorece o uso da polpa moldada como embalagem para alimentos com alta atividade de água. Além disso, os aditivos contribuíram para uma maior resistência mecânica e flexibilidade do material, tornando a polpa moldada mais maleável e flexível, reduzindo os riscos de rachaduras superficiais.

O mecanismo de modificação interna pela cola AKD em determinadas concentrações, possibilitou um maior ângulo de contato e menor porcentagem de absorção e inchamento no material, enquanto o mecanismo de revestimento da cera de carnaúba em maiores concentrações, ajudou na obtenção de uma menor PVA. Em relação aos ensaios no EMIC, ambos aditivos, no geral, elevaram a resistência mecânica da polpa moldada, possibilitando o seu uso em embalagens que contenham alimentos mais sensíveis a choques mecânicos.

Portanto, a partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar a eficiência dos aditivos dímero de alquil ceteno e cera de carnaúba para a melhoria das propriedades de barreira, visando a aplicação da polpa moldada, a partir de resíduos da cajucultura, como embalagem de alimentos. Ademais, se faz necessário estudos complementares posteriores como a microscopia eletrônica de varredura que ajudará a compreender melhor o comportamento morfológico das fibras no compósito e suas interações com os aditivos.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/perfil-2023-industria-do-plastico-impulsiona-economia-brasileira-gerando-mais-de-370-mil-empregos/>. Acesso em 28 jul. 2025.
- ABRE – Associação Brasileira da Embalagem. Dados de mercado, 2024. Disponível: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2024-2/>. Acesso em 28 jul. 2025.
- ABD EL-SAYED, E.S.; EL-SAKHAWY, M. Fibras não madeireiras como matéria-prima para a indústria de celulose e papel. **Nord. Pap da polpa. Res. J.**, v. 35, p.215–230, 2020.
- ALVES, P. F. S.; MOREIRA, S. A. F.; LOPES, P. A. P.; KOITI, M. Cera de carnaúba como impermeabilizante e tamanho do torrão na determinação da densidade do solo. **Cienc. suelo Ciudad Autónoma de Buenos Aires**, v. 36, n. 2, p. 76-79, 2018.
- AMORIM BATISTA, J. V. de; OLIVEIRA, C. T. A. Microplásticos Uma Revisão De Literatura Sobre Sua Relação Com Peixes Marinhos E Transferência Para Seres Humanos. **Zoologia: divulgando o conhecimento científico**, v. 1, p. 64-81, 2023.
- ANDRADE, Felipe da Silva. **Filmes biopoliméricos de amido com adição de subprodutos da cajucultura: caracterização físico-química e propriedades funcionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- 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: 28 jul. 2025.
- ASSIS, Adriana Helfenberger Coletto. Processo de produção de celulose e papel. Processo de produção de celulose e de papel. **Editora Intersaberes**, 2024.
- ASTM**. ASTM D1037-99: *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 1999.
- ASTM**. ASTM D5725-99: *Standard Test Method for Surface Wettability and Absorbency of Sheeted Materials Using an Automated Contact Angle Tester*. West Conshohocken: ASTM International, 1999.

ASTM. ASTM E96/E96M-05: *Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2005.

BASAK, S.; DANGATE, M. S.; SAMY, S. Oil- and water-resistant paper coatings: a review. **Progress in Organic Coatings**, v. 186, p. 1079, 2024.

BNB – Banco do Nordeste. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/231/1/2020_CDS_114.pdf. Acesso em 28 jul. 2025.

DAMASCENO, Luana Bernadino. **Uso de resíduos da cajucultura para a produção de embalagens de polpa moldada**. Tese (Graduação em Química Bacharelado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

DEBNATH, M.; SARDER, R.; PAL, L.; HUBBE, M. A. 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.; BISSACO, G.; MCALOONE, T. C.; PIGOSSO, D. C. A.; HOWARD, T. J. Fabricação de celulose moldada: Visão geral e perspectivas para a tecnologia de processo. **Packaging Technology and Science**, v. 30, n. 6, 2017.

DOMINGOS, A. L. M.; PEREIRA, A. C. M.; NOLETTO, A. P. R.; REIS, A. B. Caracterização de revestimento biopolimérico visando aplicação em embalagens celulósicas. **A Revista de Engenharia e Ciências Exatas**, v. 4, n. 2, 2018.

EUGENIA, 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**, p. 1 – 26, 2019.

FISCHER, K.; MARQUARDT, K.; SCHLÜTER, K.; GEBERT, K., BORSCHER, E. M.; HEIMANN, S., LEE WAYLAND JR, R. Textile Auxiliaries. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 2000.

IGLESIAS, M. C; GOMEZ-MALDONADO, D.; VIA, B. K.; JIANGE, Z.; PERESIN, M. S. Processos de polpação e seus efeitos nas fibras de celulose e propriedades da celulose nanofibrilada: uma revisão. **Forest Products Journal**, v. 70, p. 10-21, 2020.

ISO. ISO 4793:2010 — *Laboratory sintered (fritted) filters*. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

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.

JÚNIOR, J. A. M.; MARQUES, L. G. A. Cera de Carnaúba. **Cadernos de Prospecção**, v. 2, n. 1, p. 36-38, 2009.

KWON, G.; PARK, J.; LEE, K.; KO, Y.; JEON, Y.; LEE, S.; KIM, J.; YOU, J. Hydrophobic, Sustainable, High-Barrier Regenerated Cellulose Film via a Simple One-Step Silylation Reaction. **Polymers**, v. 15, n. 8, p. 1901, 2023.

LANG, C. V.; JUNG, J.; WANG, T., ZHAO, Y. Investigation of mechanisms and approaches for improving hydrophobicity of molded pulp biocomposites produced from apple pomace. **Food and Bioproducts Processing**, v. 133, 2022.

Li, L., Neivandt, D.J. O mecanismo de dimensionamento do dímero de alquil ceteno (AKD) em filmes modelo de celulose estudado por espectroscopia vibracional de geração de frequência de soma. **Celulose** **26**, p. 3415–3435, 2019.

LOMONACO, D; MELE, G.; MAZZETTO, S. E. Líquido de casca de castanha de caju (CNSL): de um resíduo agroindustrial a uma alternativa sustentável aos recursos petroquímicos. **Líquido de casca de castanha de caju: Um campo de ouro para materiais funcionais**, p. 19-38, 2017.

MAGALHÃES, W. L. E.; F. C. C. Produção de filmes de celulose nanofibrilada. EMBRAPA comunicado técnico 413, Colombo PR, 2018.

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.

MATTOS, A. L. A.; LOMONACO, D.; ROSA, M. de F.; SOUZA FILHO, M. de S. S. M.; ITO, E. N. Cashew tree wood flour activated with cashew nut shell liquid for the production of functionalized composites. **Composite Interfaces**, v. 25, n. 2, p. 93-107, 2017.

MOTT, L.; SHALER, S. M.; NOIVO, L. H. Uma técnica para medir distribuições de deformação em fibras de polpa de madeira simples. **Wood and Fiber Science**, n. 4, 1996.

MOURA, Raquel Maria de Carvalho. **Utilização de polpa moldada de papel como solução**

de embalagem no setor alimentar. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Lisboa, Faculdade de Belas-Artes, 2021.

NTIFAFA, Y.; XU, L.; BOLLINGER, S.; JI, Y.; HART, P. W. Alkenyl Succinic Anhydride: The Question of Covalent Bonding and Chemistry Considerations for Better Sizing – Review. **Polymers**, v. 15, n. 13, p. 2876, 2023.

OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, Z.; OLIVEIRA, L.; LIBRALATO, G.; BIANCOLINO, F.; PRATO, E. Uma visão geral sobre os perigos dos microplásticos para o ecossistema marinho e a saúde humana. **Água**, v. 17, p. 916, 2025.

PLOHL, O.; FRAS ZEMLJIC, L. Decomposição e fragmentação de resíduos plásticos convencionais e de base biológica em sistemas aquáticos simulados e reais. **Política Ambiental Clean Techn**, 2024.

PRIYADARSHI, R; GHOSH, T.; PUROHIT, S. D.; PRASANNAVENKADESAN, V.; RHIM, J. W. A lignina como material sustentável e funcional para aplicações ativas de embalagens de alimentos: uma revisão. **Jornal de Produção Mais Limpa**, v. 469, p. 143-151, 2024.

RATTANAWONGKUN, P.; KERDDONFAG, N.; TAWICHA, N.; INTATHA, U.; SOYKEABKAEW, N. Improving agricultural waste pulps via self-blending concept with potential use in moulded pulp packaging. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, 2020.

RIBEIRO, J. L.; VALE, A. D. B. do; NETO, P. de A. Recomendações técnicas para o cultivo do Cajueiro-Anão-Precoce na Região Meio-Norte do Brasil. Circular Técnica, 50, EMBRAPA. Teresina, PI, 2008.

ROMAN, I.; M., NECHITA, P.; VASILE, A. M; GUIMAN, M. V. Desempenho de embalagens de alimentos e impacto ambiental de papéis revestidos com polissacarídeos, **BioResources**, v. 19, n. 4, p. 6994–7018, 2024.

SANTOS, Aline da Conceição. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais para produção de embalagens biodegradáveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, 2017.

SANTOS, Sueli Vieira dos. **Síntese e caracterização de SnO₂, MoO₃, SnO₂-MoO₃ via o método Pechini empregando glicerol como polialcool e seu emprego na conversão da xilose.** Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

SILVA, R. F. D.; MOURA, L. D. L.; GAVIÃO, L. O.; PONTES, A. T.; LIMA, G. A. B.; BIDONE, E. D. Interdependências e trade-offs entre os objetivos do desenvolvimento sustentável: avaliação de municípios brasileiros pelas três dimensões da sustentabilidade.

Interações (Campo Grande), v. 22, n. 2, p. 637-652, 2021.

SINGH, A. K.; ITKOR, P.; Lee, M.; SHIN, J.; Lee, Y. S. Promoting sustainable packaging applications in the circular economy by exploring and advancing molded pulp materials for food products: a review. **Critical Reviews in Food Science & Nutrition**, v. 62, n. 11, p. 1–16, 2022.

SINGH, A.; GU, Y.; CASTELLARIN, S. D.; SILVA, D. D.; PRATAP-SINGH, A.

Desenvolvimento e Caracterização dos Filmes de Embalagens Comestíveis Incorporados com Bagaço de Mirtilo. **Alimentos**, v. 9, p.1599, 2020.

SPADETTI, C.; SILVA FILHO, E. A. da; SENA, G. L. de; MELO, C. V. P. Propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de Polipropileno pós-consumo reforçados com fibras de celulose. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 27, p. 84-90, 2017

SU, Y.; YANG, B.; LIU, J.; SUN, B.; CAO, C.; ZOU, X.; LUTES, R.; HE, Z. Perspectivas para substituição de alguns plásticos em embalagens por materiais lignocelulósicos: uma breve revisão. **BioResources**, v. 13, n. 2, 2018.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI.

TAPPI T 205 sp-02: *Forming handsheets for physical tests of pulp*. Atlanta: TAPPI Press, 2002.

VALLE, M. P. V.; GUARNIERI, P.; FILIPPI, A. C. G. Adoção de embalagens plásticas sustentáveis agroalimentares: um olhar na dinâmica da produção orgânica e sustentável em face da Economia Circular. **Interações (Campo Grande)**, v. 24, p. 211-227, 2023.

YIFAN, LIU; SHUFENG, MA; WANG, F.; WANG, L. Advances in research of molded pulp for food packaging. **Journal of Renewable Materials**, v. 11, p. 3831-3846, 2023.

ZAINI, L. H; SURISSETTY, J.; LAMMER, H.; VEIGEL, S.; ALTMUTTER, W. The suitability of fibers from the inner part of oil palm trunks for molded pulp packaging materials, **Industrial Crops and Products**, v. 234, 2025.

ZHANG, Y; CHAO, D.; SWETHA, K. B.; ZHIBIN, H.; YONGHAO, N. Molded fiber and pulp products as green and sustainable alternatives to plastics: A mini review. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 7, n. 1, 2022.

ZUGENMAIER, P. Celulose cristalina e derivados: caracterização e estruturas. **Springer Berlin Heidelberg**, n. 6, p. 175-203, 2008.