



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
CENTRO DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE - CCA
Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e
Sustentabilidade na Amazônia PPG/CASA



**VALORIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS BIODEGRADÁVEIS
PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUO LIGNOCELULÓSICO DA CASCA DE CASTANHA-DO-
BRASIL**



Mestranda: Maria Lucidalva Ribeiro de Sousa
Orientadora: Dra. Arianne Mendonça Kluczkovski
Coorientadora: Dra. Adriana Dantas Gonzaga de Freitas



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
CENTRO DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE - CCA
Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e
Sustentabilidade na Amazônia PPG/CASA



MARIA LUCIDALVA RIBEIRO DE SOUSA

VALORIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
BIODEGRADÁVEIS PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUO
LIGNOCELULÓSICO DA CASCA DE CASTANHA-DO-BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Sustentabilidade

Orientadora: Profa. Ph.D. Ariane Mendonça Kluczkovski

Coorientadora: Profa. Dra. Adriana Dantas Gonzaga de Freitas

MANAUS-AM

2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S725v Sousa, Maria Lucidalva Ribeiro de
Valorização e caracterização de compósitos poliméricos biodegradáveis produzidos a partir de resíduo lignocelulósico da casca de castanha-do-Brasil / Maria Lucidalva Ribeiro de Sousa . 2024
102 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Ariane Mendonça Kluczkovski
Coorientador: Adriana Dantas Gonzaga de Freitas
Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Fibra. 2. Mercerização. 3. Mev. 4. Sustentabilidade. I. Kluczkovski, Ariane Mendonça. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

MARIA LUCIDALVA RIBEIRO DE SOUSA

**VALORIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
BIODEGRADÁVEIS PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUO
LIGNOCELULÓSICO DA CASCA DE CASTANHA-DO-BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia.

Aprovado em 18 de março de 2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Ariane Mendonça Kluczkovski – Presidente
Universidade Federal do Amazonas/UFAM

Prof. Dr. Salomão Rocha Martin
Universidade Nilton Lins

Profa. Dra. Raiane Aila Teixeira
Fundação de Vigilância em Saúde/ FVS-RCP

Profa. Dra. Francimara Souza da Costa
Universidade Federal do Amazonas/UFAM

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu senhor Deus, por ter me dado saúde, sabedoria e discernimento e me conduzir à realização desse grande processo que foi o mestrado.

Ao grande apoio que obtive da minha **FAMÍLIA**, pelas palavras de conforto a mim desferidas nos momentos mais difíceis e ensinamentos para enfrentar e superar as barreiras vivenciadas, afinal de contas, uma vida sem desafio é uma vida morta. À minha mãe, irmã/prima Ayla Marinho, meu irmão/primo Akaz Marinho, a minha tia/mãe Antonia Ana Marinho e Conceição Marinho, pelo apoio e ajuda nos momentos em que mais precisei, as risadas os choros, afinal faz parte, muitíssimo obrigada!!

Ao meu esposo, professor e psicólogo, **Antonio Joel Marinho de Sousa** por todo amor, paciência e por estar ao meu lado em todos os momentos, que Deus nos abençoe sempre.

À Profa. Dra. **Ariane Mendonça Kluczkovski**, a qual tenho a honra de ter como orientadora. Agradeço a oportunidade de suas orientações e por ter acreditado no meu potencial quanto pesquisadora.

Agradeço à minha coorientadora a Profa. Dra. **Adriana Dantas Gonzaga de Freitas** por toda a ajuda, cuidado e pelas suas excelentes contribuições científicas.

Agradeço imensamente à minha colaboradora Dra. **Waldireny Rocha Gomes**, por toda a ajuda, cuidado, paciência, ensinamentos e por ser uma grande inspiração para mim.

Aos amigos e colegas de laboratório, Lucia, Hanna, Samir, Wanderson, Cláudia, Gabriel, Raquel, Maria Gabriele, Josiane e Diogo por toda a ajuda e auxílio durante esta pesquisa, vocês foram cruciais para que esse trabalho fosse desenvolvido. Ao NECTA, LaMAC, LEM e UEA.

À FAPEAM pela bolsa de pesquisa que me permitiu desenvolver este trabalho e terminar no tempo hábil.

A Universidade Federal do Amazonas – UFAM, pela oportunidade. Agradeço, aos professores, técnicos e demais colaboradores do PPGCASA, em especial ao professor Tijolo (Dr. Carlos), voluntário na secretaria do PPGCASA, por estar sempre nos ajudando a resolver as burocracias.

A todos sem exceção que colaboraram de alguma forma, direta ou indiretamente, para que esse trabalho se tornasse realidade, muito obrigada!

A todos (as), minha infinita **GRATIDÃO**.

*... Deus, eu tenho tantas bênçãos
Posso em minha vida enxergar
Quanto mais vejo os detalhes
Sua bondade posso encontrar*

*... Pai, e enquanto eu viver
Sempre irei me lembrar
Ainda que sejam infinitas
Suas bênçãos, eu irei contar*

*Trecho da música: Bênçãos que não
tem fim – Isadora Pompeo.*

*Em busca da realização de um sonho
é preciso abraçar feixes de espinhos,
pois para que se encontre o oásis
temos que encarar o deserto.*

Joel Marinho

RESUMO

Os compósitos ecológicos e renováveis obtidos de fibras lignocelulósicas são cada vez mais utilizados para substituir materiais convencionais formados a partir de compósitos de materiais sintéticos que permitem reduzir o efeito das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, os compósitos poliméricos com fibras vegetais emergem como uma alternativa promissora no campo dos materiais para diversas aplicações de engenharia. Nesse sentido, o presente trabalho objetivou obter e caracterizar três materiais compósitos biodegradáveis a partir dos resíduos lignocelulósicos da casca de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*). As fibras passaram por modificação química (mercerização e branqueamento) usando solução de 5% de NaOH e 10% de H₂O₂ caracterizadas juntamente com as fibras da casca *in natura* quanto as suas propriedades físico-químicas, mecânicas e morfológicas. O método de preparação foi realizado conforme as normas ABNT-NBR 14810-2, utilizando-se a técnica de moldagem por compressão a quente. Foram produzidos três compósitos: a) com fibras *in natura*, b) mercerizada e c) branqueado. Foram avaliados e comparados os ensaios físicos: umidade, densidade e inchamento; os ensaios mecânicos: flexão estática, elasticidade e o ensaio morfológico desses compósitos. Ao avaliar os teores de celulose presentes na casca de castanha *in natura*, mercerizada e branqueada e compará-los com os obtidos em outros estudos, foi possível destacar teores diferenciados e significativos de 42,48%, 60,28% e 71,04% respectivamente, isso se dá devido a retirada parcial ou total de extrativos, lignina. Por FRX, para as fibras mercerizadas e branqueadas. o resíduo é rico em Na com (43,36%) e (58,30%) respectivamente, seguido de potássio (26,00%) e em maior percentual de cálcio para a mercerizada (19,038%). Com as análises TGA foi possível observar os estágios de degradação térmica dos materiais. Os ensaios mecânicos apontaram o aumento significativo na tensão de ruptura das fibras tratadas. Os compósitos são caracterizados como painéis de fibras de média densidade (MDF) conforme as normas. A partir das micrografias dos compósitos obtidas com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) depois dos ensaios mecânicos, observou-se uma melhora na adesão da fibra com a matriz com os tratamentos químicos. Assim, esse estudo demonstrou que os compósitos obtidos da casca da castanha-do-Brasil, e resina (PU) possuem características de interesse do setor, como fontes renováveis de baixo custo de um resíduo pouco aproveitado, agregando valor e dando possibilidade de novas aplicações em relação aos compósitos produzidos de fibras sintéticas.

Palavras-chave: Fibra, Mercerização, MEV, Sustentabilidade

ABSTRACT

Ecological and renewable composites made from lignocellulosic fibers are increasingly being used to replace conventional materials made from composites of synthetic materials to reduce the effect of greenhouse gas emissions. In this context, polymer composites with plant fibers are emerging as a promising alternative in the field of materials for various engineering applications. With this in mind, the aim of this study was to obtain and characterize three biodegradable composite materials made from lignocellulosic waste and modified through the chemical treatment of Brazil nut shells (*Bertholletia excelsa*) and castor oil-based polyurethane resin. The fibers underwent chemical modification (mercerization and bleaching) using NaOH and H₂O₂ solutions and were characterized together with the raw bark fibers in terms of their physicochemical, mechanical, and morphological properties. The preparation method was carried out in accordance with ABNT-NBR 14810-2, using the hot compression molding technique. Three composites were produced, one with in natura, mercerized and bleached fibres. The physical tests: moisture, density, and swelling; the mechanical tests: static bending, elasticity and the morphological test of these composites were evaluated and compared. When evaluating the cellulose content of fresh, mercerized and bleached chestnut shells and comparing them with those obtained in other studies, it was possible to highlight different and significant levels of 42.48%, 60.28% and 71.04% respectively, which is due to the partial or total removal of extractives and lignin. By XRF, for mercerized and bleached fibers. the residue is rich in Na with (43.36%) and (58.30%) respectively, followed by potassium (26.00%) and the highest percentage of calcium for the mercerized (19.03%). TGA analysis showed the stages of thermal degradation of the materials. The mechanical tests showed a significant increase in the tensile strength of the treated fibers. The composites are characterized as medium-density fibreboard (MDF) according to the standards. The micrographs of the composites obtained by SEM after the mechanical tests showed an improvement in fiber adhesion to the matrix with the chemical treatments. Thus, this study showed that composites made from Brazil nut shells and resin (PU) have great potential in the market, as they are made from renewable sources, at a low cost from a waste that is little used, adding value and giving the possibility of new applications compared to composites made from synthetic fibers.

Keywords: Fiber, Mercerization, SEM, Sustainability

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. Problema de pesquisa	13
3. Objetivos.....	14
4.1 Castanha-do-Brasil (<i>Bertholletia excelsa</i>).....	16
4.2 Resíduos lignocelulósicos de castanha-do-Brasil.....	16
4.2.1 Fibras	19
4.2.2 Lignina.....	20
4.2.3 Hemicelulose	22
4.2.4 Celulose	23
4.3 Resina poliuretana à base de óleo de mamona e seu uso em compósitos	24
4.4 Compósitos – Panorama geral.....	26
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
6. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	54
CAPÍTULO I. ARTIGO 1- Potencial e caracterização de compósitos lignocelulósicos a partir de resíduos de castanha-do-Brasil como insumo de novos materiais: uma revisão bibliográfica.....	53
CAPÍTULO II. ARTIGO 2 - Caracterização de Fibra <i>in natura</i> , mercerizada e branqueada da casca de castanha-do-Brasil (<i>Bertholletia excelsa</i>) visando seu potencial para o uso na construção civil.....	66
CAPÍTULO III. ARTIGO 3- Propriedades Físicas e Mecânicas de biocompósitos Polimérico Reforçado com Fibra de casca de castanha-do-Brasil (<i>Bertholletia excelsa</i>) e resina poliuretana.....	86
7. CONCLUSÃO.....	101
REFERÊNCIAS.....	103

1. INTRODUÇÃO

A região amazônica possui grande relevância na geração de renda para várias comunidades extrativistas com a produção de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*). A atividade de exportação tem significado financeiro para diversos estados brasileiros, porém, os resíduos gerados na produção precisam ser aproveitados, no sentido de contribuir com a sustentabilidade (FIGUEIREDO, 2021).

Com base em dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023), em 2022, o Brasil produziu 38,169 mil toneladas de castanha-do-Brasil, sendo assim o segundo maior produtor de castanha. Em destaque, está o estado do Amazonas, sendo responsável por 14,303 mil toneladas. Durante o processamento da castanha são geradas quantidades significativas de resíduos de biomassa, sendo a casca mais um subproduto gerado, que na maioria das vezes, não possui uma destinação adequada (LIMA et al., 2021).

Neste cenário, a preocupação em relação ao ambiente cresce, pois, a produção gera resíduos, especialmente no processo de fabricação da castanha-do-Brasil. O volume de resíduos é alto devido ao fato de o fruto que está dentro do pericarpo (ouriço) e o mesocarpo (casca) ser descartado, assim como a amêndoa quebrada, que não se enquadram no modelo de comercialização da amêndoa (SANTOS, 2014).

Usualmente, apenas a amêndoa é vista como produto a ser aproveitado, assim sendo, todo o resto do fruto (ouriço, casca e película), cerca de 90%, resulta em resíduos (SOUZA; SILVA, 2021). Com 2,4kg, aproximadamente, o valor do fruto e cerca de 1/3 é destinado as sementes, conseqüentemente cada fruto pode gerar cerca de 1,9kg de resíduos, que são destinados ao meio ambiente, sendo que esses resíduos podem ser reaproveitados de diversas formas (BRASIL, 2020; OLIVEIRA; LOBO, 2002; SOUZA; SILVA, 2021).

Uma das formas de agregar valor ao subproduto da castanha-do-Brasil como resultado do beneficiamento da castanha, é o uso de sua biomassa lignocelulósica, um material fibroso que tem sido objeto de estudos devido à procura de indústria, preocupada em solucionar sérios problemas que esses resíduos podem ocasionar ao ambiente. Estas pesquisas utilizam as fibras lignocelulósicas de diversas fontes, como cargas em matrizes poliméricas, a fim de estudar o desempenho mecânico ou as propriedades de barreira destes materiais para uso parcial ou integral em diversos produtos (KHALIL et al., 2012).

Ao serem reutilizadas, as fibras lignocelulósicas de castanha-do-Brasil trazem menos poluição e desperdício, agregando assim custo benefício e menos impacto ambiental. Existem

poucos trabalhos em relação ao beneficiamento de celulose no uso em compósitos diferentes da biomassa lignocelulósica, onde seu uso é maior, como relatam vários estudos. Com grande disponibilidade, acelerada renovação, economia, baixo peso e altas propriedades específicas das fibras vegetais e alta resistência, permitem que sejam consideradas uma alternativa paralela às fibras sintéticas (MISRA; PANDEY; MOHANTY, 2015).

Nesse contexto, dentre as soluções atualmente estudadas, está a aplicação em biocompósitos de fibras lignocelulósicas como material substituto, principalmente para compósitos sintéticos e outros materiais técnicos ditos tradicionais, que podem trazer diversas vantagens, garantindo um ambiente mais sustentável. Os compósitos produzidos de fibras vegetais oferecem muitos benefícios em termos de desempenho ambiental, entre eles, serem renováveis, recicláveis e principalmente, biodegradáveis (MANSOR, 2019).

Existe grande interesse em utilizar as fibras lignocelulósicas, o que propicia diversas linhas de pesquisa, desde a sua extração; inclusão para novos materiais parcial ou integral; verificação de sua resistência; além da obtenção de novos produtos a partir delas. Dentre as principais vantagens para o uso de casca de castanha-do-Brasil na produção de compósitos (painéis), destaca-se o fato de se obter esse resíduo em abundância com baixo custo. Também possuem propriedades físico-mecânicas apropriadas para a produção de compósitos, por serem oriundas de processos extrativistas, agregando assim, mais sustentabilidade às florestas nativas e menos impacto ambiental (SANJAY et al., 2018).

A casca de castanha-do-Brasil é rica em fibras lignocelulósicas, dentre elas um alto teor de celulose (~30% a 49%) (UEDA, 2018). Assim sendo, as cascas de castanha podem ser consideradas também como uma das fontes com grandes quantidades de celulose a partir de resíduos agroindustriais.

O uso de fibra celulósica de casca de castanha-do-Brasil para a utilização como reforço na preparação de compósitos é inexistente na literatura, sendo usualmente feito com toda a fibra lignocelulósica, não ocorrendo a separação, mesmo que algumas pesquisas publicadas tenham demonstrando que a celulose é eficiente na interação entre a carga e a matriz nos compósitos, ocasionando assim, o aumento nas propriedades mecânicas e térmicas, como demonstram estudos feitos com compósitos de fibra celulósica a partir da casca de arroz (BATTEGAZZORE et al., 2019). Os painéis poliméricos que contêm adição de materiais lignocelulósicos e celulósicos apresentam muitas vantagens, pois esses reforços naturais geralmente são mais leves, além de mais atrativos economicamente, por serem de baixo custo e fornecerem resistência maior do que os reforços inorgânicos (CAMPO et al., 2011).

Logo, visando o potencial produtivo e a grande disponibilidade da casca de castanha-do-Brasil, este trabalho teve como objetivo produzir, caracterizar e comparar três materiais compósitos (painéis) biodegradáveis, a partir dos resíduos lignocelulósicos modificados com tratamento químico e resina poliuretano à base do óleo de mamona, visando possíveis novos produtos, com melhor resistência e durabilidade, como forma de valorizar os resíduos da agroindústria e aproveitar os recursos naturais disponíveis, diminuindo assim o impacto no meio ambiente.

2. PROBLEMA DE PESQUISA

A produção de resíduos pela agroindústria tem aumentado anualmente, representado uma das principais problemáticas na preservação do meio ambiente, sendo um dos causadores de diversos impactos ambientais. O desenvolvimento de compósitos biodegradáveis e sua valorização resultam no emprego destes resíduos em variadas aplicações, possibilitando uma alternativa ao uso de materiais sintéticos a base de recursos petroquímicos advindos de materiais fósseis, que geram poluição.

Sendo ainda pouco difundidas, as fibras lignocelulósicas e celulósicas tem o seu uso frequentemente realizado em ambiente interno somente, por geralmente conter baixa resistência a umidade e mecânica. No entanto, por meio de variados tratamentos e novos aglomerantes (resinas), se busca melhorar a eficiência dos materiais criados a partir das fibras vegetais.

Sendo assim, o presente projeto de pesquisa visou responder a seguinte problemática: Qual o desempenho mecânico, físico e estrutural dos compósitos poliméricos produzidos a partir das fibras lignocelulósicas e modificado através de tratamento químico de casca de castanha-do-Brasil a partir da interação entre reforço (casca) e matriz (resina) e de que maneira podem ser aplicados no dia a dia?

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Obter e caracterizar três materiais compósitos biodegradáveis a partir dos resíduos lignocelulósicos e modificados com tratamento químico da casca de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) e resina poliuretano à base do óleo de mamona.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os resíduos *in natura*, mercerizado e branqueado, obtidos a partir da casca da semente de castanha-do-Brasil;
- Formular compósito de matriz polimérica com resina de poliuretano e reforços de casca de castanha-do-Brasil, com compósitos em massa de resina do óleo de mamona (PU);
- Avaliar a influência do tratamento químico de mercerização e branqueamento nas propriedades físicas, térmicas, morfológicas e mecânicas dos compósitos produzidos;
- Determinar as propriedades físicas, mecânicas e morfológicas dos materiais compósitos obtidos.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*)

A castanheira é uma das espécies arbóreas de maior importância econômica, social e ecológica da região amazônica, apresentando madeira de excelente qualidade.

Seu fruto é conhecido como ouriço, sendo rígido, e define-se como o resíduo de atividades extrativistas (KLUCZKOVSKI et al., 2021; NOGUEIRA et al., 2018). As reservas da castanheira-do-Brasil têm importância histórica para a economia do extrativismo na Amazônia, que engloba os estados da região Norte.

Trata-se de uma árvore (figura 1) de grande porte, podendo chegar a alturas de 50 a 60 metros. Seu tronco é escurecido e liso, com galhos apenas nas extremidades. É considerada uma das mais belas árvores da floresta amazônica, por sua grandeza, com diâmetro de base de dois metros (BRASIL, 2020).

Figura 1– Castanheira e ouriço



Fonte: própria (2024).

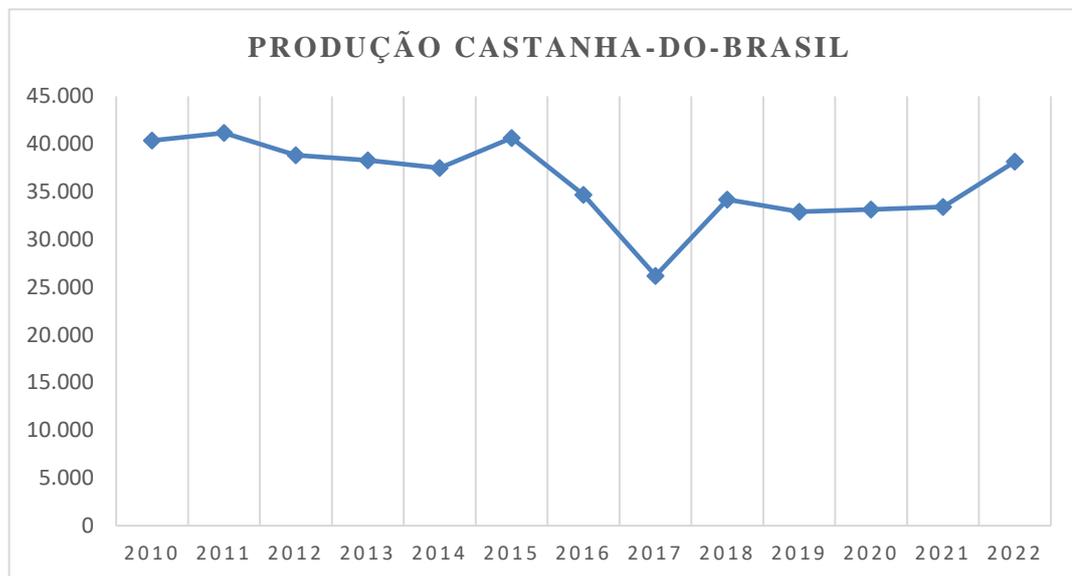
A castanheira é uma espécie nativa da Amazônia, sendo da família Lecythidaceae. As sementes levam cerca de 14 meses para amadurecer, tendo a casca dura e lenhosa. O ouriço pesa em média até dois quilos e contém 8 a 24 sementes triangulares de até 2 cm de largura e 5 cm de comprimento (CARDOSO et al., 2017). Sendo descrita em 1807 por Humboldt e Bonpland, a castanheira é a única espécie no gênero *Bertholletia*. Os nomes vernáculos da *B.*

excelsa em português são: castanha-do-Brasil, castanha-do-pará e castanheira (SANTOS et al., 2018).

As árvores de castanha-do-Brasil são encontradas em diversos países: Bolívia, Colômbia, Guianas, Peru, Venezuela, entre outros. No Brasil, são encontradas nos estados do Acre, Amazonas, Maranhão, Pará, Rondônia, e no norte dos estados de Goiás e Mato Grosso (CHAVES, 2007). A castanheira se adapta geralmente a florestas com clima quente e úmido, como a floresta amazônica.

Conforme os dados Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (2023) a produção brasileira de castanha-do-Brasil (Figura 2) foi de cerca 38,169 mil toneladas, com arrecadação de 170,006 mil a mais que o ano de 2021, para o valor da produção em reais de castanha. O estado do Amazonas obteve destaque em quantidade de castanhas produzidas, sendo de 14,303 mil toneladas. No valor de produção, o resultado foi de 46,456 mil, sendo inferior apenas a produção para o estado do Acre, que ficou no total de 57.247, sendo equivalente a 20,4% do total produzido no país.

Figura 2 – Produção de castanha-do-Brasil



Fonte: PEVS- Produção da extração vegetal e da silvicultura

(<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/castanha-do-para/am>). Gráfico elaborado pela autora (2024).

4.2 Resíduos lignocelulósicos de castanha-do-Brasil

A castanha-do-Brasil é um dos principais produtos não-madeireiros da Amazônia com grande comercialização no mercado internacional. O maior peso da castanha formado por

pericarpo e casca, que somando-se chega-se a 90% do peso que é descartado, gerando grandes quantidades de resíduos lignocelulósicos durante o período de cultivo e a produção (SOUZA; SILVA, 2021).

O desenvolvimento de métodos para produzir bens de consumo a partir de fontes naturais, incluindo recursos renováveis e ecologicamente corretos, tornou-se um objetivo dos esforços de pesquisa e desenvolvimento, com a reutilização de materiais vegetais lignocelulósicos nativos, a maioria dos quais são biomassa terrestre, sendo importante e rico neste campo (PETRECHEN, 2017). Se trata de uma grande demanda ambiental agregar valor a esses resíduos lignocelulósicos, uma vez que a porcentagem de material descartado é em relação ao que é exportado para alimentação.

Existem vários tipos de agroindústrias na região amazônica que produzem milhares de toneladas de resíduos por dia, todavia, não há ainda um beneficiamento de forma total desses resíduos. A maior parte destes é produzida a partir de produtos de origem vegetal, sendo divididas em: caroço de açaí, fibra de coco verde, resíduos de folha de dendê, prensa de óleo de palma e resíduos do processamento de frutas diversas (ALAMAR, 2012). Entre esses resíduos, encontra-se também o da castanha-do-Brasil.

Há resíduos provenientes de outras atividades, como os da indústria têxtil, que também contribuem para o acúmulo de materiais em aterros sanitários ou descartados aleatoriamente na natureza, causando danos muitas vezes irreversíveis para o meio ambiente. Para superar essa lacuna, estão sendo estudados processos de reaproveitamento destes resíduos, para reduzir os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado, bem como o desenvolvimento de novas tecnologias com alto valor agregado (BOSENBECKER, 2018).

Uma das formas mais viáveis para aplicação desses resíduos é o seu uso como reforço de compósitos para a criação de novos subprodutos. Por ter um alto volume de produção de castanha-do-Brasil na região amazônica, a quantidade de descarte resultante é muito maior do que é consumido. O resíduo agroindustrial de castanha-do-Brasil é produzido em grandes quantidades no Amazonas, devido ao estado ser um dos maiores produtores de castanha no Brasil (IBGE, 2023).

Usualmente apenas as amêndoas são aproveitadas, pois são comestíveis, sendo todo o fruto restante, cerca de 90%, descartado: a parte externa do fruto, chamada ouriço, que forma o pericarpo; e o interior, que são os tegumentos (cascas do fruto), de onde são tiradas as amêndoas (BOUVIE, BORELLA, PORTO, SILVA, LEONEL, 2016).

A castanha-do-Brasil contribui para a geração de resíduos, não apenas pela composição do fruto e sua pequena fração aproveitável comercialmente, mas também pelo seu importante

papel na produção de produtos da extração de plantas não lenhosas. Conseqüentemente, é importante encontrar formas de valorar esses resíduos, dando-lhes um destino diferente do descarte (PINHEIRO, 2022).

Os materiais vegetais lignocelulósicos que existem em um volume alto nos resíduos, estão sendo usadas como reforços para compósitos poliméricos, uma vez que essas fibras podem contribuir para diminuir o impacto ambiental que o uso de fibras sintéticas traz ao meio ambiente. Material lignocelulósico é um termo utilizado para se referir a materiais compostos de lignina, hemicelulose e celulose, estando geralmente associado a plantas de madeiras consideradas duras ou macias (AHMAD; ZAKARIA, 2019).

As fibras naturais como madeira, abacaxi, coco, sisal e casca de arroz são usados como materiais de reforço em compósitos, entre elas está o uso também da casca de castanha-do-Brasil, pois segundo Silvia; Neto; Radovanovic, (2008), a grande quantidade de resíduos dessas fibras ao serem descartadas no solo sem os devidos cuidados, podem contribuir para o aumento de grandes concentrações de lignina e sílica, um problema com difícil solução.

Assim como muitos produtos oriundos da floresta cujo potencial para indústria de compósitos é considerável, a castanha-do-Brasil é abundante, assim como seu descarte, com resíduos que podem ser empregados como insumos de novos materiais, por serem considerados um reforço natural, ecologicamente correto e de baixo custo. Por ser classificada como carga lignocelulósica natural, há possibilidade de serem usados por diferentes matrizes poliméricas (PETRECHEN et al., 2019).

Dentre os diversos estudos relacionados ao uso dos resíduos de casca de castanha-do-Brasil, está a reutilização no setor energético e na engenharia civil, para produção de argamassa, fabricação de tijolos e como reforços para o desenvolvimento de novos subprodutos. A utilização de fontes alternativas de energia, principalmente a biomassa, é de grande importância para a preservação do meio ambiente, pois reduz a queima de produtos tóxicos, como petróleo, que ocasiona o aumento do efeito estufa, além de apresentar um alto custo para produção e transporte. A biomassa possibilita energia mais limpa e renovável, contribuindo também na geração de renda (SANTOS et al., 2018).

O uso dessas fibras vegetais em compósitos e outros subprodutos é de grande importância, pois agregam valor ambiental, social e econômico. Quando analisado sob as perspectivas econômicas e tecnológicas, os resíduos da castanha possibilitam a produção de materiais econômicos, com baixo custo ao serem utilizados como material de reforço ou até mesmo na substituição parcialmente ou integralmente de matérias-primas utilizadas em materiais de construção convencionais (MILANI; FREIRE, 2006).

Com relação ao aspecto e ao impacto ambiental, a utilização das fibras lignocelulósicas de casca de castanha-do-Brasil permitem a redução do volume de descarte, do uso de queima indiscriminada e até mesmo evitando o descarte no meio ambiente de forma inadequado (NAVAS; REBOREDO; GRANADOS, 2015).

Por ser um desafio constante buscar um destino adequado a esses resíduos, estudos que colaboram com a reutilização desses, foram desenvolvidos como forma de agregar valor ao meio ambiente. Com o uso desses resíduos como a casca e do ouriço da castanha-do-Brasil foi possível verificar que a maioria traz a utilização para uso como reforço à fabricação de painéis, tendo como uma das principais finalidades estudar a precisão mecânica e física desses compósitos como uso parcial ou integral, trazendo assim benefícios com a diminuição de impactos ambientais com descarte desses minerais no solo.

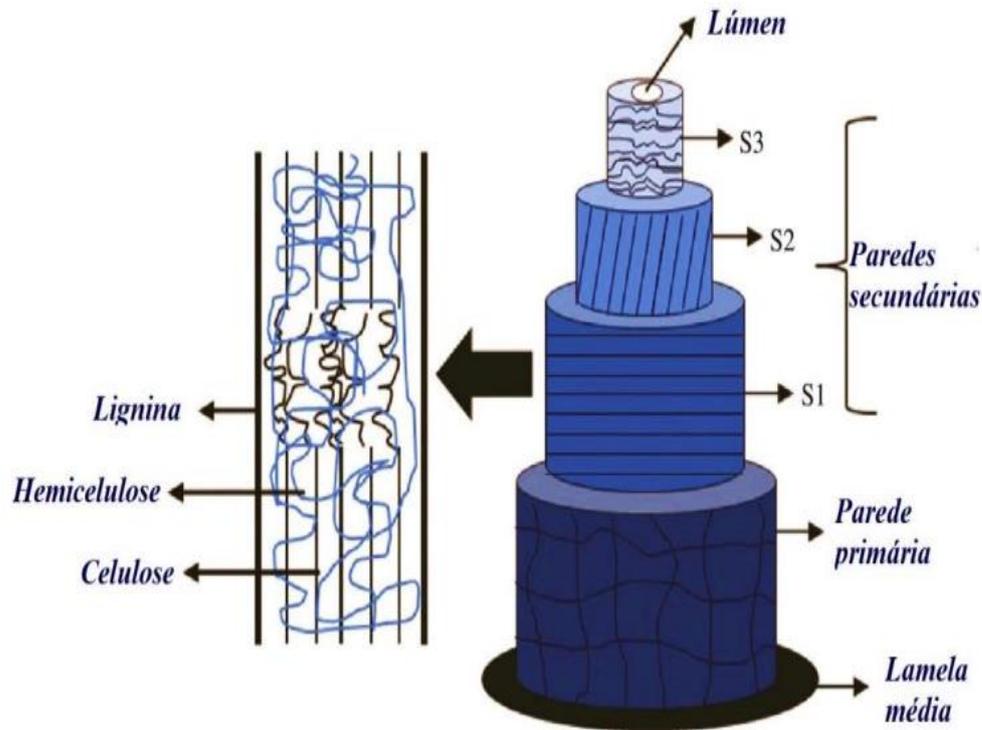
4.2.1 Fibras

As fibras estão presentes em grandes quantidades nas plantas, frutos, folhas e sementes, tendo um grande valor econômico e ambiental. Podem ocorrer de forma *in natura* ou após o processamento. As fibras naturais são de origem animal, de origem vegetal e de origem mineral. São constituídas por um grupo de filamentos formados por fibrilas, unidas por componentes químicos, orgânicos e não cristalinos (ABDUL KHALIL; BHAT; IREANA YUSRA, 2012).

As fibras lignocelulósicas (figura 3) têm em sua estrutura um complexo emaranhado de polímeros primários de lignina, hemicelulose e celulose, que compõem as paredes celulares vegetais, além de componentes secundários chamados extratores, cujo conteúdo varia entre as espécies (SANTANA JUNIOR, 2020).

Por serem conhecidos como os biopolímeros mais abundante da natureza, essas fibras vegetais têm baixo custo de reutilização. Em destaque temos a celulose e a lignina, que juntas são responsáveis por 15% a 35% da biomassa lignocelulósica (AHMAD; ZAKARIA, 2019; RASTOGI; BANERJEE, 2019).

Figura 3 - Representação da estrutura de uma fibra natural: lamela média, parede primária, S1 – parede secundária externa, S2 – parede secundária média e S3 – parede secundária interna e lúmen



Fonte: Silva et al. (2009), adaptado de Pereira et al. (2015).

Pereira et al. (2015) explicam que as estruturas das fibras nas cadeias celulósicas são distribuídas por um canal denominado de lúmen, que tem como função o transporte de nutrientes e água para planta. Por sua vez, há paredes secundárias que são subdivididas em S1, S2 e S3, onde são encontradas as microfibrilas, parede primária e lamela média.

A qualidade das fibras pode ser alterada conforme são processadas e extraídas, contribuindo assim para obter um resultado promissor ou não. Conforme Figueiredo, (2020) as fibras são guiadas pelos valores de rigidez e resistência, sendo de grande importância levar em conta essas características ao selecionar uma fibra para uso como reforço.

4.2.2 Lignina

A lignina faz parte das fibras lignocelulósicas, sendo o segundo polímero mais abundante na Terra, depois da celulose (BOERJAN et al., 2003). Parte da biomassa vegetal contém lignina, proveniente principalmente das indústrias de madeira, papel e biocombustíveis, sendo assim, considerada um resíduo (BATISTA et al., 2018).

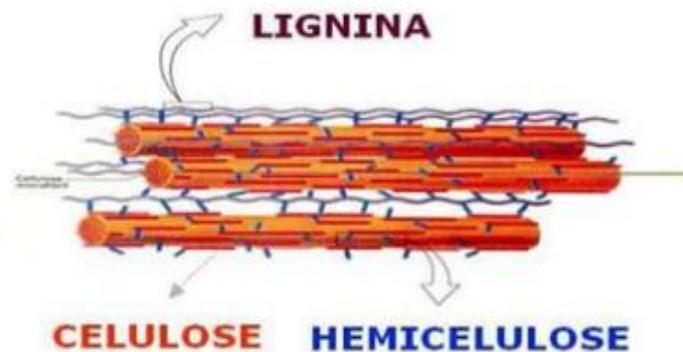
Geralmente são resultantes de processos agrícolas (CHÁVEZ-SIFONTES, DOMINE, 2013), podendo ser isolada de várias fontes lignocelulósicas (madeiras, plantas cultivadas, fibras e sementes) (COLLINS et al., 2019). É bastante requisitada, pois é considerada

biopolímero, produzido a partir de fontes de recursos renováveis (CHANG et al., 2016), o que os tornam ecologicamente corretos, uma vez que os materiais sintéticos causam danos ao meio ambiente ao serem descartados, principalmente quando isso ocorre sem nenhum tratamento prévio.

As ligninas têm em sua composição variados grupos funcionais, como: fenilpropanóide reticulada, originando-se de três monômeros precursores do álcool, a saber, guaiacil (G) coniferílico, sinapil (S) sinapílico e p-hidroxifenil (H) cumarílico, com todas as unidades ligadas por ligações aril éter e C-C, resultando em uma rede polimérica irregular e reticulada (WANG et al., 2019). Por possuir uma característica fenólica, as ligninas atuam como fungicida, protegendo as celuloses e as hemiceluloses (RAVEN et al., 2007; KLOCK et al., 2005).

A sua estrutura complexa, no entanto, poderá variar mediante a sua origem botânica, a partir de como foi extraído e o período de colheita. As ligninas formam ligações químicas somente com as hemiceluloses e não se ligam com as estruturas de celuloses (SANTIAGO, et al., 2013; NORTON et al., 1990) como demonstra na figura 4.

Figura 4 – Cadeias de celulose envolvidas por lignina e hemicelulose



Fonte: Adaptado pelo autor, Pereira Jr. et al (2008).

A lignina é um dos componentes importantes para a confecção de papel nas indústrias. Segundo Singh e colaboradores (2019), a produção anual de lignina está entre 5 e 36 x 10⁸ toneladas por ano. Um número bem expressivo, tornando promissor o desenvolvimento de mais alternativas para o seu uso, já que esse material é de baixo custo.

A literatura relata várias aplicações, como uso em biorremediações de solo, indústrias e principalmente como reforço em diversos compósitos. Por se tratar de um polímero em grande

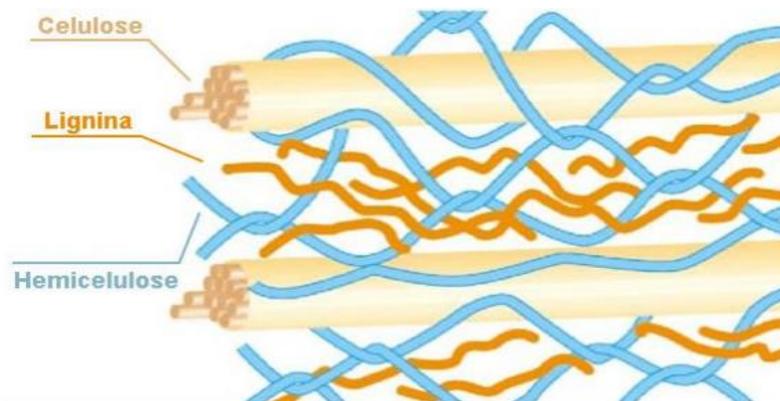
quantidade e não tóxicos, há a possibilidade de serem utilizadas como veículo para administração de medicamentos (BEISL; FRIEDL; MILTNER, 2017).

4.2.3 Hemicelulose

A hemicelulose é um polissacarídeo, que está ligada a lignina e a celulose, formando assim a parede vegetal, podendo variar muito o seu componente dentro da célula. A cadeia dos polímeros hemicelulósicos pode consistir em um único monossacarídeo ou em várias unidades, dependendo da natureza do tecido vegetal e da espécie vegetal a qual pertence (FENGEL et al., 2003).

Trata-se de um biopolímero natural, encontrado em grandes quantidades no meio ambiente, perdendo somente da celulose e da lignina neste aspecto, e compõe cerca de 15 a 35% da fibra lignocelulósica na parede vegetal (AHMAD; ZAKARIA, 2019; RASTOGI; BANERJEE, 2019). Estrutura-se em polímeros (Figura 5) bem complexos com ramificações, cadeias curtas com grupos de hidroxila e acetila em sua estrutura. Possuem ainda uma massa molar expressivamente inferior à da celulose, é higroscópica e parcialmente solúvel em água (SPINACÉ et al., 2009).

Figura 5 - Componentes das fibras vegetais lignocelulósicas



Fonte: ARGENBIO (2022).

Por ser natural e disponível como subproduto renovável, a hemicelulose vem sendo submetida a vários estudos e usos. Atualmente é empregada na composição de biofilmes para embalagens de alimentos (HANSEN; PLACKETT, 2008). Os polímeros à base de hemicelulose com toda a sua especificidade e característica têm o potencial de substituir os materiais sintéticos a base de petróleo (JIN et al., 2019).

Na literatura é descrita como material que tem resistência mecânica e um teor de flexibilidade alta, sendo assim, a hemicelulose apresenta desempenho positivo para auxiliar parcial ou integral novas alternativas sustentáveis ao meio ambiente.

4.2.4 Celulose

A celulose é o biopolímero mais comum no mundo, sendo uma fonte quase inesgotável de matéria-prima para a crescente demanda por produtos ecologicamente corretos e biocompatíveis (MENG et al., 2017).

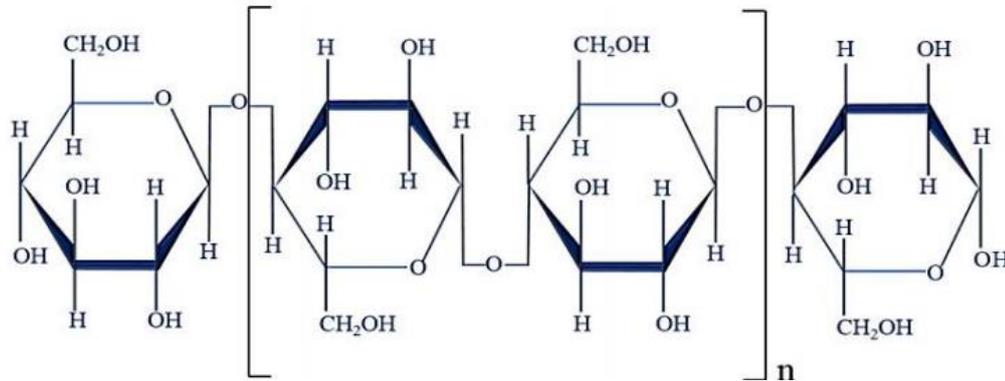
Trata-se de um polímero com propriedades únicas, como estabilidade química, derivações químicas, baixo custo, biodegradabilidade e grande resistência mecânica (KLEMM, HEUBLEIN, FINK, BOHN, 2005). Esse polímero é o mais importante na estrutura das plantas, trazendo manutenção para a parede celular, além de o principal componente das fibras lignocelulósicas (KOUADRI; SATHA, 2018).

Possui grande demanda em diversos setores, por sua importância econômica e ambiental, sendo utilizada na produção de papel, etanol, tintas, aditivos para materiais de construção, produtos farmacêuticos (SANTOS et al., 2017). É utilizada também na produção de combustíveis e aplicação como reforço em produtos compósitos (TAMILSELVI et al., 2019).

O conhecimento da estrutura molecular da celulose é de suma importância, pois descreve as propriedades específicas, como hidrofiliabilidade, biodegradabilidade e a capacidade de trabalhar em alta eficiência (CZADERNA et al., 2018).

A celulose (figura 6) é um polissacarídeo e tem estrutura linear fibrosa que possui como unidade de repetição a celobiose. Estes, são formados por duas unidades de glicose, ligadas por conexões químicas envolvendo átomos de oxigênio (ligações do tipo β -1,4 glicosídica), (KERI et al., 2015). Devido aos seus muitos grupos hidroxila e à sua taticidade, a celulose forma fortes pontes de hidrogênio intra e intermoleculares, dando origem às suas estruturas tridimensionais, supramoleculares e semicristalinas (EICHHORN, 2011).

Figura 6 - Moléculas de celulose



Fonte: BENAIMECHE et al., (2019).

A celulose é um material que encontrado em grandes quantidades nas plantas, dotadas de características únicas, diante disso, pode ser uma fonte de grande potencial para substituir os polímeros sintéticos em diversas aplicações, entre elas para o uso de compósitos. A celulose, conforme Chavan (2019) ainda é muito utilizada em grande escala nas indústrias para fabricação de papel, sendo seu uso principal.

4.3 Resinas poliuretana à base de óleo de mamona e seu uso em compósitos

A resina é extraída de mamona, a partir do óleo e muito difundida em diversos procedimentos, como uso na indústria de cosméticos, fibras sintéticas, farmacêuticas como adesivos e entre outros. Conhecida pelo nome científico *Ricinus communis*, é um arbusto nativo de regiões tropicais e subtropicais que crescem a partir de sementes, das quais se retira o óleo por meio de prensagem. O principal componente desse óleo é o ácido graxo ricinoleico, que possui múltiplas aplicações (KAUR et al., 2019; RODRIGUES, 2008).

A resina de poliuretano (PU) à base de mamona apresenta-se como uma alternativa aos adesivos à base de formaldeído aplicados na produção de compósitos, evitando inconvenientes relacionados à origem não renovável e emissão de poluentes, além de reduzir o consumo de energia devido as menores temperaturas ao pressionar os painéis fabricados (BERTOLINI et al., 2013).

Os adesivos com formaldeído têm um baixo custo para as fabricações de compósitos, todavia, trazendo em sua composição componentes que agriem e causa impacto ao meio ambiente com emissão de gases tóxicos. A temperatura para o uso desse adesivo pode chegar

(130 °C a 200 °C) (MANTANIS et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2017; ROFFAEL; SCHNEIDER; DIX, 2015), apresentando também, grande dificuldade para sua reciclagem.

A resina a base de óleo de mamona ainda é pouco utilizada em relação aos demais adesivos convencionais, entretanto, é amplamente encontrada em diversas pesquisas, por se tratar de uma biomassa vegetal renovável e apresentando menor temperatura com uso a partir de 60 °C, mostrando assim uma eficácia ambiental em relação aos outros adesivos (BERTOLINI et al., 2014; CARVALHO et al., 2014; SOUZA et al., 2018).

Além destes fatores, a resina, conforme descreve o seu fabricante é um material termofixo líquido de baixa e alta viscosidade. Por se tratar de um bicomponente, sendo um pré polímero e um polioli, livre de materiais pesados em sua composição é uma excelente alternativa para o desenvolvimento de compósitos (TROVATI et al., 2019; GODOY, 2007).

A literatura descreve que o uso de resina em geral ainda é pouco utilizado como reforço para compósitos, mesmo sendo um produto natural e renovável, uma vez que na atualidade, mais de 70% dos painéis fabricados em todo o mundo utilizam algum tipo de resina, entretanto, ainda é grande o uso de resinas sintéticas (ZENID, 2007). Em contrapartida, há diversos trabalhos com resultados promissores em relação ao uso de resina poliuretano como aglomerante, resistência, flexibilidade.

Nogueira, Lahr e Giacon (2018) investigaram o uso de resíduos do ouriço da castanha-do-Brasil a partir das partículas aglomeradas como carga e associado à resina poliuretana derivada do óleo da mamona como matriz em diferentes teores (20%, 25% e 30%), em relação à massa seca das partículas. Para esse estudo, foram testadas a partir de ensaio de dureza, teor de cinzas, umidade e inchamento. Com relação aos teores de resina, é possível desenvolver com os teores listados, porém, o que obteve melhor desempenho mecânico e físico foram os de teores com 30% de resina, apresentando boas propriedades de variação dimensional e resistência mecânica, comprovando assim seu potencial de utilização nos setores de construção civil e moveleiro.

A resina poliuretana a base de óleo de mamona possui destaque principalmente em seu desempenho ambiental. A aplicação, bem como a proporção entre seus componentes, justifica-se pelos excelentes resultados obtidos em estudos anteriores com painéis derivados de madeira, além do melhor desempenho ambiental em relação a outras resinas para a confecção desses materiais (SILVA et al., 2013; LIANG; LV; YANG, 2016; ZHONG et al., 2017; SOUZA et al., 2018).

Ferro et al. (2019) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de painéis híbridos de madeira de pinus com o adesivo poliuretano de resina de mamona, visando uma alternativa

de uso em novo sistema fabril com reaproveitamento de partículas de madeira. Concluíram que os painéis desenvolvidos alcançaram os valores mínimos recomendados pelas normas e apresentaram propriedades para aplicação em ambientes úmidos e estrutural.

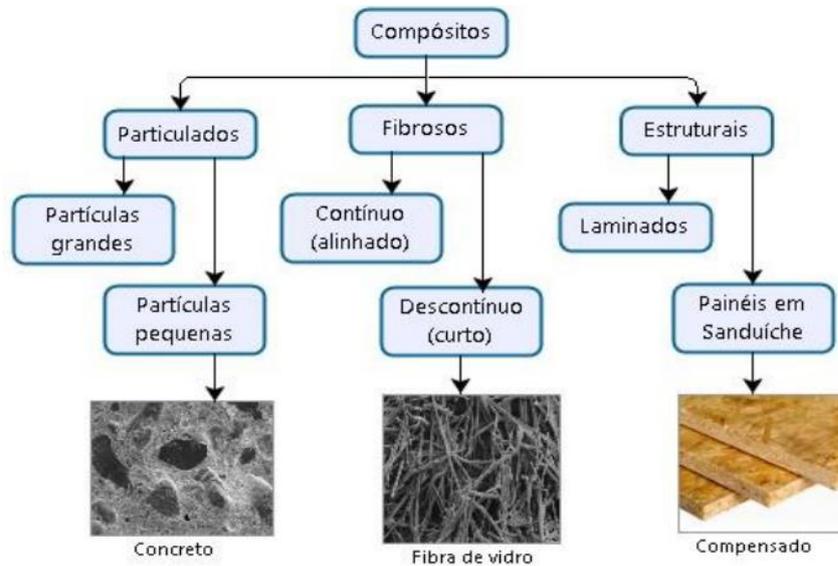
Sendo avaliada em diversos aspectos, a resina de poliuretano vem demonstrando resultados positivos em relação aos testes propostos. Shirotsaki et al. (2019) conseguiram desempenhos positivos ao usar o aglomerante e partículas de madeiras, sendo significativo nas propriedades físicas e mecânicas que foram investigadas, descrito pelos autores como “notável a superioridade dos painéis aqui desenvolvidos”, sendo ainda relatado o uso para cargas severas e ambientes com umidade.

O uso dessa resina tem como foco principal a diminuição de impacto ambiental, sendo a sua utilização em produtos mais sustentáveis, conforme afirmam vários autores (SBIHI et al., 2018; CANGEMI; SANTOS; CLARO NETO, 2010), o uso de adesivos de poliuretano à base de mamona constituem uma inovação tecnológica com potencial de resolução de vários problemas atuais, como modelos de desenvolvimento sustentável, transmutação da matriz de energia, redução do consumo de energia, podendo até mesmo redefinir os rumos da economia do país.

4.4 Compósitos – Panorama geral

Os materiais compósitos têm se tornado amplamente populares na comunidade de pesquisa industrial, onde os cientistas buscam combinar diversos elementos constituintes para criar compósitos. Uma série de testes tem sido conduzidos para investigar suas propriedades e transições de fase. Nas últimas décadas, os compósitos à base de fibras naturais surgiram como um material essencial para diferentes aplicações industriais, tendo ainda, diferentes classificações (Figura 8), como materiais estruturais ou não estruturais (SINGH; KUMAR; NAIK, 2020).

No Brasil, inicialmente as indústrias que fabricavam produtos derivados da madeira utilizavam principalmente madeiras de espécies nativas. No entanto, ao longo do tempo, devido ao aumento do consumo, à diminuição das reservas naturais e às pressões ambientais, essas indústrias tiveram que adaptar alternativas para a fabricação das chapas de aglomerados. A bioeconomia visa a reunião de setores econômicos que utilizam recursos biológicos renováveis no desenvolvimento de produtos de alta sustentabilidade produtiva (TORRES et al, 2022; QUEIROZ et al, 2022), diminuindo assim o desflorestamento incorreto.

Figura 8: Classificação de compósitos

Fonte: Adaptado de Calister, (2007)

Em 2018 a Comissão Europeia apresentou uma estratégia revisada sobre a bioeconomia, caracterizando-a como sustentável e circular, bem como a adoção de métodos e técnicas biológicas na produção e em diversos setores econômicos e industriais (COMISSÃO EUROPEIA, 2019; BUENO, 2022).

A economia circular baseia-se na redução de desperdício dos resíduos ao mínimo, gerando uma gestão mais eficiente dos recursos naturais e mantendo produtos e materiais a um elevado nível de utilidade ao longo do tempo, agregando valor e diminuindo a poluição, regenerando sistemas naturais e conservando ecossistemas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; FARIAS; PIRES, 2021). Visando um menor desperdício e gasto de recursos naturais, reutilizar os resíduos vegetais para uso em compósitos é de grandes benefícios ambientais, sendo que os produtos fabricados com esses materiais também são ecologicamente corretos.

Os materiais compósitos desenvolvidos a partir de biomassa lignocelulósica contemplam pontos de convergência com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) contidos na agenda 2030, proposta pela Organização das Nações Unidas (ONU), conforme elencada na ODS 12: “Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”, que propõe reduzir de forma significativa a geração de resíduos através da implementação de medidas preventivas e práticas de reciclagem e reutilização, buscando reduzir os potenciais poluidores e contribuir para a sustentabilidade ambiental.

Nos últimos dez anos o mercado de materiais compósitos tem experimentado um crescimento constante, abrangendo atualmente uma ampla gama de aplicações nos setores aeroespacial, biomédico, automotivo e na infraestrutura civil. Os painéis são produzidos principalmente de madeiras, laminadas ou em estágios de desagregação, unidas por resinas e submetidas a pressão e temperatura, conforme descrito por Freire et al. (2015).

Os Painéis de Madeira Reconstituída ou estruturais, conhecidos como PMR, conforme definido pelo BNDES (2014), são encontrados no mercado sem acabamento, com pintura ou revestimento, proporcionando uma camada protetora adicional ao painel e são produzidos através de um processo químico de transformação da madeira em fibras ou partículas. Podem ser classificados nas seguintes categorias:

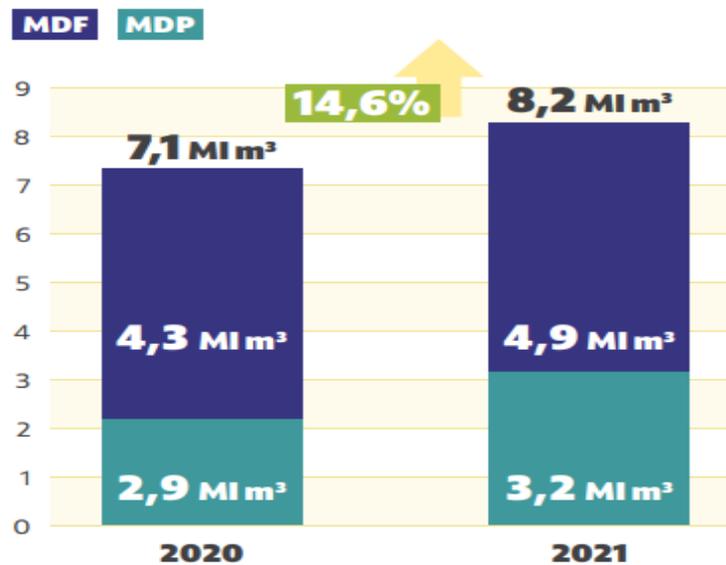
- Chapa de fibra: resulta de uma prensagem a quente de fibras, sem adição de resina, formando uma chapa de espessura fina, também conhecida como hb (hard board);
- *Insulation board*: fabricado a partir de fibras de madeira em um processo úmido, resultando em um produto com baixa densidade;
- MDP (*medium density particleboard*): também referido como painel de partículas de média densidade, produzido através de uma prensagem contínua, apresentando maior resistência em comparação ao aglomerado tradicional;
- MDF (*medium density fiberboard*): semelhante ao MDP em vários aspectos, porém, neste caso, as partículas são cozidas e desagregadas até formarem fibras durante o processo de fabricação;
- OSB (*oriented strand board*): composto por várias camadas de tiras ou lascas de madeira orientadas em uma determinada direção.

Em 2017, a produção de MDF atingiu seu pico, alcançando 5.227.829 metros cúbicos. Embora esse número tenha diminuído em 2018, os painéis de fibra continuaram a superar os de partículas em 17%, de acordo com a FAO (Food and Agriculture Organization) (2020).

A produção de compósitos de madeira registrou um aumento significativo de 14,6%, atingindo um volume de 8,2 milhões de metros cúbicos em 2021, de acordo com a Figura 9 e conforme relatado pela Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2022), após um impulso no crescimento das vendas domésticas de painéis de madeira em 2020, devido ao início da pandemia e à adoção generalizada do home office. O teletrabalho gradualmente se estabeleceu como uma prática permanente nas empresas, influenciando o consumo de produtos que contribuem para a criação de um ambiente de trabalho adequado em casa. As vendas de MDF e MDP totalizaram 4,9 e 3,2 milhões de metros cúbicos, respectivamente, representando

aumentos de 15,7% e 13,1%. Em uma perspectiva global, o Brasil está entre os 10 maiores produtores de painéis de madeira do mundo.

Figura 9: Produção de painéis



Fonte: Elaborado por FGV, Ibá e SECEX (2022)

O Brasil se destaca globalmente na produção de painéis de madeira reconstituída a partir de árvores que são cultivadas. Esse reconhecimento é resultado dos investimentos contínuos em tecnologia e automação nas empresas e nos processos produtivos, juntamente com a implementação das melhores práticas e utilização de novos materiais que visam melhorar a produção de painéis.

Com base no contexto apresentado neste tópico, é evidente que o MDF, serve como a principal base produtiva para a grande maioria das empresas do setor madeireiro industrial no país, servindo assim, como base de valores para importação e exportação de outros materiais. Além disso, a quantidade produzida desse tipo de painel demonstra um vasto potencial de crescimento, devido à sua vantagem no aproveitamento das biomassas lignocelulósicas e outros constituintes, o que resulta na redução dos custos relacionados à matéria-prima.

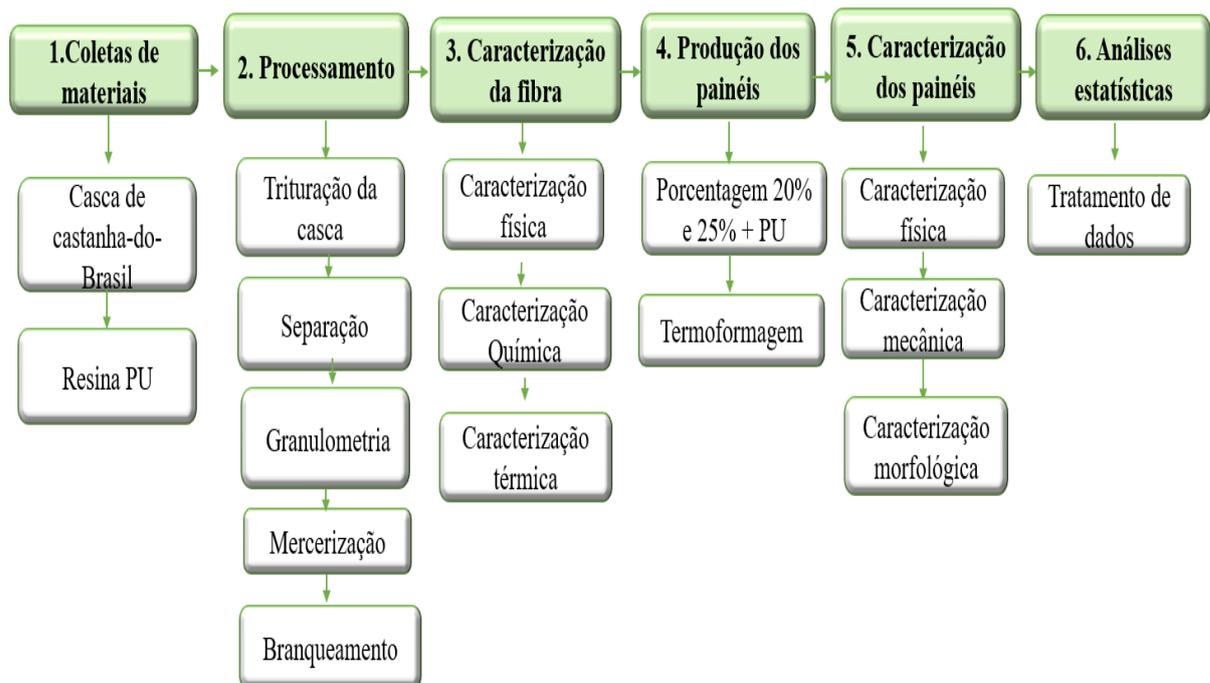
5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para esse estudo, foram utilizadas as dependências do Laboratório de Núcleo de estudos em composição e toxicologia de alimentos (NECTA) da Universidade Federal do Amazonas – Campus Manaus (UFAM/FCF), do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC) da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM/FT), do Laboratório de Microscopia da Universidade Estadual do Amazonas - Campus Manaus (UEA).

5.1 Etapas do processo

O fluxograma abaixo (Figura 10) representa a metodologia adotada no desenvolvimento deste trabalho para fabricação dos materiais compósitos (painéis) biodegradáveis.

Figura 10 – fluxograma da metodologia do trabalho



Fonte: própria (2024).

5.2 Obtenção dos materiais

As cascas de castanha-do-Brasil que foram utilizadas como carga para os compósitos, foram obtidas por doação com uma usina de beneficiamento de castanha-do-Brasil, de Manaus-AM. As amostras estavam embaladas conforme a Figura 11, com proteção da luz e lacrada a vácuo. Em seguida as cascas foram higienizadas manualmente em água corrente conforme sugere Petrechen et al. (2016) para separação de eventuais resíduos de amêndoas e outras

partículas residuais. Essa fase teve como importância a separação dos materiais com possível degradação visível e conseqüente o processo de trituração.

Figura 11 - a) Embalagem a vácuo com amostras de cascas. b) Cascas de castanha



Fonte: própria (2024).

5.3 Resina poliuretana derivado de óleo de mamona (PU-mamona)

A matriz empregada para a construção dos compósitos (aglomerar as partículas) foi a resina PU- poliuretana derivado de óleo de mamona é comercializada pela empresa IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda, com sede em Aguaí-SP com o código AGT 1315.

A resina veio acompanhada por dois componentes (figura 12), sendo o pré-polímero (componente A) e um polioliol (componente B). Conforme a empresa esses componentes juntos resultam em polímeros com diferentes aspectos, trazendo mais estabilidade físico-química, elasticidade e principalmente impermeabilidade. 100% sólido (isento de solventes) não liberando vapores tóxicos, uma vez que a missão da empresa é trabalhar com produtos ecologicamente corretos e com isso diminuindo os impactos ambientais causados por produtos sintéticos.

A empresa descreve as propriedades ao utilizar a resina PU: resistência a água e outras substâncias, já as características ela relata que os compósitos adquirem durabilidade, e uma excelente aderência do produto as partículas.

Figura 12 – Componentes (A + B) da resina PU-Mamona



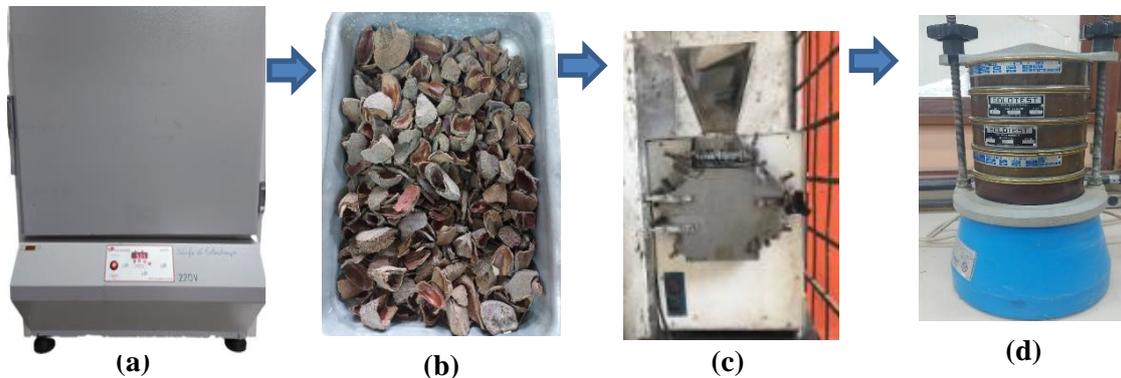
Fonte: própria (2024).

No presente trabalho foi utilizada a proporção de 1:1,5 dos dois componentes valor mínimo a ser usado conforme descrito pela empresa. A IMPERVEG® descreve na ficha técnica que após misturar os componentes, há um período de até 15 minutos para que comece a manusear o material, pois ao concluir esse tempo, a resina começa a enrijecer. A empresa explica também que após a cura, a cor aparenta a de âmbar com o tempo de 24 horas após o manuseio das amostras, além da resistência ao calor de até 210°C.

5.4 Processamento do material

Após a limpeza e separação manual, as cascas foram para estufa de secagem da marca LUCADEMA, modelo LUCA-82/100 a 55 °C durante 72 horas, para retirada de toda umidade e assim passar pelo processo de trituração. Posteriormente as cascas foram trituradas com auxílio de um moinho de facas modelo TECNAL. Em seguida peneirado utilizando peneiras tamis de mesh 10, 16, 30 e mesh 40 em um agitador de peneiras elétrico por 15 min, a fim de obtenção de faixa granulométrica ideal, de acordo com Nogueira (2016) após as amostras foram embaladas para caracterização e preparação dos compósitos, conforme demonstra a figura 13.

Figura 13 - Etapa da trituração: a) estufa com as amostras; b) cascas secas c) moagem d) separação



Fonte: própria (2024).

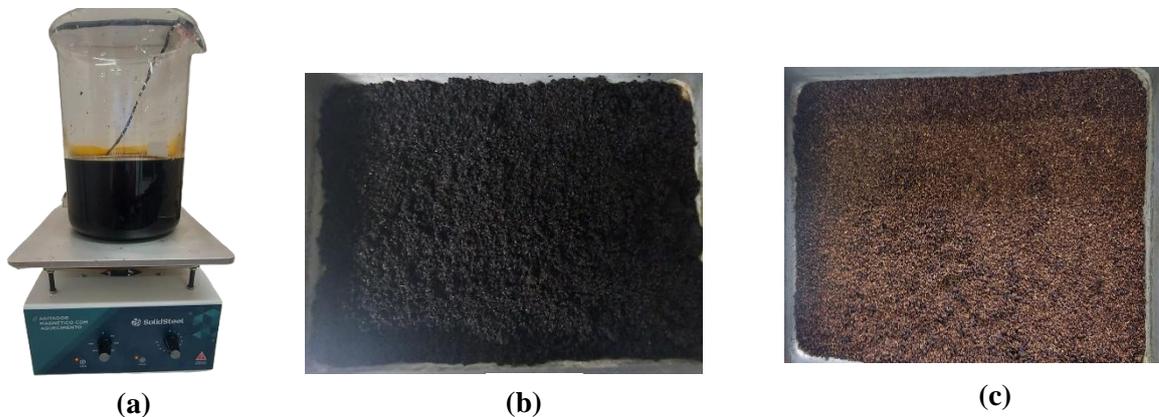
5.5 Mercerização e branqueamento método utilizado para a obtenção da celulose

Para deslignificação e a obtenção de celulose a partir da casca de castanha-do-Brasil foram utilizadas as metodologias e etapas descritas a seguir:

5.5.1 Processo de mercerização primeiro tratamento químico

A mercerização das fibras da casca de castanha-do-Brasil (Figura 14) utilizando hidróxido de sódio (NaOH) foi realizado conforme método adotado e adaptado de Giacon (2021), objetivando remover parcialmente a lignina, hemicelulose e outros resíduos, esse processo têm como finalidade melhorar as fibras para diferentes usos. Foram adicionadas a solução de NaOH a 5% na proporção de 200 g de fibras para 500 ml de solução por 4h em agitação constante e sem aquecimento. O excesso de NaOH foi removido com água (reuso) até que o pH das lavagens atingisse a neutralidade. Posteriormente, as fibras foram secas em estufa convencional a 55 °C por 24 horas para retirada de umidade.

Figura 14 – Processo de mercerização: (a) fibra na solução 5% NaOH, (b) fibra mercerizada para secagem, (c) fibra mercerizada seca.



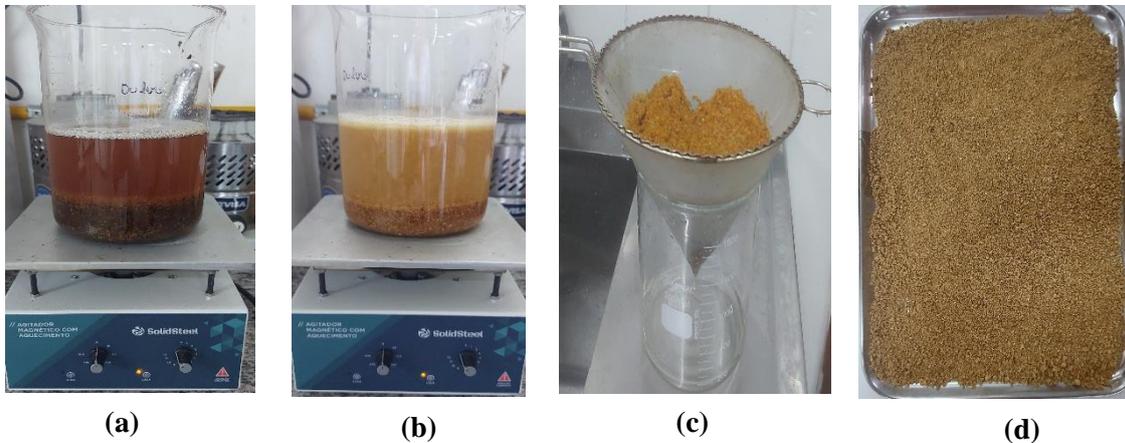
Fonte: própria (2024).

5.5.2 Branqueamento com peróxido de hidrogênio e NaOH segundo tratamento químico

Os parâmetros de branqueamento para as fibras mercerizadas, foram fixados conforme pré-testes anteriormente realizados e a composição de reagentes escolhida foi determinada conforme Ueda (2018) com modificações. O processo de branqueamento foi realizado a partir de 4 etapas principais, sendo que a primeira foi a de verificar a porcentagem das soluções de NaOH e H_2O_2 que inicialmente, seria de 100 ml de hidróxido de sódio NaOH 5% e 50 ml de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para cada 10 gramas de fibra mercerizada, no entanto as fibras passaram por um pré-teste com intuito de verificar a reação da solução.

As fibras ao serem submetidas ao teste inicial da solução acima, obteve uma reação, sendo assim, verificou-se várias porcentagens do NaOH e H_2O_2 perante a fibra mercerizada. Inicialmente foi adicionado em um bécher com capacidade de 2000ml (Figura 15), onde foram colocados 500 ml de NaOH 5% e 250 ml de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 10% para cada 200 gramas de fibras mercerizadas por 1h. O procedimento consistiu inicialmente em separar uma quantidade de fibra mercerizada suficiente para a produção dos compósitos, levando em consideração a perda de peso após o tratamento.

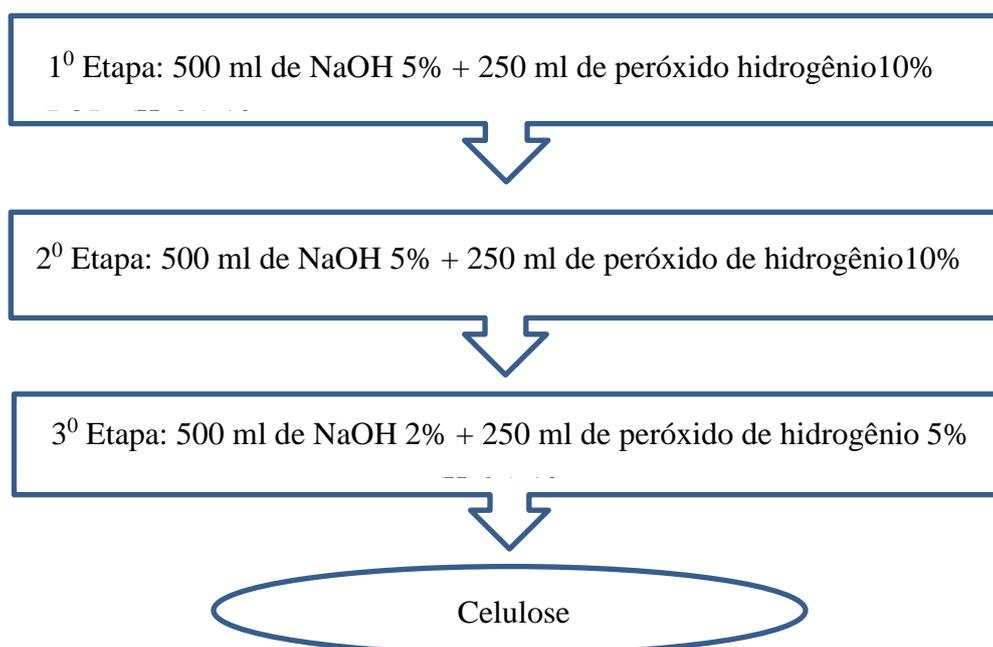
Figura 15 – Algumas etapas do processo de branqueamento: (a) fibra na solução por 1h, (b) fibra já branqueada, (c) fibra na peneira de inox após lavagem, (d) após secagem.



Fonte: própria (2024).

Após a primeira hora, as misturas foram lavadas em água corrente (reuso) até pH neutro. O processo se repetiu por mais duas fases, no entanto a última etapa a solução do NaOH e H_2O_2 , foram de 2% e 5% contabilizando assim, 3h de processos (Figura 15). Em seguida as fibras foram lavadas com água em abundância e secas em estufa da marca LUCADAMA, modelo LUCA-82/100 a 55 °C a 55°C durante 24 horas.

Figura 16 – Etapas do procedimento adotado para o tratamento de branqueamento na fibra da casca de castanha-do-Brasil.



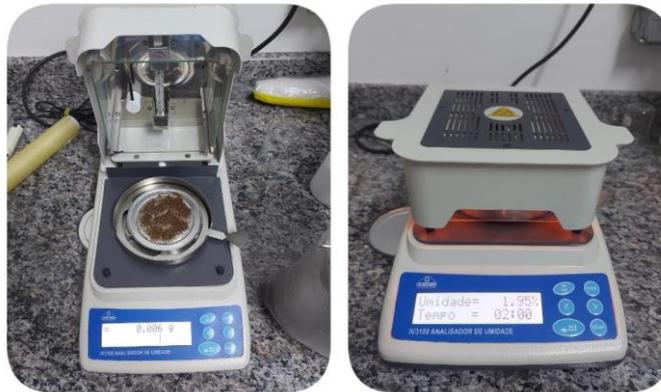
Fonte: própria (2024).

5.6 Caracterização química e física da casca de castanha-do-Brasil

5.6.1 Teor de umidade

A análise de umidade foi determinada conforme a normatização AOAC (2016) utilizando o analisador (Figura 17) de umidade halógeno IV3100 (Gehaka) e consistiu na pesagem de 2,5 g de amostra triturada da casca de castanha-do-Brasil e em seguida o aquecimento por Infravermelho. A análise foi realizada em triplicata, posteriormente foram realizados cálculos da média e desvio padrão.

Figura 17 - Teor de umidade: Analisador de umidade com amostras de casca.



Fonte: própria (2024).

5.6.2 Atividade de água (aw)

A análise foi verificada utilizando o equipamento *Water Activity Meter Dew Point 4TE* (AquaLab® Decagon - USA), pela determinação do ponto de orvalho da amostra triturada de cascas de castanha-do-Brasil em temperatura ambiente (25°C). Todas as análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram expressos em média e desvio padrão.

5.6.3 Teor de extrativos

Para determinar o teor de extrativos da fibra *in natura*, mercerizada e branqueada da casca de castanha-do-Brasil foi elaborada no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC) da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM/FT) a análise de solubilidade em Etanol e Tolueno (1:2), conforme a norma ASTM 110756. As fibras moídas foram colocadas por 24 horas na estufa a 65 °C para exclusão da umidade até a sua massa constante. Foram identificados os filtros, sendo estes pesados na balança analítica e anotados em seguida reservados. Depois foram adicionados 5 g de fibra em cada recipiente. Em seguida, foram identificados e pesados três balões de fundo chato, onde foi

colocada nestes uma mistura de 150ml de solução de Etanol e Tolueno e acoplado no aparelho Soxhlet, sendo ajustado para ocorrer 25 ciclos dentro desse intervalo (Figura 18).

Com fim desse tempo, o solvente foi recuperado e reservado e os cartuchos foram retirados e colocados em uma estufa por 24h a 80°C, até a sua massa constante. Após, o conjunto foi pesado, obtendo a massa final para determinação dos teores de extrativos presentes na fibra. Esse processo foi realizado em triplicata a fim de se obter o menor desvio padrão, além de uma maior quantidade de celulose.

Figura 18 - Aparelhagem de Soxhlet com a amostra no processo inicial da



Fonte: própria (2024).

Os valores do teor de extrativos foram determinados pela equação 1 a seguir:

$$\%TE = \frac{(MRE - MRRS)}{Ma} \times 100\% \quad (1)$$

onde:

TE%= teor de extrativos

MRE= massa do recipiente com os extrativos;

MRRS= massa do conjunto recipiente com o resíduo do solvente;

Ma= massa da amostra;

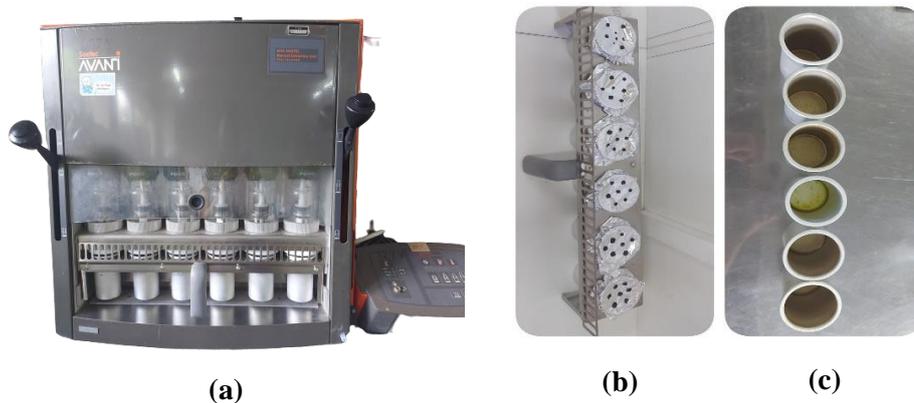
5.6.4 Teor de lipídios

Para a determinação do teor de lipídios na casca (figura 19), seguiu-se a metodologia da norma AOAC, 2016, em que foram pesados 3 g de casca de castanha-do-Brasil trituradas. O processo de extração em aparelho de Soxhlet Manual Extraction Unit - Modelo: 2055 - SOXTEC – FOSS TECATOR utilizando Hexano ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$) (Phlab) como solvente,

este foi adicionado nos copos de alumínio do aparelho de Soxhlet, previamente dessecados e verificados suas massas.

Após o processo, os solventes foram evaporados em uma capela e em seguida foram feitas as pesagens dos copos de alumínio e do lipídio. Posteriormente foram realizados cálculos da média e desvio padrão, todo o processo foi feito em triplicata.

Figura 19 – Teor de lipídios: (a) processo de extração em aparelho de Soxhlet, (b) copos com solventes sendo evaporados em capela, (c) amostras de lipídios secos.



Fonte: própria (2024).

Para obtenção do teor de lipídios presente na casca de castanha utilizou-se a equação 2:

$$\%Li = \frac{N \times 100}{P} \quad (2)$$

Onde:

N = Peso de lipídios (g) [(Peso dos copos + resíduo) – (Peso dos copos vazios)]

P = Peso da Amostra (g)

5.6.5 Teor de proteínas ou fração nitrogenada

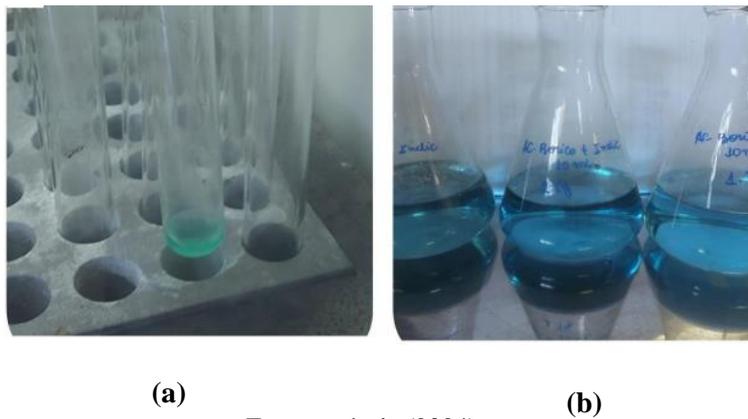
Para a determinação do teor de proteína (Figura 20) seguiu conforme determinado pela AOAC (2016). Foi pesado aproximadamente 0,2 g da amostra de casca de castanha-do-Brasil triturada, posto em papel de seda e em seguida transferida para o micro tubo de Kjeldahl. Foram adicionados 5 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) (Nuclear) e 2 g da mistura catalítica (mistura de Sulfato de Potássio e Sulfato de Cobre) utilizada no processo.

Em seguida, os tubos contendo as amostras sofreram aquecimento em bloco digestor na capela até o aparecimento de uma solução azul-esverdeada e livre de material não digerido. Ao fim do aquecimento, os tubos foram resfriados e após a diluição com água destilada os tubos contendo as amostras foram levados ao destilador de nitrogênio TE 036 – TECNAL.

O conteúdo dos tubos foi então neutralizado com solução de hidróxido de sódio a 50% (NaOH) (Phlab). Após esta etapa, o destilado foi recolhido em Erlenmeyer com ácido bórico a 2% (H₃BO₃) (Synth) com indicador misto (solução de vermelho de metila e verde bromocresol) e por fim foi realizada a titulação usando ácido clorídrico (HCl) (Nuclear) (0,02N) até a sua respectiva viragem de coloração.

Posteriormente foram realizados cálculos da média e desvio padrão, todo o processo foi feito em triplicata.

Figura 20 – Teor de proteínas: (a) processo de digestão final, (b) destilado recolhido para



Fonte: própria (2024).

Para obtenção do teor de proteínas presente nas cascas de castanha utilizou-se a equação 3:

$$\%N = \frac{(V_a - V_b) \times N \times f \times 0,014 \times 100}{PA} \quad (3)$$

Onde:

% P = % N x Fator de conversão de Nitrogênio para Proteína;

V_a = Volume de HCl gasto na titulação com a amostra (ml);

V_b = Volume de HCl gasto na titulação com o branco (ml);

N = Normalidade de HCl;

f = Fator de correção da solução de HCl;

PA = Peso da Amostra (g);

% P = % de Proteína;

% N = % de Nitrogênio Fator de conversão de Nitrogênio para Proteína (castanha) = 5,46;

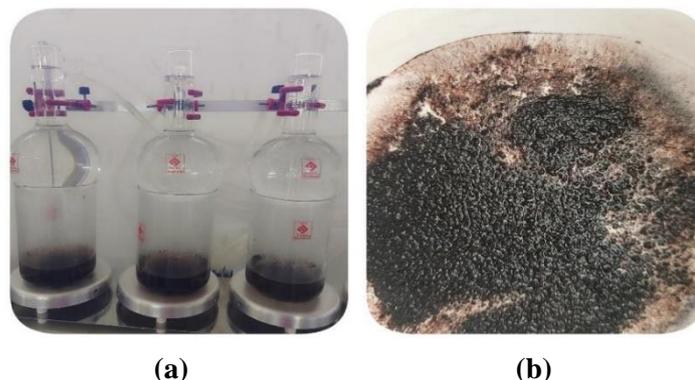
5.6.6 Teor de lignina

A análise consistiu na separação da lignina e na determinação de seu teor, para a amostra. Os resíduos resultantes, ao final desta parte do método, são compostos apenas de lignina. Foi feita segundo a norma TAPPI T 222 (TAPPI, 2006) com modificações e utilizou-se a hidrólise ácida para extração. Em um Becker de 500 ml adicionou-se aproximadamente 1g de casca de castanha-do-Brasil triturada, seguido de adição de 8,5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 72% (m/m) a solução estava em temperatura ambiente.

A amostra foi homogeneizada por 10 minutos, a qual foi deixada em digestão por 24 horas. Após esse processo a mistura recebeu 153 ml de água destilada e em seguida acoplada ao digestor de fibras de Modelo: 0326-26B - QUIMIS, permanecendo assim a solução em ebulição por 4 horas. O material resultante foi então filtrado em um funil de Buchener do tipo 4 (abertura nos poros de 10 a 16 μ) previamente pesado e lavado com água destilada até pH próximo da água.

Em seguida, o conjunto funil-amostra foram seco em estufa a 105 °C até obter peso constante, determinando-se o teor de lignina. Todo o processo foi feito em triplicata.

Figura 21 – Preparação de lignina: (a) hidrólise ácida para separação de lignina, (b) lignina após



Fonte: própria (2024).

Para obtenção do teor de lignina presente nas cascas de castanha triturada utilizou-se a equação 4:

$$\text{LIG\%} = (\text{P2/P1}) \times 100 \quad (4)$$

onde:

Lig = Teor de lignina em porcentagem;

P1 = Peso seco inicial da amostra;

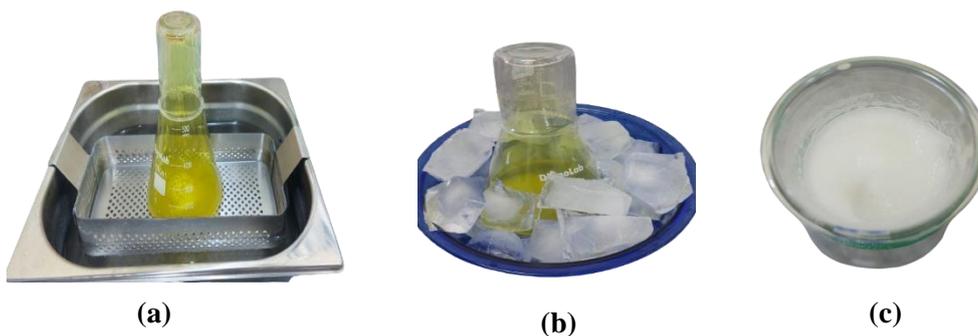
P2 = Peso seco de lignina obtida;

5.6.7 Determinação de teor de Holocelulose

O teor de holocelulose foi determinado em concordância com a norma TAPPI (1999), com algumas modificações. Inicialmente foram colocados 3g de fibra da casca de castanha-do-Brasil sem umidade e livre de extrativos em um Erlenmeyer de 500 ml, e colocado 120 ml de água destilada, 1ml de ácido acético glacial e 2,5 g de clorito de sódio. A solução foi colocada em banho-maria em agitação constante com temperatura de 70 °C dentro de uma capela de exaustão por 5 horas no total. Após a primeira e a segunda hora, foram adicionados mais 1 ml de ácido acético glacial e 2,5 g de clorito de sódio.

Após as 5h total, foi providenciado um banho de gelo onde o recipiente permaneceu por 30 minutos e em seguida filtrada em cadinho de filtro sinterizado tipo 2 (40 a 100 μ) com água destilada até obter pH da água. Em seguida, o funil foi levado para estufa a 105 °C por 24 horas para realizar a secagem até o peso constante, conforme mostra as etapas da extração na Figura 22.

Figura 22 – Extração de holocelulose: (a) solução em banho-maria, (b) banho de gelo, (c) início da filtragem.



Fonte: própria (2024).

A análise foi realizada em triplicata e calculada de acordo com equação 5:

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

Onde:

TH%= teor de holocelulose

MFH= massa do funil somada a massa da holocelulose;

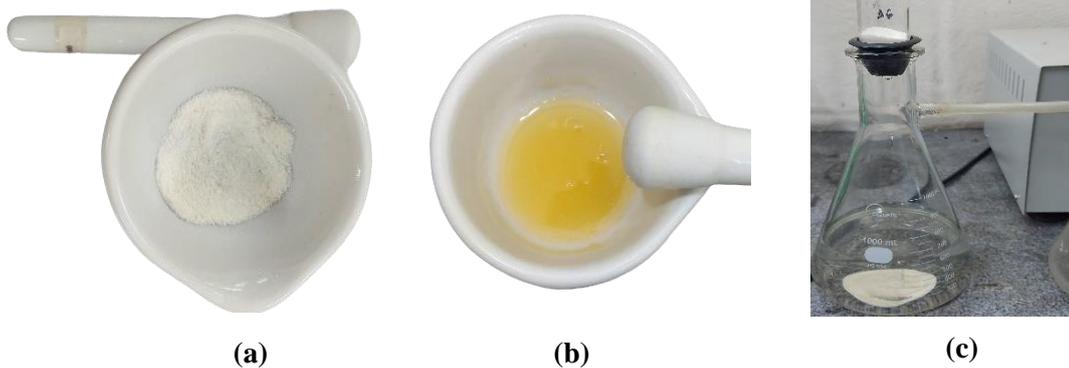
MF= massa do funil com massa constante;

MA= massa da amostra;

5.6.8 Determinação do teor de alfa celulose

O teor de alfacelulose foi determinado de acordo com as normas TAPPI (1999). Em um almofariz (Figura 23) esterilizado adicionou-se, 1 g de holocelulose seca e triturada e adicionado 15 ml de NaOH 17,5 % (m/v). Em seguida, aguardou-se por 2 minutos a fim da solução entrar em contato com a holocelulose com mais eficiência. Adiante, iniciou-se a maceração por 8 minutos. Após adicionou-se 40 ml de água destilada e colocando gradualmente a solução para o cadinho sinterizado tipo 2 (40 a 100 μ) e em seguida filtrado e lavado até o PH da água destilada. Utilizou-se papel indicador de PH. Após a filtração com auxílio de uma bomba a vácuo, a amostra foi colocada na estufa a 105 °C durante 24 horas e pesada até a sua massa constante.

Figura 23 – Etapas da extração da alfa: (a) holocelulose após trituração, (b) holocelulose em meio ácido, (c) finalização da filtragem da alfacelulose.



Fonte: própria (2024).

O ensaio foi realizado em triplicata e determina-se teor de celulose de acordo com equação 6:

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

Onde:

TA%= teor de alfacelulose

MFA= massa do funil somada a massa da alfacelulose;

MF= massa do funil;

MAH= massa amostra de holocelulose;

5.6.9 Teor de fibra bruta (FB)

A análise de determinação de fibra bruta (FB) (Figura 24), foi determinado pelos métodos conforme AOAC (2016). Em um Becker de 500 ml adicionou-se aproximadamente 1g de casca de castanha-do-Brasil triturada, seguido de adição de 100 ml de ácido sulfúrico 1,25% (m/m) (H₂SO₄) (Nuclear) em temperatura ambiente, em seguida foi acoplada o Becker ao digestor de fibras Modelo: 0326-26B - QUIMIS, mantendo assim o refluxo por 30 minutos.

Após esse tempo foi desligado, esperou-se resfriar por 15 minutos e foi adicionado 100 ml de solução de hidróxido de sódio (NaOH) (Nuclear) 1,25% (m/m), sendo acoplado novamente ao condensador por mais 30 minutos. Depois desse processo a solução foi filtrada com auxílio de um funil do tipo 4 (abertura nos poros de 10 a 16 μ) acoplado a um kitassato e um papel filtro previamente pesado, lavando o resíduo com água destilada até o Ph neutro.

Em seguida, o papel filtro com a amostra foi colocado em um cadinho previamente pesado e colocado em estufa a 105 °C por 3 horas, após esse tempo foi levado ao dessecador para o resfriamento e retirado o seu peso, em seguida o cadinho com a amostra foi incinerado na mufla por 1 hora após atingir a temperatura de 550 °C.

Todo o processo foi feito em triplicata. Posteriormente foram realizados cálculos da média e desvio padrão. Para obtenção do teor de FB presente na casca de castanha, utilizou-se a equação 7:

$$\begin{aligned} \mathbf{FB (g) = P1 - P2} & \qquad \qquad \qquad \mathbf{(7)} \\ \mathbf{\%FB = (P1 - P2) / Pa \times 100} & \end{aligned}$$

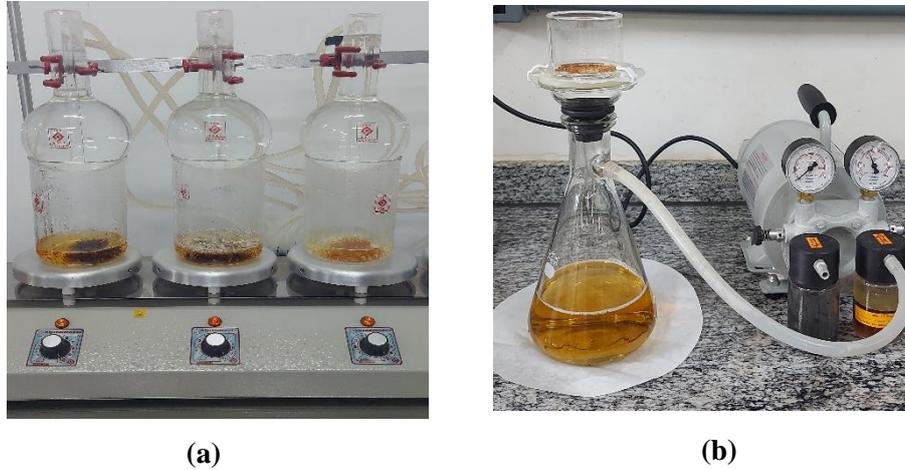
Onde:

P1 = peso do cadinho com resíduo após estufa, já com o desconto do valor do papel filtro.

P2 = peso do cadinho após queima em mufla, já com o desconto do valor do papel filtro.

Pa = peso da amostra

Figura 24– Preparação de FB. (a) Solução para separação de FB. (b) Processo de filtração para obter a FB



Fonte: própria (2024).

5.6.10 Teor de cinzas

Para obtenção do teor de cinzas das cascas de castanha-do-Brasil, (figura 25) seguiu-se a norma determinado pela AOAC (2016), onde os cadinhos foram calcinados a uma temperatura de 550 °C durante 30 minutos em forno mufla. Em seguida, foram colocados em um dessecador com sílica gel para o resfriamento até a temperatura ambiente para registrar sua massa.

Após isso, adicionou-se 3,0 g de casca triturada, retornando os cadinhos com as amostras ao forno mufla com uma programação de 2 horas a 550 °C. As amostras calcinadas foram então resfriadas em dessecador até temperatura ambiente para seguir com a pesagem até o seu peso constante. Após a queima em mufla, nos cadinhos, sobraram apenas as cinzas, rica em minerais inorgânicos. As análises foram feitas em triplicata. Para a realização do cálculo do teor de cinzas usou-se a equação 8:

$$\%TZ = \frac{P_{ez} \times 100}{P_i} \quad (8)$$

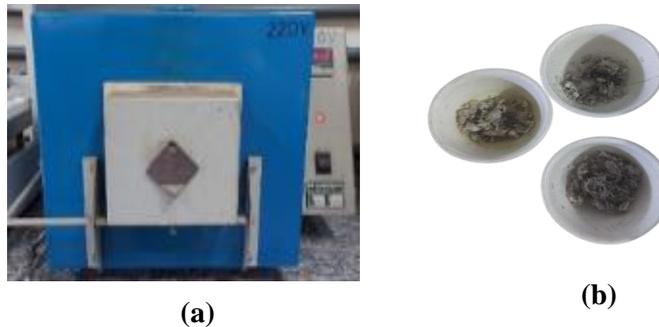
onde:

P_{ez}= massa referente à cinza obtida;

P_i= massa da amostra;

TZ= teor de cinzas;

Figura 25– (a) Mufla com capacidade maior que 550°C. (b) cadinhos de cerâmicas com cinzas após mufla



Fonte: própria (2024).

5.6.11 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva, foi utilizada para determinar a composição elementar dos materiais presentes na amostra *in natura*, mercerizada e branqueada. As análises foram realizadas em um espectrômetro da marca Panalytical modelo Epsilon 3-XL, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA e gás hélio (pressão 10 atm./10 kgf/cm²) no Laboratório de Materiais Amazônicos e Compósitos – LaMAC da Faculdade de Tecnologia da UFAM.

5.6.12 Caracterização térmica por Termogravimetria TGA /DTG

Para a realização da análise termogravimétrica das fibras do resíduo da casca de castanha-do-Brasil e a sua variação de massa em função da temperatura, foram analisadas pela termogravimetria (TGA) e sua derivada (DTG) no equipamento Shimadzu, modelo SDG 60, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, iniciando pela temperatura ambiente até 800 °C e o principal objetivo foi verificar a degradação térmica nas fibras *in natura* e avaliar o efeito do tratamento químico pela fibra mercerizada e branqueada. A análise foi realizada no Laboratório de Ensaio Físico-químicos (LEM), na Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Para o tratamento dos dados utilizou-se o programa OriñgiLab.

Figura 26 – Equipamento de análise térmica (TGA)



Fonte: própria (2024).

5.7 Produção de painéis de casca de castanha-do-Brasil

Foram produzidos três tipos de compósitos, utilizando fibras de casca de castanha-do-Brasil *in natura* e tratadas, conforme metodologia adotada por Chatterjee, Kumar e Singh (2020). A produção dos compósitos ocorreu no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) na Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

Primeiramente, foram determinados a massa de fibra para confecção dos compósitos aplicando assim a equação 9:

$$D = \frac{m}{v} \quad (9)$$

Onde:

D = densidade nominal de 0,8 g/cm³;

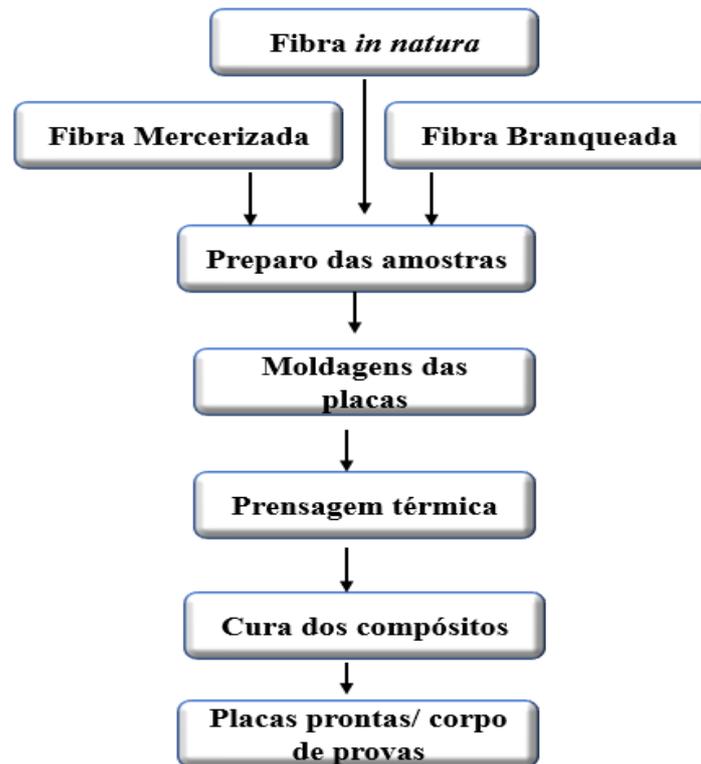
m = massa em grama das fibras para confecção dos compósitos;

v = volume considerando o molde (28 cm x 28 cm x 1 cm)

Portanto, para produção das placas de compósitos adotou-se os tamanhos de 28 cm x 28 cm x 1 cm para cada painel. Sendo que, a porcentagem da massa do resíduo a partir dos cálculos para cada compósitos foram aproximadamente 650 g, e a quantidade de resina por percentual utilizado para os 20% de resina foram de 43,9 g componente A e 65,8 g componente B,

enquanto para os 25% de resina foram utilizados 54,8 g e 82,3 g respectivamente para cada tipo de placa produzidas (*In natura*, mercerizada e branqueada) As porcentagens que foram adotadas visam a maior utilização e agregação de valor aos resíduos da casca de castanha-do-Brasil. O processo de produção dos compósitos seguiu conforme o esquema apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Etapas da produção dos compósitos



Fonte: própria (2024).

Primeira etapa: preparo das misturas

As fibras foram misturadas em uma bandeja de polietileno com $\pm 650,00$ g de fibra de casca na proporção de 1:1,5 de resina, sendo os componentes A + B, os aglomerantes foram aplicados para os teores de 20% e 25% em relação as amostras secas de fibras e para que ocorresse uma melhor aderência da resina à fibra, fez-se necessário colocar gradativamente enquanto era homogeneizado manualmente com auxílio de luvas por 15 min.

Segunda etapa: Moldagens das placas

As fibras foram distribuídas no molde de madeira, posicionada sobre o molde de ferro envolvidas por Teflon e pasta de carnaúba. Para controlar a dispersão das fibras durante

processo de prensagem, também se utilizou mais uma folha de teflon por cima sob o molde de ferro antes de levar para prensa hidráulica.

Terceira etapa: prensagem térmica

Os compósitos, já compactados uniformemente, a fim de não apresentar variações e vazios em sua extensão, foram levados à prensa hidráulica térmica de modelo HIDRAL-MAC. A temperatura utilizada foi de 100°C, pressão de 10 MPa, e duração de 10 min, logo após esse tempo os compósitos passaram por um período descrito pelos fabricantes de cura total do material. O processo seguiu conforme mostra o fluxograma apresentado na Figura 24.

Quarta etapa: corpos de provas

Na última etapa após a cura do material foram feitos os esquadrejamentos (corpos de provas) das amostras para os ensaios mecânicos, físicos e morfológicos que serão especificados separadamente.

Figura 28 – Fluxograma das etapas de processamento dos compósitos.



Fonte: própria (2024).

5.8 Propriedades físicas dos compósitos

Para a determinação das propriedades físicas foram utilizados corpos de provas com as seguintes dimensões: umidade (50 x 50 mm), inchamento por 24 horas (50 x 50 mm) e

densidade, sendo empregados dez corpos de provas por tratamento, retirados aleatoriamente dos compósitos (painéis), conforme as normas NBR 14810-2:2018.

5.8.1 Ensaio de Densidade

Para o ensaio de densidade, foram utilizados 10 corpos de provas devidamente identificados com dimensões 50 x 50 mm. Sendo verificado cada corpo de prova e registrado utilizando uma balança analítica. Após, as dimensões dos corpos de provas (largura e comprimento) e medidas as espessuras (ponto de intersecção das diagonais) foram medidos por um paquímetro digital. Os resultados foram calculados através das Equações 10:

Sendo:

$$D = \frac{m}{V} \quad (10)$$

$$V = b1 \times b2 \times e$$

Onde:

D = Densidade do corpo de prova (Kg/m³);

M = Massa do corpo de prova (g);

V = Volume do corpo de prova (mm³);

b1 = Largura do corpo de prova (mm);

b2 = Comprimento do corpo de prova (mm);

e = espessura do corpo de prova (mm).

5.8.2 Determinação da umidade

Os ensaios foram realizados segundo a norma NBR 14810-2:2018. Os corpos de provas foram pesados individualmente, em balança analítica com resolução de 0,01 g e anotados os dados da massa úmida. Em seguida as amostras foram inseridas em estufa a 105 °C por 6 horas e colocado em um dissecador para o resfriamento. Após o esfriamento foram pesados individualmente para retirar o peso da massa seca. Para verificar esses valores foi utilizado a equação 11:

$$U = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

U = umidade residual do compósito, em porcentagem (%);

MU = massa úmida, em gramas (g); e

MS = massa seca, em gramas (g).

5.8.3 Determinação por inchamento por 24h

As análises seguiram as especificações da norma NBR 14810-2:2018. Para definir o inchamento após 24h, inicialmente foi identificado e medido a espessura no ponto de intersecção das diagonais com dimensões de 50 x 50 mm e 10 corpos de provas. Após os corpos de provas foram colocados em uma Bandeja de poliestireno, preenchido com água destilada de modo que as amostras ficassem submersa.

Após 24 horas de imersão, os corpos de prova foram retirados do recipiente e removido o excesso de água com um papel toalha. Na sequência, foram realizadas novas medidas e pesagens nos corpos-de-prova nos corpos de prova e anotados os respectivos resultados. Para obtenção dos resultados do inchamento foi utilizado a equação 12:

$$I = \frac{E1 - E0}{E0} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

I: inchamento em espessura, em porcentagem (%);

E1: espessura após o período de imersão, em milímetros (mm);

E0: espessura antes da imersão, em milímetros (mm).

Figura 29 – Corpos de provas submersos



Fonte: própria (2024).

5.9 Determinação das propriedades mecânicas dos compósitos

Para a determinação das propriedades mecânicas serão utilizados corpos de prova com as seguintes dimensões: ensaio de resistência a flexão (50 x 200 mm), com o emprego de 10 corpos de provas.

5.9.1 Ensaio de Resistência à Flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados de acordo com a norma NBR14810-2:2018. Foram verificados 10 corpos de prova para cada tipo de compósito utilizando a máquina de testes universal de ensaio mecânico universal AME-5k (Figura 30). Sendo realizado a medida de espessura nas seções transversais no ponto de intersecção das diagonais com sua largura, conforme demonstra a Figura 29. O objetivo foi avaliar a dureza e a elasticidade dos compósitos em relação a influência dos tratamentos químicos de mercerização e branqueamento nas fibras.

Figura 30 – Máquina universal com corpo de provas com controlador modelo



Fonte: própria (2024).

Para realizar o ensaio, foi preciso aplicar carga no centro do corpo de prova, enquanto seus extremos estavam posicionados entre dois apoios da máquina universal de ensaios.

Figura 31 – Corpos de provas após o teste de flexão



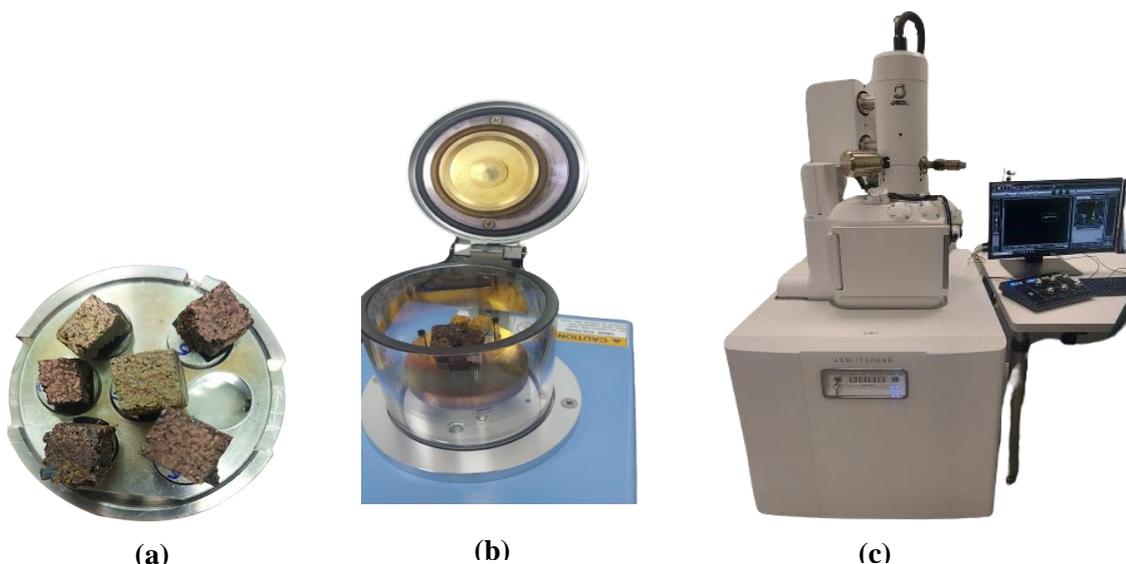
Fonte: própria (2024).

5.10 Propriedades morfológicas

5.10.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizados no Laboratório de Microscopia de Alta Resolução da Universidade Estadual da Amazonia (UEA) no CMABio (Centro Multiusuário para análise de Fenômenos Biomédicos, equipamento Jeol JSM IT500-HR, com tensão de aceleração de elétrons utilizada foi de 5kV. Foi utilizado também o metalizador da marca Jeol SMART COATER, para preparação das amostras por 2 minutos, onde ocorreu um revestimento por pulverização automática de uma fina camada de ouro. O MEV foi utilizado para avaliar a dispersão e morfologia das fibras em relação a resina PU-mamona após os corpos de prova passarem pelos ensaios de resistências. As imagens foram capturadas com ampliações de 50x 200x.

Figura 32 – MEV: (a) Amostra pulverizada, (b) metalizador com as amostras, (c) Microscópio de varredura



Fonte: própria (2024).

5.11 Análise Estatística

Os resultados foram analisados por meio de estatística descritiva, através de Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey a 5% de significância. Para análise dos dados foi utilizado o programa com o software Sisvar, versão 5.6, segundo as recomendações de FERREIRA (2014).

6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO PARA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste estudo, os testes foram conduzidos com o propósito de compreender as respostas obtidas de acordo com os objetivos específicos estabelecidos na seção 3.2. Os resultados das análises dos dados alcançados nesta seção foram divididos em três capítulos como artigos, dos quais um já foi enviado para publicação pela revista Engevista.

Capítulo 1

Referente ao primeiro artigo da dissertação, do tipo revisão sistemática, sendo o artigo, intitulado: “Potencial e caracterização de compósitos lignocelulósicos a partir de resíduos de castanha-do-Brasil como insumo de novos materiais: uma revisão sistemática”, onde concentra uma análise dos últimos seis anos (2017 – 2023), envolvendo estudos com as aplicações dadas aos resíduos lignocelulósicos de castanha-do-Brasil que são utilizadas como cargas em compósitos como meios sustentáveis e de alternativas para matrizes termoplásticas, incluindo ciência de materiais e sua importância ao meio ambiente.

Capítulo 2

Está relacionado ao segundo artigo intitulado: “Caracterização de Fibra *in natura*, mercerizada e branqueada da casca de castanha-do-Brasil visando seu potencial para o uso na construção civil”. O interesse em usar as fibras lignocelulósicas é grande e ainda há muito para se descobrir, desde a sua extração, inclusão para novos materiais parcial ou integral, verificar sua resistência entre outros, até a obtenção de novos produtos a partir delas. Assim, este trabalho objetivou-se caracterizar esse resíduo *in natura* e após o processo de mercerização e branqueamento na casca da castanha-do-Brasil verificando seu potencial uso na produção de materiais sustentáveis para aplicação na construção civil.

Capítulo 3

Referente ao terceiro artigo da dissertação intitulado: “Propriedades Físicas e Mecânicas de biocompósitos Polimérico Reforçado com Fibra de casca de castanha-do-Brasil e resina poliuretana. Diante do desafio de aumentar a aplicação das fibras naturais e dos polímeros biodegradáveis em relação a competitividade com as fibras sintéticas, o principal objetivo desta pesquisa foi analisar a fibra *in natura* e após o processo de mercerização e branqueamento na casca da castanha-do-Brasil, nas propriedades físicas, morfológicas e mecânicas de compósitos poliméricos.

CAPÍTULO I

Potencial e caracterização de compósitos lignocelulósicos a partir de resíduos de castanha-do-Brasil como insumo de novos materiais: uma revisão bibliográfica

Potential and characterization of lignocellulosic composites from Brazil nut residues as an input for new materials: a literature review

Resumo

Os resíduos lignocelulósicos de castanha-do-Brasil podem ser um grande referencial para produção de novos materiais, por ser uma matéria de baixo custo para seu reuso. Os materiais compósitos são uma forma de reutilização, que incluem elementos renováveis ou sustentáveis para fibras ou matrizes, estão atraindo interesse por suas perspectivas econômicas e ambientais e oferecem utilidade em inúmeras indústrias devido à sua formabilidade, leveza e características de design. A crescente preocupação com a sustentabilidade tem impulsionado a busca de novos compósitos e o potencial existe para estimular mais pesquisas para trazê-los aos mercados.

Com o intuito de conhecer os resíduos da castanha-do-Brasil, foi elaborada uma revisão sistemática que teve como objetivo buscar artigos que exemplificassem e descrevessem as aplicações dadas aos resíduos lignocelulósicos de castanha-do-Brasil que são utilizadas como cargas em compósitos como meios sustentáveis e de alternativas para matrizes termoplásticas, incluindo ciência de materiais e sua importância ao meio ambiente. Esta revisão mostra que os resíduos de castanha-do-Brasil são adequados para serem usados como um enchimento de reforço para novos compósitos, mostrando ter um bom desempenho perante os testes proporcionado como dureza, tração e principalmente biodegradabilidade, contribuindo assim para um meio ambiente mais sustentável e proteção dos recursos naturais. O tratamento das fibras pode gerar propriedades melhoradas do compósito com diferentes aplicações.

Palavras-chave: *Bertholletia excelsa*, cargas, sustentabilidade, meio ambiente, resíduos industriais.

Abstract

Brazil nut lignocellulosic residues can be a great reference to produce new materials, as it is a low-cost material for reuse. Composite materials and a form of reuse, which include renewable

or sustainable elements for fibers or matrices, are attracting interest for their economic and environmental perspectives and offer utility in numerous industries due to their formability, lightness, and design characteristics. The growing concern for sustainability has driven the search for new composites and the potential exists to stimulate further research to bring them to market. This research aims to analyze and discuss the contributions involving studies with the applications given to Brazil nut lignocellulosic residues that are used as fillers in composites as sustainable means and alternatives for thermoplastic matrices, including materials science and its importance to the environment. This review shows that Brazil nut residues are suitable to be used as a reinforcing filler for new composites, showing good performance in tests such as hardness, traction and mainly biodegradability, thus contributing to a more sustainable environment. sustainability and protection of natural resources. Additional fiber treatment can lead to improved composite properties for different applications.

Keywords: *Bertholletia excelsa*, fillers, sustainability, environment, industrial waste.

1. Introdução

A castanheira (*Bertholletia excelsa*), uma das espécies arbóreas de maior importância econômica, social e ecológica na região amazônica, apresenta madeira de excelente qualidade, porém com proibições quanto ao seu corte. Seu fruto é conhecido como ouriço, sendo rígido e define-se como resíduo de atividades extrativistas (KLUCZKOVSKI et al., 2021; NOGUEIRA et al., 2018). As reservas da castanheira-do-Brasil, têm sua importância histórica para a economia do extrativismo na Amazônia, que engloba os estados da região Norte.

É uma espécie nativa da Amazônia, sendo da família Lecythidaceae e que tem as sementes de uma fruta que leva cerca de 14 meses para amadurecer e com casca dura e lenhosa, podendo pesar até dois quilos e contém 8 a 24 sementes triangulares de até 2 cm de largura e 5 cm de comprimento (CARDOSO et al., 2017). Foi descrita em 1807 por Humboldt e Bonpland, como espécie no gênero *Bertholletia* (SANTOS et al., 2018).

A castanha-do-Brasil é um dos principais produtos não-madeireiros da Amazônia que tem uma grande comercialização no mercado internacional. Sendo o maior peso da castanha que se distribui em pericarpo e casca somando chega-se a 90% do peso que é descartado, gerando grandes quantidades de resíduos lignocelulósicos durante o cultivo e a produção. O desenvolvimento de métodos para produzir bens de consumo a partir de fontes naturais, incluindo recursos renováveis e ecologicamente corretos, tornou-se um objetivo importante

dos esforços de pesquisa e desenvolvimento, e a reutilização de materiais vegetais lignocelulósicos nativos, a maioria dos quais são biomassa terrestre sendo importante e muito rico neste campo (PETRECHEN, 2017).

Os resíduos lignocelulósicos de castanha podem ser um grande referencial para produção de novos materiais, por ser uma matéria de baixo custo para seu reuso. Os materiais compósitos é uma forma de reutilização, que incluem elementos renováveis ou sustentáveis para fibras ou matrizes, estão atraindo interesse por suas perspectivas econômicas e ambientais e oferecem utilidade em inúmeras indústrias devido à sua formabilidade, leveza e características de design (MERTENS; GURR; KRAUSE, 2017).

Os biocompósitos feito de reforços dos resíduos de castanha-do-Brasil e outras fibras naturais, além de serem opção sustentável pode gerar oportunidades lucrativas para a comunidade que não reutiliza esses resíduos. Segundo estudos, a produção média anual de frutos de castanheira no Brasil gira em torno de 40 ton por ano, e que até pouco tempo atrás, os únicos usos para este material eram na produção de artesanato e carbonização para uso em fornalhas e caldeiras (NOGUEIRA, 2018). Os compósitos ecológicos e renováveis a partir de cargas lignocelulósicas são cada vez mais utilizados para substituir materiais convencionais formados a partir de compósitos de materiais sintéticos que permitem reduzir o efeito das emissões de gases de efeito estufa (SANJAY et al., 2018).

Com a facilidade de obter essas fibras lignocelulósicas as empresas estão cada vez mais adeptas à reutilização para criação de novos insumos de materiais, com isso causando menos impacto aos finitos recursos naturais. Análises preveem taxa de crescimento composta anual positiva de compostos de fibra natural de quase 11,68% de 2016 a 2021, devido à alta demanda das indústrias civil e de construção, transporte e bens de consumo (MANSOR, 2019).

O objetivo desta pesquisa foi realizar um levantamento com estudos das aplicações dadas aos resíduos lignocelulósicos de castanha-do-Brasil que são utilizadas como cargas em compósitos como meios sustentáveis e de alternativas para matrizes termoplásticas, incluindo ciência de materiais e sua importância ao meio ambiente. Tendo como finalidade abordar o conhecimento atualizado e discutir as novas propostas e viabilidade sobre essas aplicações desses resíduos gerados a partir de castanha-do-Brasil e com isso, fornecendo uma análise importante para esse tema.

2 Metodologia

Quanto aos meios foi utilizada pesquisa de revisão sistemática para levantamentos de documentos acadêmicos recentes avaliando as múltiplas aplicações de resíduos de castanha-do-Brasil, onde concentra uma análise dos últimos seis anos (2017 – 2023), envolvendo estudos com as aplicações dadas aos resíduos lignocelulósicos de castanha-do-Brasil. Para isso, foram utilizados as base de dados da Scopus (<https://www.scopus.com/>), Capes, Scielo e Google Acadêmico (<https://scholar.google.com/>), aplicando-se as palavras-chave “castanha do Brasil” ou “*Bertholletia excelsa*” em conjunto com “compósitos poliméricos” ou “fibras naturais” ou “lignocelulósicos”. A literatura foi categorizada em biocompositos sustentáveis e sua utilização. Além disso, foram selecionados estudos que caracterizaram as propriedades físicas, químicas e mecânicas da castanha-do-Brasil.

3 Resultados e Discussão

3.1 Lignocelulose e sua utilização

A biomassa lignocelulósica é uma mistura complexa de polímeros primários de celulose, hemicelulose e lignina, que compõem as paredes celulares vegetais, além de componentes secundários chamados extratores, cujo conteúdo varia entre as espécies (SANTANA JUNIOR, 2020). Material lignocelulósico é o termo usado para conceituar os compostos de lignina, hemicelulose e de celulose, relacionados a plantas de madeira macia e dura (AHMAD; ZAKARIA, 2019). Juntos são conhecidos como biopolímeros naturais mais abundantes no meio ambiente. Em destaque temos a celulose e a lignina, que juntas são responsáveis por 15% e 35% da biomassa lignocelulósica (AHMAD; ZAKARIA, 2019; RASTOGI; BANERJEE, 2019).

Devido às suas propriedades, bem como suas propriedades renováveis e biodegradáveis, a hemicelulose possui pouca resistência mecânica, estrutura amorfa e baixa massa molar, sendo facilmente degradada durante hidrólise e tratamento térmico (LUO et al., 2019; XIANG et al., 2019). As fibras lignocelulósicas podem ser extraídas de fontes naturais, como subprodutos agrícolas, recursos florestais e resíduos (MAZUR et al., 2020). Portanto, por ter essas características a biodegradabilidade tem como forma ser de baixo impacto ao ser depositado na natureza.

As fibras naturais são de grande importância para o meio ambiente, pois há em sua composição o teor de agregar valor para materiais como ecocompósitos, em diversos tipos e tamanhos de fibras vegetais, sendo uma opção sustentáveis para substituir as fibras sintéticas, que trazem dano ao ser descartados de forma errada ao meio ambiente. Seguindo Manrinquez

et al. (2020) eles relatam que os resíduos lignocelulósicos não devem ser vistos como problemas para os sistemas de gerenciamentos de resíduos, e sim como grande potencial para uso como materiais ecológicos.

E dentre os resíduos lignocelulósicos vegetais importantes para ser usado como insumos de novos materiais, estão os resíduos da castanha-do-Brasil (figura 1). As fibras dos resíduos da castanha-do-Brasil são consideradas um reforço natural ecologicamente correta e de baixo custo devido à facilidade de processamento e fonte de resíduos agrícolas. Por ser classificada como carga lignocelulósica natural, os resíduos da castanha, pode ser usado por diferentes matrizes poliméricas (PETRECHEN et al., 2019).



Figura 1:Resíduos lignocelulósicos da castanha-do-Brasil e suas amêndoas comestíveis (a) o resíduo em maior quantidade, o pericarpo do fruto; (b) resíduos da casca da semente (tegumento); (c) amêndoas. **Fonte:** Os autores.

3.2 O uso de resíduos de castanha-do-Brasil como reforço natural

Neste tópico será abordado sobre a diversidade de biocompósitos que são desenvolvidos através dos resíduos de castanha-do-Brasil como cargas ou material de reforço, sendo incorporados para diferentes matrizes poliméricas como a sintética, resina poliuretana e poliestireno, conforme registrado na literatura.

Petrenchen et al. (2019) estudou a morfologia do resíduo da castanha da escala macro à escala nano, e descreveu como sendo um material abundante de matéria lignocelulósica, fibrosa, renovável, de baixo custo e de uma excelência para o desenvolvimento como material de reforço. Este arranjo foi associado às propriedades superiores relativas do mesocarpo, indicando um ótimo material para uso como cargas para biocompósitos ou em aplicações biomiméticas.

Sonego et al. (2022) desenvolveram biocompositos a partir da inspiração do mesocarpo de *B. excelsa* com matriz de epóxi com ácido polilático e reforçado por fibra de carbono 30% e espuma sintática inspirada em esclereides. Neste estudo, os compósitos criados foram impressos em 3D, eles relataram que a microestrutura foi analisada por microscopia

eletrônica de varredura e descreveram que, o compósito inspirado a partir do mesocarpo de resíduos da castanha desempenhou positivamente, visto que, tanto a elasticidade, flexão e sua densidade foram seis vezes maiores que o epóxi puro. No entanto a espuma sintática ainda necessita de mais ajustes para desempenhar com melhor resultados. Foi demonstrado que o mesocarpo da castanha-do-Brasil pode inspirar novas estruturas e materiais, resultando em compósitos estruturais leves, fortes e robustos com aplicações nas indústrias de construção, energia ou transporte (SONEGO et al., 2022).

Silva e colaboradores (2019), apresenta um estudo no qual eles avaliaram a casca da castanha-do-Brasil como reforço e poliestireno como matriz. Nesse estudo se observou a partir dos resultados que o uso da casca como carga apresentou características amorfo, ou seja, que não possui uma estrutura ordenada, portanto uma compatibilidade na agregação das partículas (reforço) perante a matriz de poliestireno, obtendo uma resistência a atração das amostras trabalhadas de 2,5% e 5% de fração de casca de castanha referente ao material poliestireno. Além de comparar os resultados com outros compósitos de fibras vegetais, é possível projetar as possibilidades de aplicação desse novo material em peças de máquinas (SILVA et al., 2019).

Nogueira, Lahr e Giaccon (2018), investigaram o uso de resíduos do ouriço da castanha a partir das partículas aglomeradas como carga e associado à resina poliuretana derivada do óleo da mamona como matriz em diferentes teores (20%, 25% e 30%) em relação à massa seca das partículas. Para esse estudo foram testados a partir de ensaio de dureza, teor de cinzas, umidade e inchamento. Com relação aos teores de resina é possível desenvolver com os teores listados, porém o que obteve o melhor desempenho mecânico e físico foi o de teores com 30% de resina. Boas propriedades de variação dimensional e resistência mecânica, comprovando assim seu potencial de utilização nos setores de construção civil e moveleiro (NOGUEIRA; LAHR; GIACON, 2018).

Tabela 1. trabalhos recentes sobre compósitos com cargas de resíduos lignocelulósicas de castanha-do-Brasil.

Carga	Matriz	Objetivo	Referências
Ouriço (mesocarpo)	Resina poliuretana	O desenvolvimento de painéis e avaliar a sua viabilidade técnica e propriedades físico mecânicas.	Nogueira et al. (2018)
Casca	Poliestireno	Produzir um novo material compósito de alto impacto com carga lignocelulósica.	Silva, (2019)
Casca	Poliestireno	Caracterização por DRX em amostras de compósitos produzida por injeção plástica.	Silva et al., (2019)
Ouriço (mesocarpo)	Sintético (Epoxi)	Confeccionar compósito com foco na microestrutura do mesocarpo de <i>B. excelsa</i> e verificado quanto ao seu comportamento mecânico.	Sonego <i>et al.</i> , (2022)
Pericarpo e casca	polipropileno	Caracterização como carga em biocompositos em matrizes de polipropileno os resíduos de castanha-do-Brasil.	Petrenchen, (2017)

Os resíduos de castanha-do-Brasil, tem despertado interesses em diversas áreas para uso principalmente em reforços de base biológica, pois é de importância ambiental como mostra algumas literaturas, devido ao seu potencial de biodegradabilidade para o meio ambiente, ou seja, não trazendo danos ao chegar ao seu ciclo final de vida. Várias investigações trazem o seu uso como reforço em diferentes matrizes poliméricas, como amido, poliésteres, polipropileno, poli (ácido lático) e polihidroxialcanoato (AKPINAR BORAZAN E ADIGUZEL, 2018; BARCZEWSKI et al., 2018; TORRES et al., 2019; WU et al., 2014).

Torres e colaboradores (2022), fizeram uma revisão de literatura sobre o uso dos resíduos lignocelulósicos da castanha, sendo explorado as propriedades e suas aplicações em várias indústrias, entre eles o biocompósito. A maioria dos resultados demonstrados nessa revisão foi promissor para as aplicações com os resíduos da castanha, visto que os autores relatam ainda o baixo uso desses resíduos para a viabilidade industrial e comercial destas aplicações. Atingir esse objetivo contribuirá para a preservação da floresta amazônica e reduzirá a carga ambiental esperada do descarte não intencional de resíduos da castanha-do-brasil, incluindo a queima de biomassa em condições perigosas (TORRES, 2022).

Petrenchen, (2016), produziu e caracterizou compósitos de matriz de polipropileno com carga de pericarpo e casca proveniente do resíduo da castanha, esses compósitos passaram por

diferentes testes como resistência à tração, resistência à flexão e resistência ao impacto. Foram bem avaliados nos ensaios de dureza com valores de 74 e 78 Shore D, sendo registrado um aumento superior entre 4% e 7% em relação aos polipropilenos puros. O autor relata que apesar dos resultados promissores dos reforços o mesocarpo foi superior aos que utilizaram cargas das cascas das sementes, porém, ambos apresentaram bons resultados quando comparados com outro compósitos de cargas diferentes como madeiras e até plásticos. Esses biocompósitos desenvolvidos se mostraram tecnicamente viáveis, representando uma nova oportunidade de contribuir com o desenvolvimento socioeconômico da região amazônica.

Akpınar Borazan e Adiguzel (2018), desenvolveram um compósito e caracterizaram a partir da casca da castanha e caulim como reforço usando como matriz o poliéster, com uma proporção de 3 -10 em volume% e a carga padrão de caulim de 3%. Foram avaliados quanto a influência do teor de fibra nas propriedades mecânicas, como resistência à flexão, resistência ao impacto e dureza. Mostraram que a adição de quantidades crescentes de fibra de casca de castanha e caulim afetou as propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos e que a casca de castanha e o caulim junto como reforço foi capaz de suportar temperatura suficiente sem prejudicar o processo do compósito, permitindo que seja usado como carga potencial para compósitos poliméricos.

4 Considerações finais

Este trabalho de revisão demonstrou a busca constante dos pesquisadores envolvendo estudos feitos a partir dos resíduos lignocelulósicos de castanha-do-Brasil que são utilizadas como cargas em compósitos como meios sustentáveis e de opção para matrizes termoplásticas.

Em conclusão, a biomassa lignocelulósica, composta por celulose, hemicelulose e lignina, tem sido amplamente explorada devido às suas propriedades renováveis, biodegradáveis e suas aplicações em diversos campos. A utilização dos resíduos da castanha-do-Brasil como reforço natural em compósitos poliméricos é um exemplo notável dessa tendência. Esses resíduos têm se mostrado promissores em diferentes matrizes poliméricas, oferecendo benefícios tanto em termos de propriedades mecânicas quanto de sustentabilidade ambiental.

A pesquisa tem demonstrado que os compósitos desenvolvidos a partir dos resíduos da castanha-do-Brasil podem resultar em materiais mais leves, fortes e robustos, adequados para diversas aplicações nas indústrias de construção, energia, transporte e até mesmo em peças de máquinas. Além disso, o uso desses resíduos contribui para a redução da carga ambiental,

evitando o descarte inadequado e promovendo a utilização sustentável dos recursos naturais da região amazônica.

No entanto, é importante destacar que ainda há desafios a serem superados, como o desenvolvimento de processos de produção mais eficientes e a escalabilidade industrial desses compósitos. Além disso, é crucial promover a conscientização sobre as vantagens desses materiais sustentáveis e incentivar a adoção em larga escala pelas indústrias.

Em suma, a utilização dos resíduos lignocelulósicos da castanha-do-Brasil como reforço natural em compósitos poliméricos representa uma abordagem inovadora e promissora para a criação de materiais mais sustentáveis, contribuindo para a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento socioeconômico da região amazônica.

Referências

- AHMAD, N.; ZAKARIA, M. R. Oligosaccharide From Hemicellulose. Lignocellulose for **Lignocellulose for future bioeconomy**. Elsevier. p. 135-152. 2019. DOI: 10.1016/b978-0-12-816354-2.00008-6.
- AKPINAR BORAZAN, A., ADIGUZEL, G. Influência da adição de casca de castanha ao caulim/ compostos de poliéster. *J. Eng. Res. **Appl. ciência*** 7, 937–943. 2018.
- BARCZEWSKI, M., MATYKIEWICZ, D., KRYGIER, A., ANDRZEJEWSKI, J., SKÓRCZEWSKA, K. caracterização de biocompósitos de poli (ácido láctico) preenchidos com resíduo de casca de castanha. *J. Mater. **Gestão de Resíduos de Ciclos***. 20, 914–924. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0658-5>.
- CARDOSO, B. R., DUARTE, G. B. S., REIS, B. Z. COZZOLINO, S. M. Brazil nuts: Nutritional composition, health benefits and safety aspects. **Food Research International**, v. 100, p. 9-18, 2017.
- DA SILVA, J. R. S., NETO, J. C. D. M., DEL PINO, G. G. DOS SANTOS, M. D. análise do compósito de poliestireno e casca da castanha do brasil (*Bertholletia excelsa*) para verificação de propriedades mecânicas. In: **76^o Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC. Anais. Palmas/TO**. 2019.
- KLUCZKOVSKI, A. M., DE OLIVEIRA, L. B., MACIEL, B. J. Caracterização e extração do óleo de castanha-do-Brasil: revisão. **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 3, p. 391-402, 2021.
- LUO, Y., Li, Z., Li, X., Liu, X., Fan, J., Clark, J. H. Hu, C. **The production of furfural directly from hemicellulose in lignocellulosic biomass: A review**. *Catalysis Today*, 2019. ISSN: 09205861, DOI: 10.1016/j.cattod.2018.06.042.
- MANRÍQUEZ-ALTAMIRANO, A., SIERRA-PÉREZ, J., MUÑOZ, P., GABARRELL, X. Análise de resíduos sólidos da agricultura urbana no marco da economia circular: estudo de

caso da cultura do tomate em estufa integrada na cobertura. **ciência Ambiente Total**. 2020. 734, 139375. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139375>.

MANSOR, M. R., MASTURA, M. T., SAPUAN, S. M., ZAINUDIN, A. Z. The environmental impact of natural fiber composites through life cycle assessment analysis. **Woodhead Publishing**: Series in Composites Science and Engineering, p. 257-285. 2019.

MAZUR, K., JAKUBOWSKA, P., ROMAŃSKA, P., KUCIEL, S. Poliéter verde de alta densidade (HDPE) reforçado com fibra de basalto e cargas agrícolas para aplicações técnicas. **Compos. Parte B Eng.** **202**, 108399. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.composb.2020.108399>.

MERTENS, OLIVER; GURR, JULIUS; KRAUSE, ANDREAS. The utilization of thermomechanical pulp fibers in WPC: A review. **Journal Of Applied Polymer Science**, v. 134, n. 31, p.1- 11, 13 abr. 2017.

NOGUEIRA, I. M. S. N.; LAHR, F.A.R.; GIACON, V.M. Desenvolvimento e caracterização de painéis de partículas aglomeradas utilizando o resíduo do ouriço da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) e resina poliuretana derivada do óleo de mamona. **Revista Matéria**, v.23, n.1, 2018.

PETRECHEN, G. P., ARDUIN, M., AMBRÓSIO, J. D. Morphological characterization of Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) fruit pericarp. **Journal of Renewable Materials**, v. 7, n. 7, p. 678-687, 2019.

PETRECHEN, GUSTAVO PINTO. Caracterização dos materiais lignocelulósicos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*), preparação e caracterização de seus compósitos com polipropileno. **Dissertação** em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, São Carlos, 2017.

RASTOGI, A.; BANERJEE, R. **Production, and characterization of cellulose from Leifsonia sp.** Process Biochemistry, 2019. ISSN: 13595113, DOI: 10.1016/j.procbio.2019.06.008.

SANJAY, M. R., MADHU, P., JAWAID, M., SENTHAMARAIKANNAN, P., SENTHIL, S. PRADEEP, S. Characterization, and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, 172, 566-581. 2018.

SANTANA JÚNIOR, Cláudio Carneiro. Utilização de biomassas lignocelulósicas da Amazônia Legal para produção de bioprodutos em um contexto econômico e socioambiental. 2020. 99f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências do Ambiente) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente, Palmas, 2020.

SANTOS, C., DA, C. Descarte E Reaproveitamento De Resíduos Da Castanha Do Brasil (*Bertholletia Excelsa*) Em Uma Cooperativa Extrativista No Município De Laranjal Do Jari. In: **I Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Anais... Gramado**. 2018.

SILVA, JEFFERSON RENAN SANTOS DA. **Obtenção e caracterização de um material compósito produzido com resíduos da castanha-do-brasil e poliestireno de alto impacto**. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

SÔNEGO, M., SCIUTI, V. F., VARGAS, R., CANTO, R. B., PESSAN, L. A. Composite design bioinspired by the mesocarp of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*). **Bioinspiration & Biomimetics**. 2022. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ac6f37>.

TORRES, F. G., GONZALES, K. N., TRONCOSO, O. P., CHÁVEZ, J., DE-LA-TORRE, G. ESustainable applications of lignocellulosic residues from the production of Brazil nut in the Peruvian Amazon. **Environmental Quality Management**, v. 31, n. 4, p. 291-300, 2022.

TORRES, FG, MAYORGA, JP, VILCA, C., ARROYO, J., CASTRO, P., RODRIGUEZ, L. Preparação e caracterização de um novo biocompósito amido-casca de castanha. **SN Appl. ciência** 1, 1–7. 2019. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1204-y>.

WU, C.-S., HSU, Y.-C., LIAO, H.-T., YEN, F.-S., WANG, C.-Y., HSU, C.-T. Caracterização e biocompatibilidade de compósitos à base de fibras de casca de castanha com poliéster. **J. Appl. Polim. ciência** 131, 40730. 2014. <https://doi.org/10.1002/app.40730>.

XIANG, L., YANG, J., LUO, D., SU, X., QIN, S. Construction of efficient desalting layer on a cellulose acetate membrane by acetalized surface crosslinking treatment. **Polymer Engineering and Science**, 2019. ISSN: 15482634, DOI: 10.1002/pen.25036.

CAPÍTULO II

Caracterização de Fibra *in natura*, mercerizada e branqueada da casca de Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) visando seu potencial para o uso na construção civil

Characterization of fresh, mercerized and bleached fiber from the bark of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) with a view to its potential for use in the construction industry

Resumo

A preocupação com o meio ambiente é um dos grandes dilemas humano em escala mundial o interesse maior, por isso, uma alta quantidade de pesquisas vem sendo fomentadas e direcionadas para materiais provenientes de fontes que são renováveis, as quais venham substituir parcial ou integral os derivados de petróleo. O uso de fibras lignocelulósicas e seus constituintes resistentes é uma alternativa para os diversos usos sustentáveis, com isso representando uma oportunidade de agregar valor econômico a resíduos industriais e ao desenvolvimento tecnológico sustentável. Esta pesquisa teve por objetivo caracterizar o resíduo *in natura* e após o processo de mercerização e branqueamento na casca da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) quanto à físico-química e térmica, verificando seu potencial no uso na produção de materiais sustentáveis para aplicação na construção civil. Primeiramente, foram avaliados os teores de fibra total (84,7%) casca *in natura*, (50,43%) casca mercerizada e (62,94%) casca branqueada. Observou-se um aumento de celulose nas fibras tratadas, e redução de lignina e extrativos em relação a fibra *in natura*. Na análise de fluorescência de raios-X havia a presença de elementos como K, Ca, Na, entre outros, que podem ter implicações no uso das fibras para diferentes aplicações, sem trazer danos ao meio ambiente. As análises térmicas mostraram que as fibras tratadas tiveram comportamentos diferentes de degradação, indicando alterações na estrutura molecular e na estabilidade térmica após os processos químicos. O conhecimento das características físico-químicas e térmicas das fibras de resíduo da castanha-do-Brasil é necessário para subsidiar etapas de processamento de compósitos com uso destes materiais. Além disso, os tratamentos químicos aplicados às fibras lignocelulósicas da casca de castanha-do-Brasil alteraram suas propriedades, ampliando seu potencial de aplicação em

diferentes setores industriais, com possibilidades promissoras para uso em materiais compósitos e outros, contribuindo assim para a economia circular e a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Lignocelulósico, Polímero vegetal, Resíduos agroindustriais.

Abstract

Concern for the environment is one of the great human dilemmas on a global scale, which is why a great deal of research is being carried out into materials from renewable sources that can partially or fully replace petroleum derivatives. The use of lignocellulosic fibers and their resistant constituents is an alternative for various sustainable uses, thus representing an opportunity to add economic value to industrial waste and sustainable technological development. The aim of this research was to characterize the residue in natura and after the mercerization and bleaching process in the shell of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) in terms of its physicochemical and thermal properties, verifying its potential for use in the production of sustainable materials for use in civil construction. Firstly, the total fiber content was evaluated (84.7%) raw bark, (50.43%) mercerized bark and (62.94%) bleached bark. There was an increase in cellulose in the treated fibers and a reduction in lignin and extractives compared to the raw fiber. X-ray fluorescence analysis showed the presence of elements such as K, Ca, Na, among others, which may have implications for the use of the fibers for different applications, without harming the environment. Thermal analysis showed that the treated fibers had different degradation behaviors, indicating changes in molecular structure and thermal stability after the chemical processes. Knowledge of the physicochemical and thermal characteristics of Brazil nut residue fibers is necessary to support the processing of composites using these materials. In addition, the chemical treatments applied to the lignocellulosic fibers of Brazil nut shells have altered their properties, expanding their potential for application in different industrial sectors, with promising possibilities for use in composites and other materials, thus contributing to the circular economy and environmental sustainability.

Keywords: Lignocellulosic, plant polymer, agro-industrial waste.

1. Introdução

A preocupação com o ambiente tem gerado discussões globais por conta de degradações de territórios e catástrofes noticiados quase que diariamente em todo o planeta. Nesse sentido, pesquisas vêm sendo fomentadas e direcionadas para materiais provenientes de fontes que são renováveis, as quais venham substituir parcial ou integral os derivados de petróleo e com isso, agregar valor à nova matéria-prima e garantir a preservação, com soluções alternativas de novos materiais biodegradáveis que possam suprir as necessidades industriais.

Visando ao desenvolvimento mais sustentável para o planeta, em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) e 193 países se comprometeram a colocar em prática a nova agenda de desenvolvimento sustentável, ao todo foram 17 objetivos indicadores de sustentabilidade para o planeta, as ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), sendo alinhado às atividades da indústria, construção civil buscando uma industrialização mais inclusiva a partir da reutilização dos resíduos seguro e resiliente para o meio ambiente (ONU, 2015).

O resíduo agroindustrial de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) é produzido em grandes quantidades no Amazonas devido o estado ser um dos maiores produtores com 14,303 mil toneladas só em 2022 (IBGE, 2023). Usualmente, apenas a *semente* é vista como produto a ser aproveitado, assim sendo, resultando todo o resto do fruto (ouriço, casca e película), cerca de 90% como resíduos (SOUZA; SILVA, 2021). Assim como muitos produtos oriundos da floresta cujo potencial para indústria de compósitos é considerável, a castanha-do-Brasil é abundante e seu descarte também, esses resíduos podem ser empregados como insumos de novos materiais por ser considerados um reforço natural ecologicamente correto e de baixo custo.

Nesse contexto, dentre as soluções atualmente estudadas é a aplicação em biocompósitos de fibras lignocelulósicas como material substituto, principalmente para compósitos sintéticos e outros materiais técnicos ditos tradicionais, que podem trazer diversas vantagens e garantir um meio mais sustentável. Os compósitos produzidos de fibras vegetais oferecem muitos benefícios em termos de desempenho ambiental, entre eles estão, como sendo renováveis, recicláveis e principalmente biodegradáveis (MANSOR, 2019). Possibilitando assim a redução do impacto ambiental em relação a esse resíduo Agroindustrial.

Outra razão importante desse estudo é que existem poucos trabalhos em relação ao beneficiamento das fibras *lignocelulósicas* da casca de castanha-do-Brasil a partir das fibras tratadas quimicamente para o beneficiamento da mercerização e branqueamento das fibras que permite uma purificação maior nas fibras vegetais para a celulose. Com grande disponibilidade, acelerada renovação, economia, baixo peso e altas propriedades específicas das fibras vegetais

e alta resistência, permitem que sejam consideradas uma alternativa paralela às fibras sintéticas (MISRA et al., 2015).

O uso de fibra celulósica de casca de castanha-do-Brasil para a utilização como reforço na preparação de compósitos, na literatura é inexistente, o uso geralmente é feito com toda a fibra lignocelulósica, não ocorrendo a separação, mesmo que algumas pesquisas publicadas venham demonstrando que a celulose é eficiente na interação entre a carga e a matriz nos compósitos. Ocasionalmente assim maior aumento nas propriedades mecânicas e térmicas, como demonstra estudos feitos com compósitos de fibra celulósica a partir da casca de arroz com tratamento químico (BATTEGAZZORE et al., 2019).

Deste modo, faz-se necessário trabalhar quimicamente nas superfícies dessas fibras, adotando-se métodos, como o tratamento alcalino de Hidróxido de sódio (NaOH), que são utilizados em procedimentos de mercerização (MULINARI, 2015; VERMA e GOH, 2021). Assim sendo, o resultado é um produto melhorado, com características sustentáveis e possibilidades competitivas para com as matérias-primas sintéticas industriais, vindas de origens não renováveis, dessa forma, causando malefício ao meio ambiente (REBELO, 2019).

Corroborando com as novas necessidades dos chamados materiais sustentáveis e a busca por soluções que visam solucionar os impactos ambientais vindo da geração de resíduos agroindustrial da castanha-do-Brasil e do desafio de aumentar a aplicação das fibras naturais e dos polímeros biodegradáveis em relação a competitividade com as fibras sintéticas, objetivou-se caracterizar esse resíduo *in natura* e após o processo de mercerização e branqueamento na casca da castanha-do-Brasil verificando seu potencial uso na produção de materiais sustentáveis para aplicação na construção civil. O interesse em usar as fibras lignocelulósicas é grande e ainda há muito para se descobrir, desde a sua extração, inclusão para novos materiais parcial ou integral, verificar sua resistência entre outros, até a obtenção de novos produtos a partir delas.

2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Os reagentes utilizados (Hidróxido de sódio, Peróxido de hidrogênio (H₂O₂), ácido sulfúrico (H₂SO₄), Etanol, Tolueno, clorito de sódio (NaClO₂), ácido acético glacial) foram adquiridos da Sigma Aldrich, Dinâmica.

2.1 Obtenção da matéria-prima

As cascas de castanha-do-Brasil utilizadas para caracterização foram fornecidas por uma usina de Manaus-AM-Brasil. As amostras (figura 1) foram recebidas em embalagem fechada, em seguida foram higienizadas manualmente em água corrente conforme sugere Petrechen et al., (2019) para separação de eventuais resíduos de amêndoas e outras partículas residuais. Em seguida as cascas passaram por um processo de secagem em estufa (Lucadema, modelo Luca-82/100 à temperatura 100 °C, visando a perda de umidade), durante 24 horas. Após a secagem, as cascas foram trituradas com auxílio de um moinho de facas modelo TECNAL (Figura 1). Após a trituração, o material particulado foi peneirado utilizando o jogo de peneiras com as granulometrias de 10, 16, 30 e 40 Tyler. A separação do material com diferentes granulometrias e em seguida a caracterização deve-se a separação do pó que resta com a trituração, sendo que pode interferir nas propriedades das fibras ao ser tratada quimicamente e posterior inferência de seu uso em novos materiais.

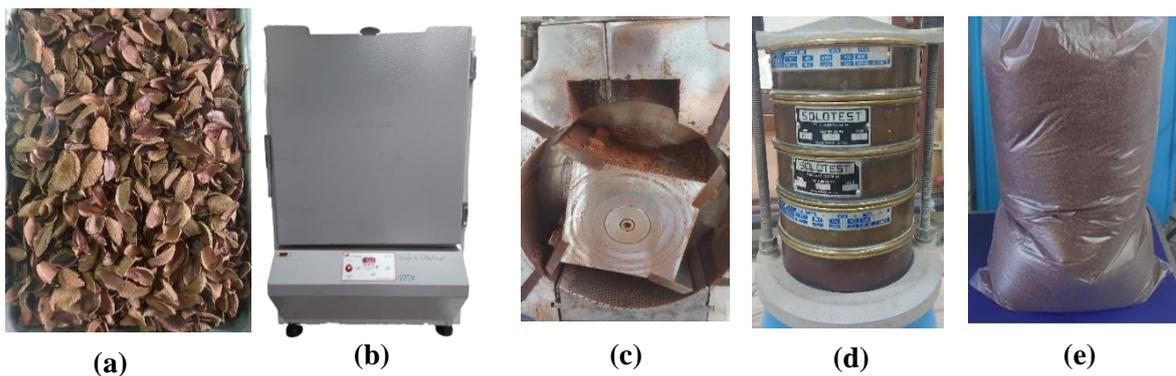


Figura 1: Preparação do material: a) separação e assepsia das cascas; b) estufa com as amostras; c) trituração no moinho de facas; d) peneiras usadas no peneiramento; e) cascas trituradas.

2.2 Caracterização das fibras da casca de castanha-do-Brasil

Para a caracterização física, química e térmica das cascas de castanha-do-Brasil foram realizados os ensaios seguintes:

2.2.1 Mercerização das fibras

A mercerização das fibras da casca de castanha-do-Brasil foi realizada com hidróxido de sódio (NaOH) foi realizado conforme método adotado e adaptado de Giacon (2021). O objetivo foi remover parcialmente a lignina, hemicelulose e outros resíduos, esse processo têm como finalidade melhorar as fibras para diferentes usos. Foram adicionadas a solução de NaOH a 5%

(m/v) na proporção de 200 g de fibras para 500 ml de solução por 4h em agitação constante. O excesso de NaOH foi removido com água (reuso) até que o pH das lavagens atingissem a neutralidade. Posteriormente, as fibras foram secas em estufa convencional a 55 °C por 24 horas para retirada de umidade.

2.2.2 Branqueamento das fibras

Os tratamentos com peróxidos alcalinos juntamente com NaOH são utilizados com o objetivo de melhorar a interação entre fibras naturais e suas possíveis aplicações e retirar com mais eficiência os componentes que dificultam essa interação como a lignina, hemicelulose e outros extrativos. O processo de branqueamento foi realizado a partir da adição em um bécher 500 ml de NaOH 5% e 500 ml de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) para cada 200 gramas de fibras mercerizadas por 1h. Seguidamente, as misturas foram lavadas em água corrente (reuso) até pH neutro. O processo se repetiu por mais duas fases contabilizando assim, 3h de processos. Em seguida as fibras foram lavadas com água em abundância e secas em estufa convencional a 55°C durante 24 horas.

2.2.3 Fibra total

A análise de determinação de fibra bruta (FB) foi realizada pelos métodos conforme AOAC (2016) em um Becker de 500 ml adicionou-se aproximadamente 1g de casca de castanha-do-Brasil triturada, seguido de adição de 100 ml de ácido sulfúrico 1,25% (m/v), em seguida foi acoplada o Becker ao condensador à um bloco digestor de fibras, Modelo 0326-268, mantendo assim o refluxo por 30 minutos. Após esse tempo foi desligado, esperou-se resfriar por 15 minutos e foi adicionado 100 ml de solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1,25% (m/v).

2.2.4 Extrativos

As cascas trituradas permaneceram por 24 horas na estufa a 65 °C para retirada da umidade. Após isso, os cadinhos foram para o dessecador, permanecendo por 2 horas. Adicionou-se 5,0 g das amostras trituradas no cartucho feito de papel filtro em um Soxhlet, com 150 ml de solução etanol/tolueno.

2.2.5 Lignina

A análise consistiu na separação da lignina e na determinação de seu teor para a amostra. Os resíduos resultantes, ao final desta parte do método, são compostos apenas de lignina. Foi feita segundo a norma TAPPI T 222 (TAPPI, 2006) e utilizou-se a hidrólise ácida para extração. Em

um Becker de 500 ml adicionou-se aproximadamente 1g de casca de castanha-do-Brasil triturada, seguido de adição de 8,5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 72% (m/v) a solução estava em temperatura ambiente.

2.2.6 Holocelulose

O teor de holocelulose foi determinado segundo as normas TAPPY (1999). Em um Erlenmeyer de 500 ml adicionou-se 3g da fibra sem extrativos e umidade, 120 ml de água destilada, 2,5 g de clorito de sódio e 1 ml de ácido acético glacial. O conjunto reagente e Erlenmeyer foi tampado com um Erlenmeyer de 125 ml com agitação constante e aquecimento em banho-maria a 70 °C por 5 horas.

2.2.7 Alfa celulose

Para a realização do teor de alfa Celulose, seguiu-se a norma TAPPI, (1999). Foi adicionado 1,0 g da holocelulose seca e 15 ml de solução de hidróxido de sódio 17,5% (m/v). Em seguida, aguardou-se por 2 minutos para que a solução entrasse em contato com a celulose. Após isso o material foi macerado por 8 minutos. Em seguida colocado 40 ml de água destilada. Para a filtração, usou-se um funil de vidro sinterizado tipo 2 e água destilada abundante, acoplado em uma bomba de vácuo. Ao término da filtração as amostras foram para uma estufa a 105 °C até a sua massa constante.

2.2.8 Teor de proteínas ou fração nitrogenada

Para a determinação do teor de proteína seguiu conforme determinado pela AOAC (2016). Foi pesado aproximadamente 0,2 g da amostra de casca de castanha-do-Brasil triturada, posto em papel de seda e em seguida transferida para o micro tubo de Kjeldahl. Foram adicionados 5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Nuclear) e 2 g de mistura catalítica (mistura de Sulfato de Potássio, Sulfato de Cobre e Selênio) utilizada no processo.

2.2.9 Atividade de água (aw)

A análise foi verificada utilizando o equipamento *Water Activity Meter Dew Point 4TE* (AquaLab® Decagon - USA), pela determinação do ponto de orvalho da amostra triturada de cascas de castanha-do-Brasil em temperatura ambiente (25°C

2.2.10 Umidade

O teor de umidade presente nas cascas foi obtido utilizando o analisador Halógeno de umidade IV3100 (Gehaka). A análise foi determinada conforme a normatização AOAC (2016). A análise consistiu na pesagem de 2,5 g de amostra de casca de castanha-do-Brasil triturada e em seguida o aquecimento por Infravermelho a uma temperatura de secagem de 160°C.

2.2.11 Teor de lipídios

Para a determinação do teor de lipídios na casca, seguiu-se a metodologia da norma AOAC, (2016), em que foram pesados 3 g de casca de castanha-do-Brasil trituradas. O processo de extração em aparelho Soxhlet utilizando Hexano como solvente, este foi adicionado nos copos de alumínio previamente dessecados e verificados suas massas.

2.2.12 Cinza

A obtenção do teor de cinzas das cascas de castanha-do-Brasil, seguiu-se a norma determinada pela AOAC (2016), onde os cadinhos foram calcinados a uma temperatura de 550 °C até a sua massa constante em forno mufla. Os cadinhos foram pesados com o material antes e depois da calcinação.

2.2.13 Fluorescência de raios-x (FRX) da fibra da casca de castanha-do-Brasil

A Espectrometria de Fluorescência de raios-x (FRX) por energia dispersiva, foi utilizada para determinar a composição elementar dos materiais presentes na amostra *in natura*, mercerizada e branqueada. As análises foram realizadas em um espectrômetro da marca Panalytical modelo Epsilon 3-XL, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA e gás hélio (pressão 10 atm./10 kgf/cm²).

2.2.14 Análise termogravimétrica: TGA e DTG

Para a realização da análise termogravimétrica das fibras do resíduo da casca de castanha-do-Brasil e a sua variação de massa em função da temperatura, foram analisadas pela termogravimetria (TGA) e sua derivada (DTG) no equipamento Shimadzu, modelo SDG 60, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, iniciando pela temperatura ambiente até 800 °C. Para o tratamento dos dados utilizou-se o programa OringiLab.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização química e física

A caracterização física e química das amostras de casca de castanha-do-Brasil teve como ponto principal conhecer os teores básicos que podem interferir no objetivo final dessa pesquisa, delineando assim os seus principais componentes e destacando os seus teores encontrados, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1: Resultados dos teores químicos e físicos analisados para composição lignocelulósica, mercerizada e branqueada da casca de castanha-do-Brasil

Composição	Casca <i>in natura</i> (%) em massa (g)	Casca Mercerizada (%) em massa (g)	Casca Branqueada (%) em massa (g)
Fibra Total	84,7 ± 0,60	50,43 ± 0,13	62,94 ± 0,22
Extrativos	15,26 ± 0,39	9,89 ± 0,94	2,11 ± 0,38
Lignina	58,42 ± 1,28	31,20 ± 0,22	15,12 ± 0,92
Holocelulose	39,31 ± 0,09	45,01 ± 0,98	53,93 ± 0,64
Alfa Celulose	42,48 ± 1,01	60,28 ± 0,71	71,04 ± 0,89
Teor de Proteínas	2,90 ± 0,16	1,3 ± 0,23	-
Teor de Lipídeos	0,28 ± 0,05	-	-
Umidade	9,65 ± 0,19	8,51 ± 0,23	8,23 ± 0,41
Atividade (aw)	0,64 ± 0,19	0,45 ± 0,13	0,44 ± 0,3
Cinza	2,14 ± 0,01	2,61 ± 0,23	3,18 ± 0,34

Média ± Desvio padrão

Na Tabela 1, os teores de fibra total encontrados foram: 84,75% casca *in natura*, 50,43% casca mercerizada e 62,94% casca branqueada, como visto observou-se um percentual com maior quantidade na casca *in natura* em relação as outras que obtiveram tratamento químicos, no entanto, pode levar-se em consideração que os tratamentos químicos têm como características retirar total ou parcial os componentes que estão contidos naturalmente na fibra como: lignina, hemicelulose, ceras, óleos entre outros. Como afirmam Silva et al. (2009) que as fibras lignocelulósicas ao ter contato com os tratamentos de mercerização e branqueamento, removem constituintes das fibras, com isso ocorre o isolamento das fibras de celulose. Os teores de fibras bruta encontrado nessa pesquisa assemelham-se ao valor encontrado por Oliveira et al. (2021), que conseguiu um resultado de 84,94% também para a casca de castanha-do-Brasil e baseado na mesma metodologia, sendo assim, um resultado promissor para uso em diversos materiais resistentes e, principalmente como cargas para compósitos.

Em relação ao maior teor de extrativos presentes na casca *in natura* com 15,26% quando comparado as fibras mercerizada e branqueada com 9,89 e 2,11% respectivamente, demonstra que os tratamentos químicos com NaOH, NaOH e H₂O₂ foram eficientes para retirada em grande porcentagem dos extrativos presentes nas fibras. Os extrativos em grandes quantidades

na fibra podem dificultar a adesão ao processar esses materiais para diversos usos, principalmente para o uso em compósitos. Sendo que esses valores estão de acordo encontrados pela literatura. Furtado e colaboradores (2020) encontraram 8,5% pós mercerização para fibra do babaçu, onde relatam que o tratamento foi eficiente para retirada dos extrativos que ainda estavam contidos, produzindo assim fibras de alta qualidade.

Quanto ao percentual de lignina para casca *in natura* foi de 58,42% em relação as fibras tratadas com 31,20 e 15,12% conforme mostra a tabela 1, um valor próximo do que foi encontrado na literatura por Petrechen (2017) que obteve 60,8% um valor alto conforme descrito pelo autor, que associa o valor a forma como foi extraído e a posição que está em maior volume na casca. Pois ao constatar uma menor porcentagem de lignina tem como vantagem de o teor de celulose ser maior e por consequência a extração dela ser mais eficiente. Barbosa et al. (2019), relatam que é um fator importante, uma vez que a lignina possui em sua estrutura propriedades amorfas poliméricas e confere rigidez, impermeabilidade e resistência. No entanto, uma quantidade grande de lignina nas fibras indica uma resistência a compressão e para a biodegradação, comprovando assim que as fibras tratadas obtiveram eficiência na retirada parcial da lignina.

Quanto ao percentual de holocelulose na fibra *in natura* foi de 39,31% e para as fibras mercerizadas e branqueadas foram 45,01% e 53,93% respectivamente. Isso demonstra mais eficiência a partir dos tratamentos químicos, sendo que ao comparar com outros trabalhos, com potencial *in natura* para holocelulose a partir dos tratamentos, foi possível obter um aumento no teor, com valores semelhantes ao de Tarrés et al. (2017) que encontraram teor em torno de 55% para a folha de abacaxi usando a mesma metodologia. Cruz Demóstenes e outros, (2020) encontraram 58% na fibra do buriti.

Ao avaliar os teores de celulose presentes na casca de castanha *in natura*, mercerizada e branqueada e compará-los com os obtidos em outros estudos, foi possível destacar teores diferenciados e significativos de celulose de 42,48%, 60,28% e 71,04% respectivamente, observou-se que após os tratamentos químicos em relação a fibra *in natura*, obteve um maior percentual, isso se dá devido a retirada parcial ou total de extrativos, lignina e outros. Melo et al. (2021), encontraram um valor de 85% para fibra de açáí, ao quantificar os teores celulósicos. Gabriel et al. (2020), quantificou celulose para a casca de café e obteve o resultado de 34,18%. Posto isso, a casca de castanha ao ser tratada quimicamente mostra-se como uma instigante fonte alternativa de celulose, visto que o teor de celulose quantificado desse resíduo é igual ou superior a observada em outros resíduos agroindustriais.

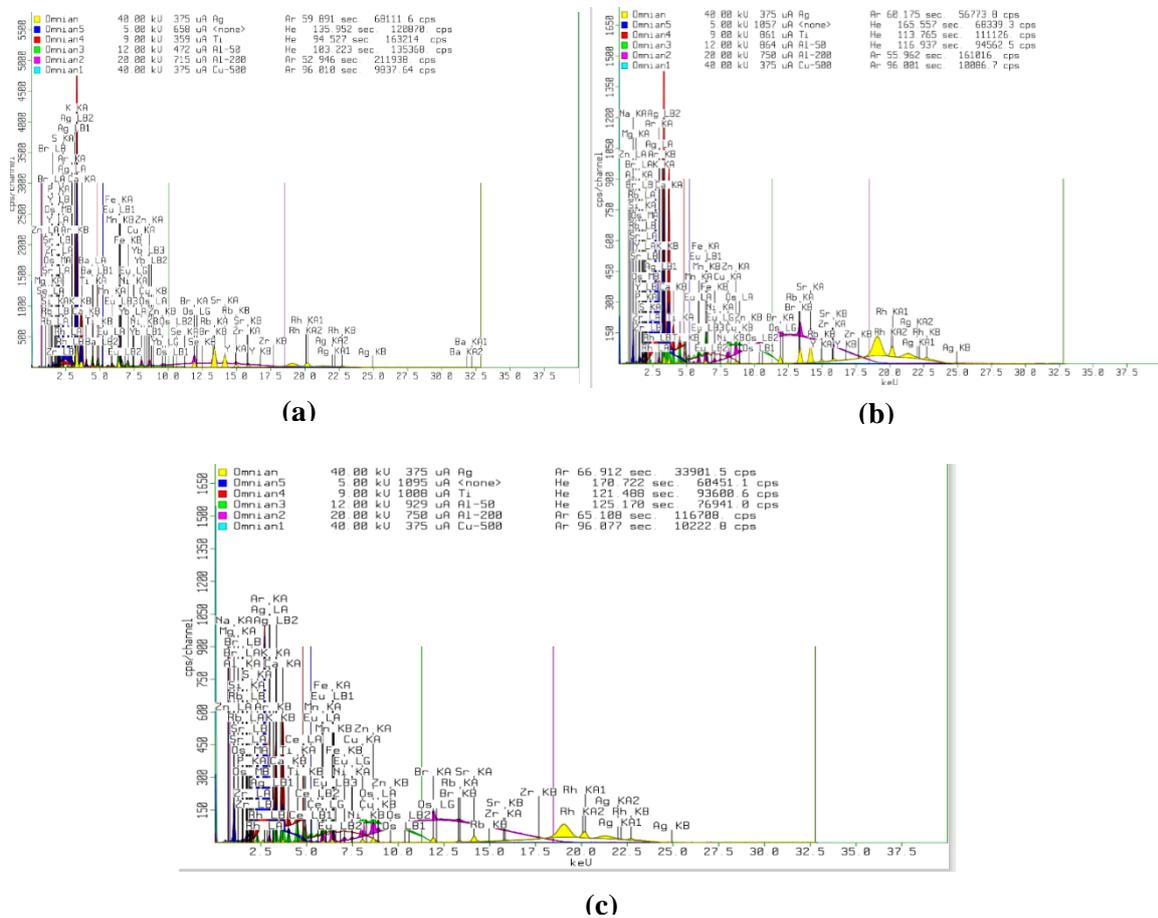
Os valores de lipídios e proteínas encontrados na casca por essa pesquisa foi de 0,28% e 2,90%, um valor pequeno, pois conforme a literatura tanto lipídios quanto as proteínas o valor é mais alto nas amêndoas. Esses valores obtidos estão mais próximos dos resultados encontrados por De Oliveira et al. (2021), no entanto, foram encontrados por Manfio et al. (2012) ao estudarem as cascas de castanha-do-Brasil do Centro-Oeste e Leste da Amazônia foram registrados por eles os seguintes valores na devida ordem, 7,30% e 7,23% para os lipídios e 3,82% e 3,26% para a proteína. Conseqüentemente, esses valores se dão devido a forma de manipulação ou ao ambiente que as castanhas estavam expostas.

A fibra da casca de castanha-do-Brasil *in natura* apresentou percentual de umidade de 9,65%, já a fibra mercerizada 8,51% enquanto a fibra branqueada apresentou 8,23% conforme mostra a tabela 1, já para análise de água (aw), observou-se o maior percentual na amostra *in natura* com 0,64%, onde observa-se um decréscimo de umidade da fibra mercerizada e branqueada com relação à fibra *in natura*, isso se dá devido a separação das moléculas de celulose na região amorfa ao ser aplicado o tratamento químico. Com esses tratamentos a região amorfa cria vazios que tendem a ser preenchidos por água, em seguida reagindo com os grupos hidroxilas e quebrando a sua estrutura a partir da química aplicada. Reduzindo as hidroxilas a tendência é uma fibra mais resistente a umidade (FONSECA, 2021). Pois quanto menor é o índice de umidade nas amostras, melhor é a durabilidade desses resíduos para construção e durabilidade de materiais, compartilhando assim com os resultados de Vassilev et al., (2022), assim como os de Gilio et al., (2021) que obtiveram valores de 10% e 12% para partículas de seringueira e Teca, materiais utilizados em biocompósitos.

A análise de teor de cinzas para a fibra *in natura* do resíduo da casca, assim como para a mercerizada e branqueada foram 2,14%, 2,61% e 3,18% de acordo com a ordem indicada revelou que o teor médio destes componentes após a queima do material manteve-se de acordo com a literatura. Um valor de 13,84% para o resíduo da castanha foi encontrado por Ribeiro, (2020). Quanto ao teor de cinzas, Barbosa et al. (2021) cita que é desejável que os teores apresentem valores baixos, uma vez que teores elevados de minerais contribuem para redução do poder calorífico e menor resistência ao material. O valor médio encontrado nessa pesquisa se assemelha aos que foram encontrados por De Souza et al., (2021) sendo respectivamente, os ouriços (2,74%) e para as cascas (2,56%), comparando assim com os valores registrados por Nogueira et al. (2014), para essas fibras lignocelulósicas.

Figura 2 - Espectros de fluorescência de raios-X da fibra *in natura* (a) mercerizada (b) e branqueada

(c)



Com os resultados da análise de FRX das fibras da castanha-do-Brasil (Tabela 2), foi possível perceber que o resíduo da casca *in natura* tem um grande percentual de potássio (63,54%), cálcio (18,77%), SO₃ com 7,54%, sendo que esse último tem como a reação a qual pode estavelmente ser ligada ao oxigênio (BUNSELL, 2021). Evidenciando ainda, o fosfato, magnésio, além de outros compostos inorgânicos. Barbosa Junior (2021) obtiveram resultados semelhantes para a casca de caju *in natura* e descreveu que esses compostos podem ser empregados como insumo para correção do solo e outras matérias primas, contribuindo assim, para o processo de sustentabilidade do meio ambiente. Petrechen et al. (2019) achou concentrações altas para K (71%) em seguida de Ca (10%) para casca da semente *in natura*, corroborando assim com o resultado desse trabalho.

Tabela 2: Análise elementar por FRX para fibra da casca de castanha *in natura*, mercerizada e branqueada

Elementos	K ₂ O	CaO	SO ₃	P ₂ O ₅	MgO	Ba	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Outros
% (m/m)	63,544	18,774	7,341	2,794	2,12	1,517	1,97	0,504	0,848
Fibra mercerizada									
Elementos	Na	K	Ca	S	Ti	Al	Fe	Si	Outros
% (m/m)	43,364	26,002	19,038	2,733	1,884	1,378	0,846	0,512	0,721
Fibra branqueada									
Elementos	Na ₂ O	SO ₃	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Ti	Fe ₂ O ₃	Outros
% (m/m)	58,304	12,824	10,42	7,114	2,875	1,719	0,943	0,837	1,012

Para as fibras mercerizadas e branqueadas (Tabela 2) observou-se que o resíduo é rico em sódio com concentrações de 43,36% e 58,30%, respectivamente, seguido de potássio com 26,00% e em maior percentual de cálcio para a mercerizada 19,03% em relação a fibra *in natura*. A metodologia semelhante usada neste trabalho foi utilizada por Campos et al. (2016) para o ouriço da castanha-do-Brasil tanto mercerizada quanto *in natura*, para uso em compósitos e com valores próximos aos encontrados em nosso trabalho. De Azevedo et al. (2021) verificou a composição elementar na casca do cupuaçu e observou quantidades significativas de (Fe) com o percentual de 0,77%, menor concentração ao comparar com os resultados encontrados por este trabalho, já os demais elementos obtiveram valores baixos, o Cobre (Cu), Zinco e Rubídio (Rb). O percentual alto de alguns elementos pode estar relacionado com a localização da planta, solo e até mesmo a água.

Caracterização Térmica: TGA e DTG da fibra da casca de Castanha-do-Brasil

Na Figura 3 mostra as curvas de análise TGA e DTG para as amostras da casca de castanha-do-Brasil *in natura*, mercerizadas e branqueadas, sendo fornecido informações sobre a composição química das amostras estudadas, na qual verifica-se a ocorrência de eventos de degradação dessas fibras bem definidos.

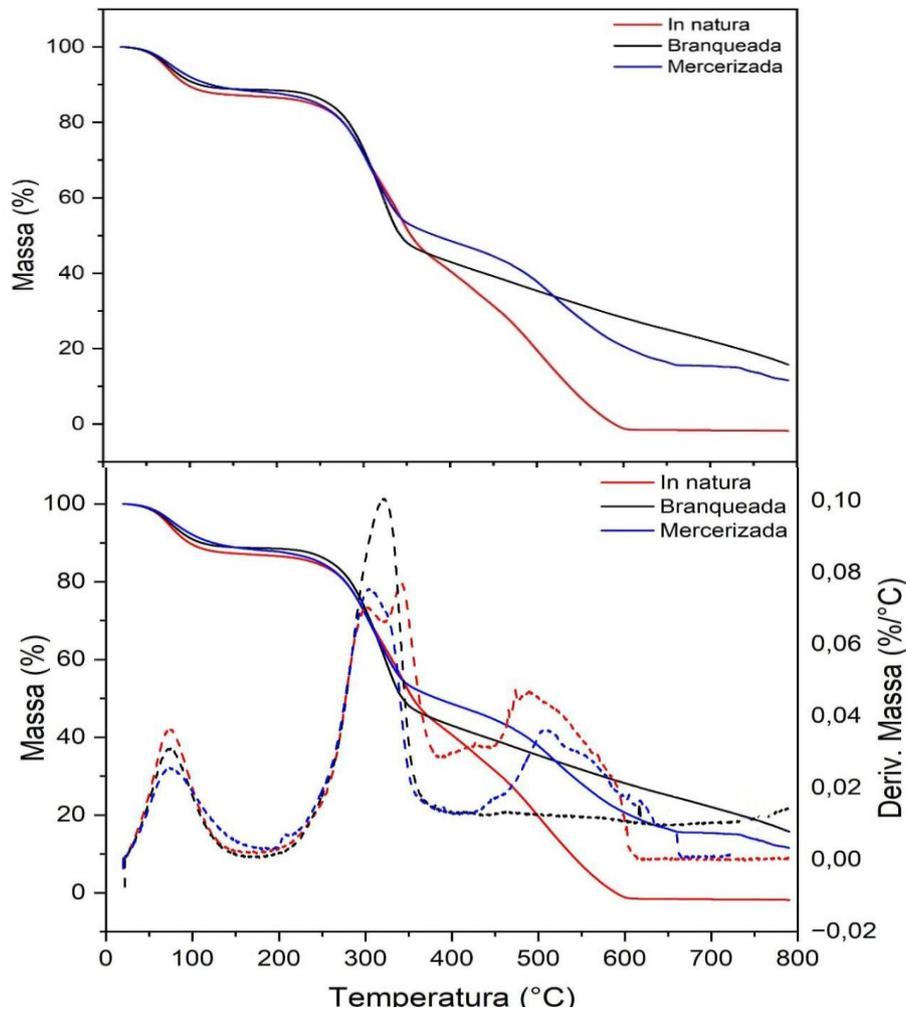


Figura 3. Curvas TG e DTG das fibras de castanha-do-Brasil, *in natura*, mercerizadas e branqueada. Temperatura a partir de 20°C para 800°C, com 20 °Taxa de aquecimento C/min e atmosfera de nitrogênio.

Foram observados quatro eventos onde ocorreu a perda de massa em função do aumento da temperatura conforme é demonstrado na figura 3 e na tabela 3. A fibra *in natura* em relação as fibras tratadas demonstraram uma maior estabilidade térmica sob atmosfera de nitrogênio, sendo que isso pode ter ocorrido devido a retirada de substâncias mais estáveis da superfície das fibras (ILANGO VAN et al., 2020). Sendo observado quatro eventos essenciais de termodegradação onde: No primeiro evento destacou-se há ocorrência de perda de umidade e materiais voláteis contidos nas fibras *in natura* com perda de massa de 11,77% com pico de

temperatura em 72,2°C, mercerizada com 11,14% e faixa de temperatura entre 73,34-181,22°C, a branqueada com 10,31% e pico com temperatura de 74,15°C.

O segundo evento, conforme Misse et al. (2022) está ligado ao início de degradação de alguns extrativos voláteis, hemicelulose, celulose e lignina. Para a fibra *in natura* e mercerizada observou-se que o pico de temperatura foi em 344,52, 305,27 a 319,15°C com perda de massa de 45,06% e 40,44%, sendo observado nesse evento um menor pico para a fibra mercerizada indicando assim, resquício de hemicelulose e outros componentes. Setswalo et al. (2023) afirma que a mercerização tende a deslocar o pico referente a celulose isso se dá devido ao tratamento remover parcial ou integral a hemicelulose e lignina, segundo Bernardes et al. (2023) analisado. Para a fibra branqueada percebeu-se a ausência, uma vez que esse pico tem relação característico com a hemicelulose e outros, indicando assim uma eficiência na remoção deles.

O terceiro evento se refere a degradação total ou parcial da celulose que pode ocorrer entre (315– 450°C). A fibra *in natura* teve perda de massa de 13,8% com pico de temperatura em 423,87°C, a fibra mercerizada foi de 12,06% com a temperatura de 410,07°C. Já a fibra branqueada teve perda de 46,1% com o pico de temperatura entre 321,60 °C. Silva et al. (2023) obtiveram resultados semelhantes para a casca de castanha-do-Brasil *in natura* e Machado et al. (2017) onde o resultado obtido foi proporcional ao encontrado neste trabalho.

Tabela 3 - Faixas de temperaturas, perdas de massa para cada evento e resíduo de degradação térmica.

Evento	Fibra <i>in natura</i>		Fibra mercerizada		Fibra branqueada		Resíduo (%)
	ΔT (T°C)	Perda de massa (%)	ΔT (T°C)	Perda de massa (%)	ΔT (T°C)	Perda de massa (%)	
I	-76,2	11,77	73,34-181,22	11,14	-74,15	10,31	1,166
II	-344,52	45,06	305,27-319,15	40,44	-	-	
III	-423,87	13,08	-410,07	12,06	321,60	46,1	15,16
IV	-498,52	30,67	-517,6	19,87	-	-	17,51

O último evento (Tabela 3) específico envolve a degradação da lignina que pode variar entre (160–900°C) (MISHRA; MOHANTY, 2018). Observou-se nessa etapa a ausência de degradação para a fibra branqueada confirmando assim, a eficiência do tratamento químico nessa fibra, no entanto, para a fibra *in natura* e mercerizada teve perda de massa de 30,67% e 19,87% e com temperatura no pico de 498,5°C e 517°C respectivamente. Resultados semelhantes foram relatados por Petrechen et al. (2019) ao caracterizar o comportamento térmico do material *in natura* da casca e ouriço da castanha-do-Brasil.

No final das curvas (Figura 3), observa-se o teor residual que restou após altas temperaturas e são considerados elementos carbonáceos (PROTZEK et al., 2019) sendo observado ainda que os elementos podem variar devido ao solo, região até mesmo da quantidade utilizada para amostras dos ensaios aplicados. A fibra *in natura*, mercerizada e branqueada apresentou respectivamente 1,166%, 15,16% e 17,51%, valores próximos ao encontrado por De Lima et al. (2021) para a semente e casca de açaí. Sendo assim, todas as fibras tiveram a sua degradação a partir de 200°C, assim sendo, as fibras em questão podem ser usadas para processos que tenham temperaturas inferiores ou superiores ao desse trabalho. Sendo destacado temperaturas iguais ou variados a 200°C em trabalhos diferentes a este, como destaque (Dos SANTOS 2023; PEREIRA et al. 2019; MATHIAS, 2022).

4. Conclusão

As características observadas nas amostras dos resíduos da casca da castanha-do-Brasil para fibra *in natura*, mercerizada e branqueada indicam seu potencial para a produção de materiais compósitos e outros para aplicação na construção civil, uma vez que, a mercerização e o branqueamento mostraram eficiência na remoção de componentes como extrativos, lignina e outros, pois a redução da lignina pode melhorar a eficiência da extração de celulose, tornando o material mais propenso a processos de produção, resultando em uma redução significativa desses elementos nas fibras tratadas. Resultou ainda em aumento relativo nos teores de celulose e holocelulose após os tratamentos, tornando as fibras mais adequadas para várias aplicações. As análises térmicas mostraram que as fibras tratadas tiveram comportamentos diferentes de degradação, indicando alterações na estrutura molecular e na estabilidade térmica após os processos químicos, já para a análise de fluorescência de raios-X revelou a presença de elementos como potássio, cálcio, sódio, entre outros, que podem ter implicações no uso das fibras para diferentes aplicações, como insumos agrícolas ou materiais compostos, sem trazer danos ao meio ambiente. A análise desses resíduos não apenas destaca seu potencial econômico, mas também ressalta seu papel na sustentabilidade, ao converter um subproduto em matéria-prima valiosa. Em síntese, os tratamentos químicos aplicados às fibras lignocelulósicas da casca de castanha-do-Brasil alteraram suas propriedades, ampliando seu potencial de aplicação em diferentes setores industriais, com possibilidades promissoras para uso em materiais compósitos e outros, contribuindo assim para a economia circular e a sustentabilidade ambiental.

Referências

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis. 20th edition. AOAC International, Gaithersburg, MD, USA. 2016.

Amazonas segue como maior produtor de castanha-do-Brasil, aponta IBGE. Disponível em: <https://ciem.com.br/amazonas-segue-como-maior-produtor-de-castanha-do-para-do-pais> Acesso em 20 dez. 2023.

Bunsell, A. R., Joannès, S., & Thionnet, A. (2021). *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. CRC Press.

Barbosa Junior, R. N. D. S. (2021). Processos de beneficiamento e aproveitamento de resíduos do processamento do caju (*Anacardium occidentale*) uma revisão bibliográfica.

Bernardes, GP, de Prá Andrade, M., Poletto, M., (2023). Efeito do tratamento alcalino na estabilidade térmica, cinética de degradação e parâmetros termodinâmicos de fibras de coroa de abacaxi. *J. Mater. Res. Tecnologia*, 23, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.179>

Barbosa, A. D. M., Rebelo, V. S. M., Martorano, L. G., & Giacon, V. M. (2019). Caracterização de partículas de açaí visando seu potencial uso na construção civil. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24.

Battegazzore, Daniele; Noori, Amir; Frache, Alberto. (2019) Natural wastes as particle filler for poly (lactic acid)-based composites. *Journal of Composite Materials*, v. 53, n. 6, p. 783-797.

Barbosa, B. M., Siqueira, H. F., Cabral, C. P. T., Cândido, W. L., Silva, C. M. S., de Carneiro, A. C. O., & Aguiar, A. R. (2021). Qualidade de briquetes produzidos a partir do mix de resíduo agroindustrial com eucalipto. *Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal; Editora Científica Digital: São Paulo, Brazil*, 185-196.

Cunha, J.D.S.C, Nascimento, LFC, da Luz, FS, Monteiro, SN, Lemos, MF, da Silva, CG, & Simonassi, NT (2021). Caracterização Física e Mecânica de Compósitos de Matriz Epóxi Incorporados em Videira Titica (*Heteropsis flexuosa*). *Polímeros*, 13 (23), 4079.

Cruz Demóstenes, LC, Nascimento, LFC, Monteiro, SN, Costa, UO, Da Costa Garcia Filho, F., Luz, FS Da, & Braga, FO (2020). Caracterização térmica e estrutural de fibras de buriti e sua relevância em compósitos reforçados com tecido. *Jornal de pesquisa e tecnologia de materiais*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.036>

Campos, R. D., Sotenko, M., Hosur, M., Jeelani, S., Díaz, F. R., Moura, E. A., ... & Seo, E. S. (2016). Effect of mercerization and electron-beam irradiation on mechanical properties of high-density polyethylene (HDPE)/Brazil Nut Pod fiber (BNPF) bio-composites. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015*, 637-644.

dos Santos, G. M., de Araújo, A. B. S., Giacon, V. M., & Faez, R. (2023). Does the moisture content of mercerized wood influence the modulus of rupture of thermopressed polyurethane-based composites? *Industrial Crops and Products*, 206, 117585.

de Azevedo Padilha, N., dos Santos Brigido, T., de Freitas Cardozo, C., Fernandes, L. F., de Oliveira, A. D. S., & Mattos, J. C. P. (2021). Identificação elementar de (cobre, zinco, ferro, rubídio) nos resíduos das cascas do cupuaçu (*theobroma grandiflorum*) pelo método de fluorescência de raio X. *Scientia Naturalis*, 3(5).

de Oliveira I. B., Souza coelho, C. C., Graã, a. Freitas-Silva, O. Non-timber Amazonian Forest products and their valuable edible nuts: Cutia nut, Egg nut, Sapucaia nut and Brazil nut. **Journal of Agricultural Studies**, v. 9, n. 1, p. 286-302, 2021.

de Lima, A. C. P., Bastos, D. L. R., Camarena, M. A., Bon, E. P. S., Cammarota, M. C., Teixeira, R. S. S., & Gutarra, M. L. E. (2021). Physicochemical characterization of residual biomass (seed and fiber) from açai (*Euterpe oleracea*) processing and assessment of the potential for energy production and bioproducts. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 925-935.

Fonseca, R. P. D., Rocha, J. C., & Cheriaf, M. (2021). Influence of Different Types of Treatments on Amazonian Vegetable Fibers on the Performance of Mortars Based on Portland Cement, Metakaolin and Fly Ash. *Materials Research*, 24, e20210320.

Furtado, J., Furtado Filho, P., Pereira Oliveira, T., de Sousa Caetano, M., de Souza Araújo, I. M., Figueiredo, F., & dos Santos Júnior, J. (2020). Caracterização Química da Fibra do Caule da Palmeira de Babaçu Natural e Após Tratamento. *Revista De Engenharia E Pesquisa Aplicada*, 5(3), 56-64. <https://doi.org/10.25286/rep.v5i3.1254>

Gabriel, T., Belete, A., Syrowatka, F., Neubert, RHH e Gebre-Mariam, T. (2020). Extração e caracterização de celuloses de diversos subprodutos vegetais. *Jornal Internacional de Macromoléculas Biológicas*, 158, 1248–1258. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.264>

Giacon, V. M., Rebelo, V. S. M., dos Santos, G. M., Sanches, E. A., Fiorelli, J., dos Santos Costella, Â. M., ... & Brito, L. M. A. F. (2021). Influence of mercerization on the physical and mechanical properties of polymeric composites reinforced with Amazonian fiber. *Fibers and Polymers*, 22(7), 1950-1956.

Gilio, C. G., Bispo, R. A., Trevisan, M. F., Rodrigues, F. R., Junior, L. C. F. A., & da Silva, S. A. M. (2021). Produção de painéis aglomerados empregando seringueira, teca e poliuretano derivado de óleo de mamona. *Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, (57), 86-97.

Goh, K. L., Thomas, S., De Silva, R. T., & Aswathi, M. K. (Eds.). (2019). Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites: Current Perspectives on Polymer, Ceramic, Metal and Extracellular Matrices.

Protzek, G. R., Magalhães, W. L. E., Bittencourt, P. R. S., Claro, S., Villanova, R. L., & Azevedo, E. C. (2019). The influence of fiber size on the behavior of the araucaria pine nutshell/PU composite. *Polímeros*, 29.

Pereira, N. R. L., Anjos, F. E., & Magnago, R. F. (2019). Resíduos lignocelulósicos da bananicultura: uma revisão sobre os processos químicos de extração da celulose. *Revista Virtual de Química*, 11(4), 1165-1179.

- Petrenchen, G. P., Arduin, M., & Ambrósio, J. D. (2019). Morphological characterization of Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) fruit pericarp. *Journal of Renewable Materials*, 7(7), 683.
- Ilangovan, M., Guna, V., Prajwal, B., Jiang, Q., Reddy, N., (2020). Extração e caracterização de fibras naturais de celulose de *Kigelia africana*. *Carboidrato. Polim.* 236, 115996 <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.115996>.
- Misse, SE, Brillard, A., Mayandyshev, P., Brilhac, JF, Obonou, M., (2022). Comparativo pirólise, combustão e modelagem cinética de doze biomassas lenhosas dos Camarões. *Conversas de biomassa. Biorefin* 12, 3161–3181. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00808-9>.
- Mathias, S. L., de Assumpção Pereira-da-Silva, M., de Almeida Lucas, A., & de Menezes, A. J. (2022). Potential application of cellulose nanocrystals obtained from cultivated fibers in Amazon Forest. *Industrial Crops and Products*, 187, 115426.
- Melo, PS, Selani, MM, Gonçalves, RH, Paulino, J. de O., Massarioli, AP, & Alencar, SM de. (2021). Sementes de açaí: Resíduo agroindustrial inexplorado como potencial fonte de lipídios, fibras e compostos fenólicos antioxidantes. *Culturas e produtos industriais*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113204>
- Mansor, M. R., Mastura, M. T., Sapuan, S. M., & Zainudin, A. Z. (2019) The environmental impact of natural fiber composites through life cycle assessment analysis. Woodhead Publishing: Series in Composites Science and Engineering, p. 257-285.
- Mishra, RK, Mohanty, K. (2018). Cinética de pirólise e comportamento térmico de resíduos biomassa de serragem utilizando análise termogravimétrica. *Biorrecurso. Tecnologia.* 251, 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.029>.
- Manfio, D. Rodrigues, M. N., Savi, G. D., Scussel, V. M. (2012) Brazil Nut (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) Selenium Distribution and Physical Chemical Characteristics of Shell, Brown Skin and Edible Part from Two Amazon Regions. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, v. 2, n. 2, p. 287–293.
- Misra, M., Pandey, J. K., & Mohanty, A. (Eds.). (2015). *Biocomposites: design and mechanical performance*. Woodhead Publishing.
- Machado, C. E. V., da Costa, A. C. A., Cardoso, R. C., de Paula Caetano, F., Lopes, J. A., Cury, A. L., & de Freitas Cabral, R. (2017). Estudo das propriedades mecânicas e térmicas do poliestireno de alto impacto. *Cadernos UniFOA*, 12(35), 15-24.
- Mulinari, D. R. (2015). Avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos de PEBD reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar. *Cadernos UniFOA*, 10 (1 esp), 49-51.
- Nogueira, R. M., Ruffato, S., Carneiro, J. S., Pires, E. M., & Alvares, V. S. (2014). Avaliação da carbonização do ouriço da castanha-do-brasil em forno tipo tambor. *Scientific Electronic Archives*, 6, 7-17.
- Oliveira L. B., de Souza Coelho, C. C., das Graças, A., & Freitas-Silva. (2021). O. Non-timber Amazonian Forest products and their valuable edible nuts: Cutia nut, Egg nut, Sapucaia nut and Brazil nut. *Journal of Agricultural Studies*, v. 9, n. 1, p. 286-302.

ONU, Organização das nações unidas (2015). Assembleia Geral das Nações Unidas, Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), Rio de Janeiro.

Ribeiro, F. D., Saraiva-Bonatto, E. C., de Melo Moura, R. P., Moura, M. A. S., & Saraiva, M. D. G. G. (2020). Caracterização do resíduo agrícola da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* HBK). *Terceira Margem Amazônia*, 6(15), 61-73.

Rebello, V., Silva, Y. D., Ferreira, S., Toledo, R., & Giacón, V. (2019). Effects of mercerization in the chemical and morphological properties of amazon piassava. *Polímeros*, 29.

Silva, J. R. S. D., Fonseca, J. C. P., Santos, T. D. S., Oliveira, J. B. D., Maquiné, T. M., Freitas, B. M. D., ... & Macedo Neto, J. C. D. (2023). Polymer composite produced with Brazil nut residues and high impact polystyrene. *Polímeros*, 32.

Souza, C. D. R., & da Silva, K. D. C. (2021). Potencial energético dos resíduos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* HBK) para produção de carvão ativado. *Research, Society and Development*, 10(2), e53310212698-e53310212698.

Setswalo, K., Oladijo, OP, Namoshe, M., Siengchin, S., Sanjay, MR. (2023). Insights sobre os efeitos do tratamento alcalino e da duração da imersão nas propriedades das fibras da madeira de *pterocarpus angolensis* (mukwa). *Matéria. Hoje Proc.* 77, 1132–1136. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.239>

Tarrés, Q., Espinosa, E., Domínguez-Robles, J., Rodríguez, A., Mutjé, P., & Delgado-Aguilar, M. (2017). The suitability of banana leaf residue as raw material to produce high lignin content micro/nano fibers: From residue to value-added products. *Industrial Crops and Products*, 99, 27-33.

Taylor, A. M., Brooks, J. R., Lachenbruch, B., & Morrell, J. J. (2007). Radial patterns of carbon isotopes in the xylem extractives and cellulose of Douglas-fir. *Tree physiology*, 27(6), 921-927.

TAPPI. Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. Test Methods T 203 cm-99. Atlanta: 68 Technical Association of the Pulp and Paper Industry, [s.l.], 1999.

TAPPI. T 222 om-02. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. TAPPI test methods, [s.l.], 2006. ISBN: 1384-6574, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2006.08.008.

Wahab, R., Mustafa, M. T., Sudin, M., Mohamed, A., Rahman, S., Samsi, H. W., & Khalid, I. (2013). Extractives, holocellulose, α -cellulose, lignin, and ash contents in cultivated tropical bamboo *Gigantochloa brang*, *G. levis*, *G. scortechinii* and *G. wrayi*. *Current Research Journal of Biological Sciences*, 5(6), 266-272.

Vassilev, SV, Vassilev, CG e Petrova, NL (2022). Comportamento térmico de cinzas de biomassa no ar e em atmosfera inerte no que diz respeito à sua descarbonatação. *Combustível*, 314, 122766.

Verma, D., & Goh, K. L. (2021). Effect of mercerization/alkali surface treatment of natural fibres and their utilization in polymer composites: Mechanical and morphological studies. *Journal of Composites Science*, 5(7), 175.

CAPÍTULO III

Propriedades Físicas e Mecânicas de biocompósito Polimérico Reforçado com Fibra de casca de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) e resina poliuretana

Physical and Mechanical Properties of a Polymeric Biocomposite Reinforced with Brazil Nut Bark Fiber (*Bertholletia excelsa*) and Polyurethane Resin

Revista: Engevista

Aceito:

Doi:

RESUMO

As fibras lignocelulósicas e seus constituintes têm despertado interesse como alternativa de matéria-prima na produção de compósitos poliméricos, representando uma oportunidade de agregar valor econômico a resíduos industriais e ao desenvolvimento tecnológico sustentável. O objetivo desse trabalho foi analisar a influência dos processos de mercerização e branqueamento em casca de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) nas propriedades físicas, mecânicas, morfológicas de painéis à base de resina poliuretano (PU) produzidos a partir do processo de termoformagem. A qualidade dos compósitos produzidos a partir das fibras *in natura* e tratadas da casca de castanha-do-Brasil foi avaliada com base nas orientações do documento normativo NBR 14810:2 e EN 312, com ensaios de umidade, inchamento(24h), densidade, de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e resistência a flexão estática. Com os resultados obtidos, foi possível verificar que os processos de mercerização e branqueamento modificaram quimicamente a interface fibra/ matriz e melhorou a resistência do compósito. A resina PU mostrou-se eficiente como aglomerante, indicando a obtenção de painéis mais resistente e menor umidade. Os compósitos com fibras tratadas mostraram melhorias significativas na resistência à flexão e no módulo de ruptura. As propriedades analisadas atestaram o potencial dessas fibras para aplicação como reforço em matrizes

poliméricas, garantindo assim a viabilidade desses compósitos para aplicações estruturais em condições variadas.

Palavras-chave: Amazônia, Ambiental, Compósito, Polímero vegetal.

ABSTRACT

Lignocellulosic fibers and their constituents have aroused interest as an alternative raw material in the production of polymer composites, representing an opportunity to add economic value to industrial waste and sustainable technological development. The objective of this work was to analyze the influence of mercerization and bleaching processes on Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) shells on the physical, mechanical and morphological properties of panels based on polyurethane resin (PU) produced from the thermoforming process. The quality of the composites produced from fresh and treated Brazil nut shell fibers was evaluated based on the guidelines of the normative document NBR 14810:2 and EN 312, with tests for humidity, swelling (24h), density, scanning electron microscopy (SEM) analysis and static flexural strength. With the results obtained, it was possible to verify that the mercerization and bleaching processes chemically modified the fiber/matrix interface and improved the strength of the composite. The PU resin proved to be efficient as a binder, indicating the obtaining of a more resistant panel and lower humidity. Composites with treated fibers showed significant improvements in flexural strength and modulus of rupture. The properties analyzed attest to the potential of these fibers for application as reinforcement in polymer matrices, thus ensuring the viability of these composites for structural applications in varied conditions.

Keywords: Amazon, Environmental, Composite, Vegetable polymer.

1 INTRODUÇÃO

Os termos “sustentáveis” e “sustentabilidade” passaram a ser adotado de forma global com as questões de mudanças climáticas e a busca por soluções a partir de novos materiais biodegradáveis, que pudessem suprir as necessidades de grandes setores da indústria, entre eles o da construção civil. A preocupação com o ambiente é o interesse maior, sendo que pesquisas vêm sendo fomentadas e direcionadas para materiais provenientes de fontes renováveis, que venham substituir parcial ou integral os derivados de petróleo, com isso, agregar valor à nova matéria-prima e garantir a preservação (CUNHA et al., 2021). Nesse sentido, o uso de fibras vegetais é proveniente de fontes renováveis e biodegradáveis, e tendo como alternativa sustentável para materiais sintéticos, como as fibras tradicionais de vidro e carbono, utilizadas ainda nas indústrias desde a década de 1950. De acordo com Singh; Kumar; Naik (2021) nas últimas décadas, os compósitos à base de fibras naturais surgiram como um material essencial

para diferentes aplicações industriais, como materiais estruturais, não estruturais, fabricação de papel, embalagens, têxteis e automotivos. Sendo assim, as fibras naturais visam ter benefício em relação as fibras sintéticas, tais como baixa densidade, baixo custo de produção sendo um dos essenciais, resistência específica e módulo de elasticidade, além de serem não abrasivas e atóxicas (LABIB, 2022; MOUSAVI et al., 2022). Os materiais fabricados com fibras naturais têm como procedimento o ecologicamente correto, por ser biodegradável e sustentável ao meio ambiente. As fibras vegetais podem ser incluídas em matrizes para criar materiais de alto desempenho com melhores propriedades mecânicas como resistência e tenacidade. Com essas qualidades, o que distingue as fibras vegetais é sua importância como materiais de reforço para compósitos, principalmente como matrizes poliméricas (FRANCO et al., 2019; NETO et al., 2022). O Brasil é um país rico em recursos renováveis, com variedade de fibras naturais com destaque para a fibra da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*), em que a casca é um resíduo gerado no beneficiamento, que é destinado para geração de calor ou não possuem uma destinação adequada no ambiente. Com base em dados divulgados pelo instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) em 2022 o Brasil produziu 38,169 mil toneladas de castanha-do-Brasil, sendo assim o segundo maior produtor de castanha. Em destaque está o estado do Amazonas, sendo responsável por 14,308 mil toneladas. Considerando que 2,4kg aproximadamente é o valor do fruto (ouriço) e cerca de 1/3 é destinado as sementes, conseqüentemente cada fruto pode gerar cerca de 1,9kg de resíduos que são destinados ao meio ambiente, sendo que esses resíduos podem ser reaproveitados de diversas formas (SOUZA; SILVA, 2021). Uma das formas de agregar valor ao subproduto da castanha-do-Brasil como resultado do beneficiamento, é o uso de sua biomassa lignocelulósica para construção de compósitos. No entanto para obter um material de qualidade e sustentável, as fibras devem agir em conjunto de forma eficiente com a matriz polimérica. O comportamento hidrofílico dessas fibras lignocelulósicas compromete a aderência entre a matriz/reforço, resultando em ligações fracas na interface, bem como propriedades mecânicas pobres (GIACON, 2021). Deste modo, faz se necessário trabalhar quimicamente nas superfícies das fibras, com métodos, como o tratamento alcalino de NaOH, em que são utilizados procedimentos de mercerização (MULINARI, 2015; VERMA e GOH, 2021). Assim sendo, o resultado é um produto melhorado, com características sustentáveis e possibilidades competitivas para com as matérias-primas sintéticas industriais, vindas de origens não renováveis, assim, causando malefício ao meio ambiente (REBELO, 2019). Diante do desafio de aumentar a aplicação das fibras naturais e dos polímeros biodegradáveis em relação a competitividade com as fibras sintéticas, o principal objetivo desta pesquisa foi analisar a fibra *in natura* e após o processo de

mercerização e branqueamento na casca da castanha-do-Brasil, nas propriedades físicas, morfológicas e mecânicas de compósitos poliméricos.

2. Materiais e Métodos

2.1 Obtenção das fibras e reagentes utilizados

As cascas de castanha-do-Brasil utilizadas como carga para os compósitos foram fornecidas por uma usina do estado do Amazonas-Brasil. As cascas foram higienizadas manualmente em água corrente conforme sugere Petrechen et al. (2019) para separação de eventuais resíduos de amêndoas e outras partículas residuais. Essa fase teve como importância a separação dos materiais com possível degradação visível e consequente o processo de trituração. Os reagentes utilizados (Hidróxido de sódio e Peróxido de hidrogênio) foram adquiridos da Sigma Aldrich, Dinâmica.

2.2 Mercerização

A mercerização nas fibras da casca de castanha-do-Brasil utilizando hidróxido de sódio (NaOH) foi realizado conforme método adotado e adaptado de Giacon (2021), objetivando remover parcialmente a lignina, hemicelulose e outros resíduos, esse processo têm como finalidade melhorar a adesão entre matriz/fibra. Foram adicionadas a solução de NaOH a 5% na proporção de 200 g de fibras para 500 ml de solução por 4h em agitação constante. O excesso de NaOH foi removido com água (reuso) até que o pH das lavagens atingissem a neutralidade. Posteriormente, as fibras foram secas em estufa convencional a 55 °C por 24 horas para retirada de umidade.

2.3 Branqueamento

O processo de branqueamento foi realizado a partir da adição em um bécher 500 ml de NaOH 5% e 500 ml de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) para cada 200 gramas de fibras mercerizadas por 1h. Seguidamente, as misturas foram lavadas em água corrente (reuso) até pH neutro. O processo se repetiu por mais duas fases contabilizando assim, 3h de processos. Em seguida as fibras foram lavadas com água em abundância e secas em estufa convencional a 55°C durante 24 horas. Com relação ao processo de branqueamento utilizado por essa fibra não fora encontrado relatos na literatura científica para uso de reforço em compósitos, sendo utilizados mais em sua forma *in natura*. Foi usado como matriz a resina poliuretana (PU) à base de óleo de mamona (*Ricinus communis*), pois tem o potencial sustentável de recursos renováveis, conforme sugerido na literatura.

2.4 Produção dos compósitos

Foram produzidos seis tipos de compósitos, utilizando fibras de casca de castanha-do-Brasil, conforme descreve a tabela 1, segundo a metodologia adotada por Chatterjee, Kumar e Singh (2020) com prensagem à quente. Tendo em vista o volume e a densidade nominal, determinou-se a massa $\pm 650,00$ g para cada painel.

Tabela 1. Parâmetros dos tratamentos com %Resina (PU), NaOH, NaOH e H₂O₂ para o desenvolvimento dos compósitos de casca de castanha-do-Brasil

Compósito	%Resina (PU)	Tratamento com NaOH	Tratamento com NaOH e H ₂ O ₂
LST20	20	-	-
LST25	25	-	-
MCT20	20	NaOH 5%	-
MCT25	25	NaOH 5%	-
BCT20	20	NaOH 5%	NaOH 5% e H ₂ O ₂ 10%
BCT25	25	NaOH 5%	NaOH 2% e H ₂ O ₂ 5%

LST (fibras não tratadas), MCT (fibras mercerizadas tratadas), BCT (fibras branqueadas tratadas); os compósitos rotulados com os números 20 e 25 representam 20% e 25% em massa, respectivamente.

A resina PU foi adicionada em 650,00 g de fibra de casca na proporção de 1:1,5 de resina, sendo colocado gradativamente enquanto foi homogeneizado manualmente com auxílio de luvas o componente A e depois o B, por 20min. O material resultante foi inserido em um molde de madeira (28×28×1) cm e submetido a 10 MPa em prensa hidráulica (Modelo PHH 11007, Hidral-Mac®) a 100 °C por 10 min. A Figura 1 mostra os compósitos desenvolvidos com base em fibra da casca de castanha-do-Brasil e resina (PU).

Figura 1 – Compósitos com fibras tratadas e não tratadas da casca de castanha-do-Brasil



1.a compósito aprimorado de fibra de casca de castanha-do-Brasil (fibra sem tratamento).



1.b compósito aprimorado de casca de castanha-do-Brasil (fibra com tratamento).

2.4 Ensaios

2.4.1 Determinação de umidade: o teor de umidade foi analisado segundo a norma NBR 14810-2:2018. os corpos de provas foram pesados individualmente, em balança analítica com resolução de 0,01 g e anotados os dados da massa úmida. em seguida as amostras foram inseridas em estufa a 103°C por 6 horas e colocado em um dissecador para o resfriamento. após o resfriamento foram pesados individualmente para retirar o peso da massa seca. os resultados foram calculados através da seguinte equação (equação (1)):

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{\text{MU} - \text{MS}}{\text{MS}}$$

2.4.2 Densidade: Para o ensaio de densidade, as medições em espessura foram realizadas segundo a Norma Brasileira NBR 14810-2(2018). Utilizou-se 10 corpos para cada compósitos com dimensões de (5,0×5,0×1,0) cm³. Foram aferidas a massa dos corpos de prova através de uma balança analítica. Em seguida, foram medidas a espessura, utilizando um micrômetro, o comprimento e a largura com um paquímetro digital. Para obtenção dos resultados foi utilizado a (equação (2)):

$$\text{Densidade (\%)} = \frac{\text{Massa (m)}}{\text{Volume (V)}}$$

2.4.3 Inchamento em espessura 24h: os ensaios obedeceram a norma NBR 14810-2 (2018). Para definir o inchamento após 24h, 10 corpos de prova com dimensões de (5,0×5,0×1,0) cm³ foram medidos a espessura no ponto de intersecção das diagonais com auxílio de um micrômetro. As amostras foram submersas em uma Bandeja de poliestireno com água destilada. Após 24 horas de imersão, os corpos de prova foram retirados do recipiente e medidos novamente e anotados os respectivos resultados. Para obtenção dos resultados foi utilizado a (equação (3)):

$$\text{Inchamento em espessura (\%)} = \frac{\text{E1-E0}}{\text{E0}}$$

2.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV: para análise morfológica a partir do MEV foram realizados em equipamento Jeol JSM IT500-HR, com tensão de 5kV a 25 °C. As amostras fraturadas foram colocadas em uma fita de carbono e recuperadas com uma fina

camada de ouro antes da análise, tendo como finalidade observar melhor as estruturas analisadas. O objetivo dessa análise foi avaliar a interação entre carga e reforço.

2.5 Determinação da resistência à flexão estática: O ensaio mecânico de flexão em três pontos foi realizado através da máquina universal de ensaios, modelo AME-5KN. Utilizou-se corpos de prova com dimensões 28 x 28 x 1 cm, para avaliar a influência do reforço/matriz no compósito desenvolvido com partículas sem tratamentos mercerizado e do processo de branqueamento nas propriedades mecânicas dos compósitos desenvolvidos. A partir do ensaio de flexão estática pode-se obter os resultados para o módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE).

2.6 Análise Estatística: Os resultados foram analisados por meio de estatística descritiva, através de Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey a 5% de significância. Para análise dos dados foi utilizado o programa com o software Sisvar, versão 5.6, segundo as recomendações de Ferreira (2014).

3. Resultados e discussão

3.1 Propriedades físicas dos painéis

A Tabela 1, lista os resultados das análises físicas dos compósitos com médias e desvios padrão em relação aos valores de referências para os ensaios, adotados de acordo com a norma NBR 14810-2 (2018). Com valores da densidade entre 601 kg/m³ a 755 kg/m³ os painéis têm características de densidade média, segundo a norma. Os tratamentos químicos tiveram influência diretamente nesta propriedade para os painéis, sendo que o compósito MCT25 (com fibras tratadas) com solução de NaOH a (5%) e 25% de resina apresentou maior valor de densidade, isso se dá devido a maior exposição de rugosidade e compactação das fibras, conforme relata Sulaiman et al. (2023).

O teor de umidade nos compósitos de casca de castanha-do-Brasil com tratamento químico (Tabela 1) apresentaram resultados próximos, de 5-5,92%, com exceção dos painéis do material *in natura* que apresentaram teor de umidade de 8 e 12%. Isso demonstra que, com a porcentagem menor do adesivo nas composições dos compósitos, existem uma disposição para aumentar o teor de umidade. Como pode ser observado, os painéis com maiores porcentagem de resina obtiveram menores valores destas propriedades. Compartilhando com os resultados de Lopez et al. (2020), assim como os de Gilio, (2020) que obteve valores de 10% e 12% para

painéis de seringueira e Teca, materiais utilizados em biocompósitos, portanto condiz com as normas que tem como critérios está entre 5% e 13%.

Tabela 2: Valores médios de densidade (kg/m^3), teor de umidade (%) e inchamento em espessura (%) dos compósitos desenvolvidos.

Compósito	Resina (PU)%	Densidade (kg/m^3)	Teor de Umidade (%)	Inchamento de espessura (%) 24h
LST20	20	601±8a	12±1,4 a	18±5 a
LST25	25	638±7a	8±1,1b	15±3 d
MCT20	20	733±4b	5,92±0,45c	7±2 b
MCT25	25	765±9b	5,81±0,5c	7±1 b
BCT20	20	668±11c	5,97±0,25d	9±3 c
BCT25	25	694±6c	5,88±0,1d	9±4 c

Médias seguidas da mesma letra não apresentam variação significativa para análise ANOVA ($p < 0,05$).

O inchamento em 24h (Tabela 2) dos compósitos tanto para fibra *in natura* e tratada quimicamente da casca de castanha-do-Brasil foi satisfatório, pois apresentaram valores conforme estabelecido na norma NBR 14810-2 (2018) e da norma europeia EN 312 (2013) para painéis do tipo P2, P3 e P4 (Painéis estruturais para uso em condições secas e úmidas). No entanto, os melhores desempenhos foram para as fibras tratadas. Pela análise estatística de variância ANOVA foi possível verificar que os compósitos apresentam diferença significativa entre si, uma vez que a adição de resina em maior porcentagem na fibra tratada aperfeiçoou a resistência ao inchamento dos painéis, pois verificou-se inclusive no tratamento com 25% de resina. Valores semelhantes foram dispostos por Silva (2022) que caracterizou compósitos produzidos com resíduos de açaí e encontrou média próximos aos relatados neste presente trabalho.

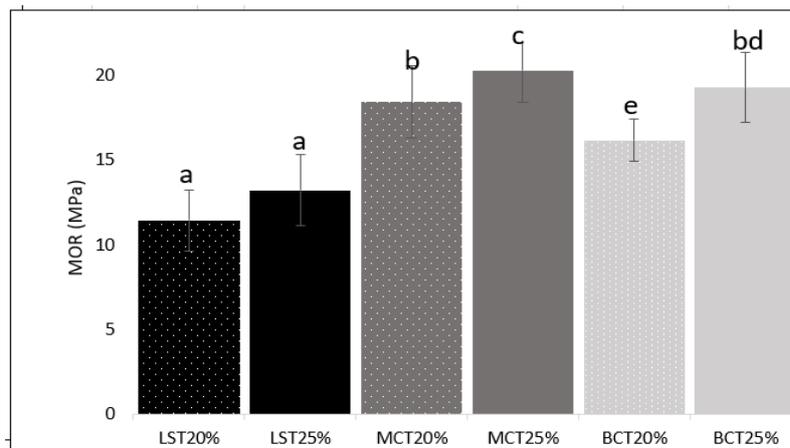
3.2 Avaliação das propriedades mecânicas dos painéis

Os resultados das propriedades mecânicas obtidas com ensaios de resistência à flexão para os painéis com fibra *in natura* e para os painéis com fibra tratada com cascas de castanha-do-Brasil e Resina PU são mostrados nas Tabela 3.

Com base nos valores médios obtidos da resistência à flexão estática dos compósitos fabricados com 20% e 25% de resina PU, constata-se que os valores estão conforme exigidos segundo as normas, NBR 14810-2 (2018) e EN 312 (2013) e recomenda um valor mínimo de 11 N/mm^2 . Sendo assim, classificados como painéis do tipo P2, P3 e P4 (Painéis estruturais para uso em condições secas e úmidas).

Os resultados do módulo de ruptura (MOR) que estão apresentados na tabela 3 e para melhor representação estes valores são apresentados no gráfico de barras na figura 2, foi possível verificar que para todos os valores obtidos houve diferença significativa entre a fibra *in natura* e as fibras tratadas, no entanto os melhores resultados estão na fibra mercerizada com 20 e 25% (18 – 19 MPa) e em seguida a branqueada.

Figura 2 – Resultados do módulo de ruptura (MOR) na flexão estática dos painéis fabricados com base nos três tratamentos experimentais.



Considerando que as fibras ao receber tratamento químico obtiveram um melhoramento significativo em relação as fibras *in natura*, indicando assim, que os tratamentos recebidos pelas fibras melhoraram as propriedades mecânicas dessas fibras.

Tabela 3. Valores médios de Módulo de Elasticidade (MPa), Módulo de Ruptura (MPa) dos compósitos desenvolvidos

Compósito	Resina (PU) %	Módulo de ruptura (MOR) (N/mm ²)	Módulo de Elasticidade (MOE) (N/mm ²)
LST20	20	11±3	1689
LST25	25	13±5	1722
MCT20	20	18±6	1980
MCT25	25	20±4	2312±11
BCT20	20	16±2	1891
BCT25	25	19±2	2105

Além disso, os resultados das propriedades mecânicas para o módulo de elasticidade (MOE) na tabela 3 estão de acordo com as exigências da norma NBR 14810-2 (2018). Contudo, observou-se menores valores, mesmo nas fibras tratadas demonstrando uma menor disponibilidade principalmente nas concentrações de resina com 20%. Logo, os painéis obtidos para módulos de flexão de resistência, estão satisfatórios e confirmando a influência do tratamento químico

utilizado nas propriedades das fibras, uma vez que os menores valores de MOE, pode ser devido as características intrínsecas que ocorre na resina PU. Ao analisar os resultados encontrados por Lopez et al. (2020) em que obteve valores, entre 9.00 MPa e 31.00 MPa, para madeira em melhores porcentagens de polipropileno. Silva et al. (2022) tiveram bons resultados mecânicos com os resíduos da castanha, tendo como matriz o poliestireno que é derivado de termoplástico. Nogueira et al. (2018), obteve excelentes resultados mecânicos ao trabalhar com o ouriço da castanha e resina PU em diferentes concentrações.

3.3 Avaliação da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias do MEV, representado nas figuras 3, 4 e 5 para a região interna dos compósitos com fibras da casca de castanha-do-Brasil *in natura*, mercerizadas e branqueadas em uma escala de 500 μm , foram registradas após o ensaio de flexão. Foram observadas a partir da análise das micrografias que o compósito de fibras não tratadas não obteve uma alta adesão entre a fibra e matriz, conforme mostra na Figura 3.

Há macro e micro vazios, com pouco homogeneidade e recobrimento diretamente com a matriz, isso é comprovado a partir dos resultados do inchamento por 24h, pois com pouca compactação a tendência é ter maiores vazios e por consequência um maior volume de água aderido no interior desses compósitos. Corroborando com esse resultado, Aparício (2023) destaca que esses vazios influenciam diretamente na estrutura do compósito, deixando assim as fibras expostas, com isso maior peso e espessura. Outro fator que tem como ocorrência em fibras não tratadas é o acúmulo de ceras que existem nas superfícies das fibras naturais e os teores de extrativos (GOH, et al., 2019).

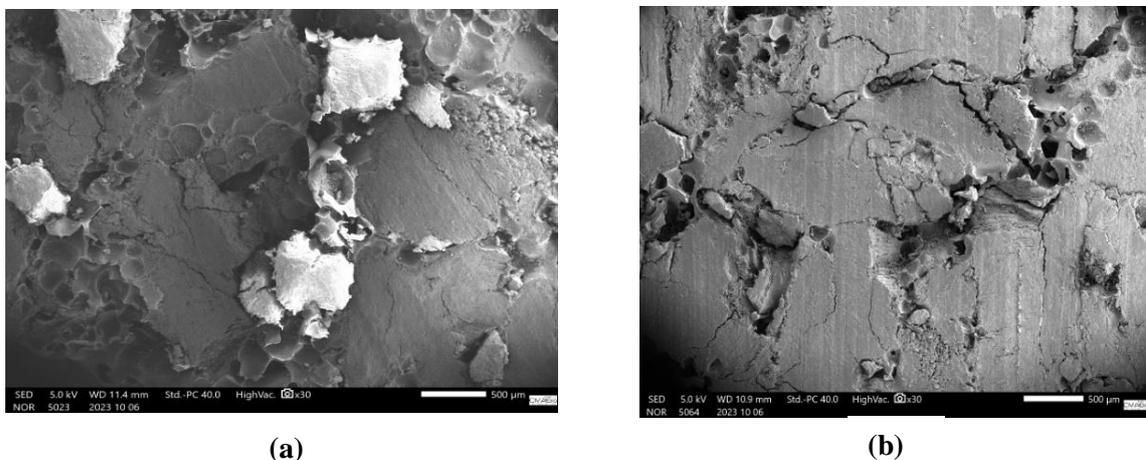


Figura 3. Micrografias do MEV dos compósitos LST20 e LST25 da região interna dos compósitos; (a) LST20 e (b) LST25

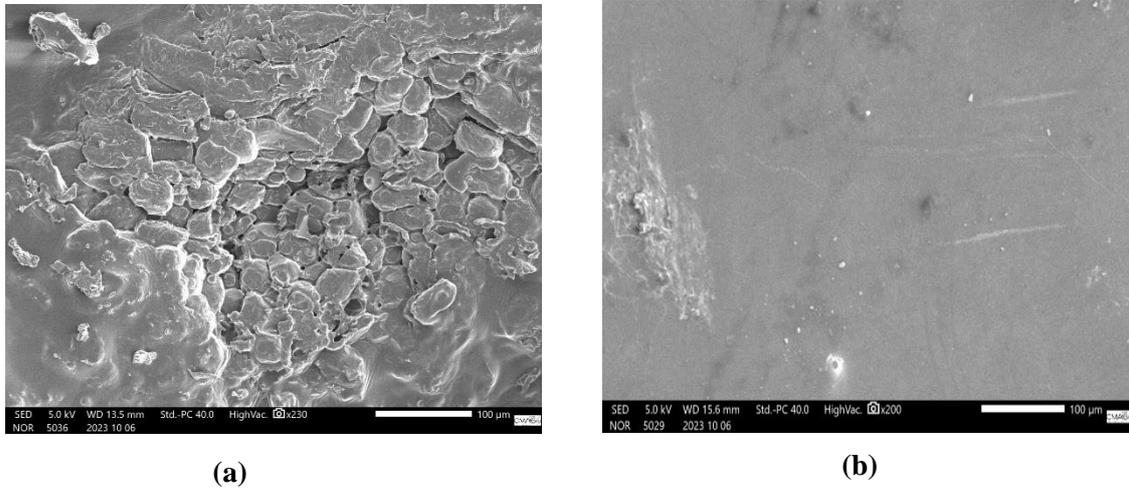


Figura 5. Micrografias do MEV dos compósitos BCT20 E BCT25 região interna dos compósitos; (a) BCT20 e (b) BCT25

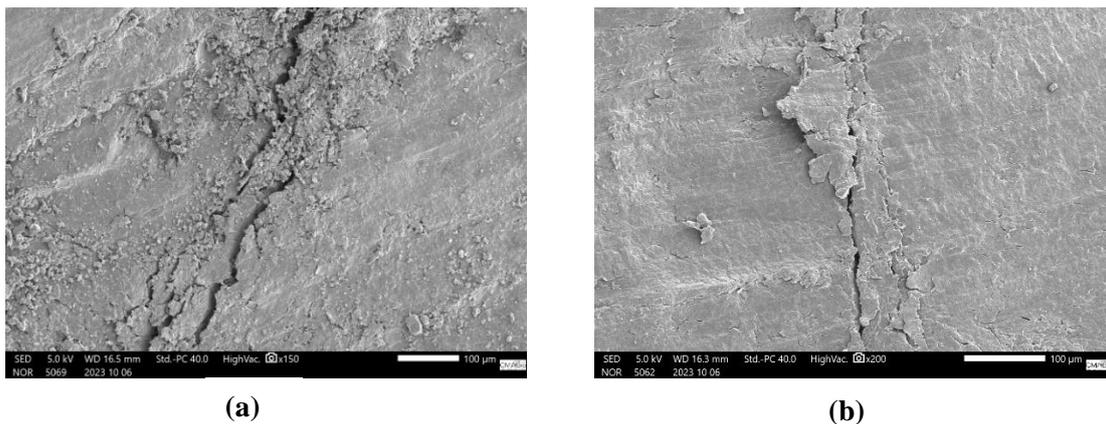


Figura 4. Micrografias do MEV dos compósitos MCT20 E MCT25 região interna dos compósitos; (a) MCT20 e (b) MCT25

As figuras 4 e 5 mostram as micrografias do MEV dos compósitos com as fibras da casca de castanha-do-Brasil tratadas com as soluções de NaOH a 5% e com NaOH 5% e H₂O₂ respectivamente. Foi possível verificar algumas fissuras, mas sugere-se que seja no local onde ocorreu o procedimento mecânico de flexão. Em relação à superfície dos compósitos foi possível verificar a agregação das fibras, conseqüentemente, ocorreu maior compactação e aderência desses compósitos. Foi observado também uma melhora em relação a interface matriz/fibra, sendo este um dos fatores importantes para o desempenho mecânico e físico desses compósitos observado essa melhora, principalmente nos painéis com maior porcentagem de resina, pois quanto maior for o fator resina em relação a porcentagem de fibra, melhor o

desempenho mecânico e físico, os compósitos irão realizar. Os painéis de casca de castanha apresentaram características semelhantes de Soares et al. (2023), obtiveram resultados morfológicos satisfatórios, evidenciando assim, que o tratamento superficial foi promissor e houve boa adesão entre fibra/matriz.

As imagens obtida pelo MEV demonstram que as fibras que foram tratadas com os elementos NaOH, NaOH e H₂O₂ promoveu uma melhora significativa na ligação interfacial entre a fibra/matriz, isso se dá devido a retirada parcial ou total dos componentes como: ceras, óleos e outros que ficam na superfície das fibras de forma natural, no entanto como afirma Senthikumar et al. (2019) esses componentes podem interferir negativamente entre o reforço e a fibra, pois tende a ocorrer deslocamento entre elas e não ter uma resistência melhorada morfológica, mecânica e físico.

Já os compósitos com fibra tratada têm uma melhor aderência em relação a fibra não tratada, alguns trabalhos comprovaram o mesmo aperfeiçoamento após o processo de mercerização, sendo que trabalhos com processo de branqueamento das fibras são poucos ainda na literatura. No entanto, esses compósitos obtêm melhores propriedades ao comparar com as não tratadas (NERY, ROCHA e JOSÉ, 2018).

4. Conclusão

Com base nos resultados aqui fornecidos sobre o tratamento químico alcalino com as soluções NaOH e NaOH/H₂O₂ nas fibras lignocelulósicas da casca de castanha-do-Brasil e as concentrações de resina PU contribuíram de forma significativa nas propriedades dos compósitos. Houve influência direta na densidade, inchamento dos painéis, onde a exposição das fibras a esses tratamentos resultou em maior compactação e rugosidade, impactando positivamente na densidade dos compósitos. Além disso, a redução do teor de umidade foi observada nos compósitos com maiores porcentagens de resina, indicando uma relação inversa entre a quantidade de adesivo e o teor de umidade. No que diz respeito às propriedades mecânicas e morfológicas, o tratamento químico teve um impacto considerável na adesão entre matriz e fibra. Os compósitos com fibras tratadas mostraram melhorias significativas na resistência à flexão e no módulo de ruptura, com valores que atenderam ou excederam os requisitos das normas aplicáveis. Esses resultados indicam uma clara melhoria nas propriedades mecânicas dos compósitos quando comparados às fibras não tratadas, enfatizando a importância dos tratamentos químicos na qualidade final dos painéis. Portanto, pode-se concluir que os

tratamentos químicos realizados nas fibras lignocelulósicas da casca de castanha-do-Brasil desempenharam um papel fundamental no aprimoramento das propriedades físicas, como densidade e umidade, bem como nas propriedades mecânicas, incluindo resistência à flexão e módulo de ruptura, garantindo assim a viabilidade desses compósitos para aplicações estruturais em condições variadas.

Referências

Aparício, R. R., Santos, M. G., & Giaccon, V. M. (2023). Performance of castor oil polyurethane resin in composite with the piassava fibers residue from the Amazon, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3203755/v1>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-1: Painéis de partículas de média densidade - Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-2: Painéis de partículas de média densidade - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018b.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM D7984-16: Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2016

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS). Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

Cunha, J.D.S.C, Nascimento, LFC, da Luz, FS, Monteiro, SN, Lemos, MF, da Silva, CG, & Simonassi, NT (2021). Caracterização Física e Mecânica de Compósitos de Matriz Epóxi Incorporados em Videira Titica (Heteropsis flexuosa). *Polímeros*, 13 (23), 4079.

Chatterjee, A., Kumar, S., & Singh, H. (2020). Tensile strength and thermal behavior of jute fibre reinforced polypropylene laminate composite. *Composites Communications*, 22, 100483.

FRANCO, P. C. I., FARIA, M. L., & BILICK, A. (2019). Preparo e caracterização de filmes biodegradáveis reforçados com fibras de cana-de-açúcar. *FRANCO, Paula. Estudos Interdisciplinares nas Ciências Exatas e da Terra e Engenharias. Ponta Grossa, PR: Atena Editora.*

Ferreira, D. F. (2014). Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e agrotecnologia*, 38, 109-112.

Giaccon, V. M., Rebelo, V. S. M., dos Santos, G. M., Sanches, E. A., Fiorelli, J., dos Santos Costella, Â. M., ... & Brito, L. M. A. F. (2021). Influence of mercerization on the physical and mechanical properties of polymeric composites reinforced with Amazonian fiber. *Fibers and Polymers*, 22(7), 1950-1956.

Goh, K. L., Thomas, S., De Silva, R. T., & Aswathi, M. K. (Eds.). (2019). Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites: Current Perspectives on Polymer, Ceramic, Metal and Extracellular Matrices.

Labib, W. A. (2022). Plant-based fibres in cement composites: A conceptual framework. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 17, 15589250221078922.

Lopez, Y. M., Paes, J. B., Gustave, D., Gonçalves, F. G., Méndez, F. C., & Nantet, A. C. T. (2020). Production of wood-plastic composites using cedrela odorata sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products-A sustainable approach for cleaner production in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118723. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118723>

Mulinari, D. R. (2015). Avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos de PEBD reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar. *Cadernos UniFOA*, 10(1 esp), 49-51.

Mousavi, S. R., Zamani, M. H., Estaji, S., Tayouri, M. I., Arjmand, M., Jafari, S. H., ... & Khonakdar, H. A. (2022). Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: a review of recent case studies. *Journal of Materials Science*, 57(5), 3143-3167.

Neto, S., V. U., del Pino, G. G., dos Santos Setubal, C. H., Bezazi, A., Rodrigues, S. G. A., Kieling, A. C., ... & Torres, A. R. (2022). Desenvolvimento de compósitos de resina epóxi com fibra vegetal de curauá sem tratamento químico: Development of epoxy resin composites with curauá vegetable fiber without chemical treatment. *Latin American Journal of Development*, 4(2), 343-357.

Nogueira, I. M. D. S., Lahr, F. A. R., & Giacón, V. M. (2018). Desenvolvimento e caracterização de painéis de partículas aglomeradas utilizando o resíduo do ouriço da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) e resina poliuretana derivada do óleo da mamona. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23.

Nery, T. B. R., & José, N. M. (2018). Estudo das Fibras de Bananeira Pré-tratadas e in natura como Possível Matéria-prima para Reforço em Compósitos Poliméricos. *Revista Virtual de Química*, 10(2).

Petrenchen, G. P., Arduin, M., & Ambrósio, J. D. (2019). Morphological characterization of Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) fruit pericarp. *Journal of Renewable Materials*, 7(7), 683.

Rebello, V., Silva, Y. D., Ferreira, S., Toledo, R., & Giacón, V. (2019). Effects of mercerization in the chemical and morphological properties of amazon piassava. *Polímeros*, 29.

Sulaiman, M., Rabbani, F. A., Iqbal, T., Kazmi, M. A., Yasin, S., Mujtaba, M. A., ... & Almomani, F. (2023). Impact of eco-friendly chemical pretreatment on physicochemical and surface mechanical properties of sustainable lignocellulosic agricultural waste. *Algal Research*, 71, 103051. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103051>.

Soares, C., Moura, E., Arenhardt, V., Deliza, E. E. V., & de São Pedro Filho, F. (2023). Biotechnology management in the Amazon and the production of polypropylene/Brazil Nutshell fiber biocomposite. *Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)*, 14(7), 10734-10748.

Silva, J. R. S., Fonseca, J. C. P., Santos, T. S., Oliveira, J. B., Maquiné, T. M., Freitas, B. M., Silva, R. N. A., Nascimento, N. R., Costa, J. M., Bello, R. H., & Macedo Neto, J. C. (2022).

Polymer composite produced with Brazil nut residues and high impact polystyrene. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 32(4), e2022038. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20220013>

Silva, C. O., da Silva, F. N., El Banna, W. R., & do Nascimento, W. A. (2022). Uso das fibras do caroço do açaí como fase dispersa em compósitos de matriz termoplástica: uma revisão bibliográfica use of açai lump fibers as dispersed phase in thermoplastic matrix composites: a bibliographic review. *Brazilian Journal of Development*, 8(4), 28654-28679.

Singh, Y., Kumar, J., Naik, T. P., Pabla, B. S., & Singh, I. (2021). Processing and characterization of pineapple fiber reinforced recycled polyethylene composites. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2153-2157.

Souza, C. D. R., & da Silva, K. D. C. (2021). Potencial energético dos resíduos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* HBK) para produção de carvão ativado. *Research, Society and Development*, 10(2), e53310212698-e53310212698.

Senthilkumar, K., Rajini, N., Saba, N., Chandrasekar, M., Jawaid, M., & Siengchin, S. (2019). Effect of alkali treatment on mechanical and morphological properties of pineapple leaf fibre/polyester composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 1191-1201.

Verma, D., & Goh, K. L. (2021). Effect of mercerization/alkali surface treatment of natural fibres and their utilization in polymer composites: Mechanical and morphological studies. *Journal of Composites Science*, 5(7), 175.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou avaliar os efeitos de compósitos produzidos da casca de castanha-do-Brasil e resina à base do óleo de mamona, sendo três matérias: *in natura*, mercerizado e branqueado e duas porcentagens de resina.

Com base nos resultados da caracterização dos ensaios físico-químicos realizados, a mercerização e o branqueamento mostraram eficiência na remoção de componentes como extrativos, lignina e outros, pois a redução da lignina pode melhorar a eficiência da extração de celulose, tornando o material mais propenso a processos de produção, resultando em uma redução significativa desses elementos nas fibras tratadas. Reduzindo ainda no teor de umidade em relação a fibra *in natura*, isso se dá devido a remoção de componentes amorfos da sua superfície, tais como lignina, hemicelulose e materiais orgânicos.

Resultou ainda em aumento relativo nos teores de celulose e holocelulose após os tratamentos, tornando as fibras mais adequadas para várias aplicações. Observou ainda que as análises térmicas mostraram diferentes momentos de degradação, após os processos químicos em relação a fibra *in natura*, já para a análise de fluorescência de raios-X revelou a presença de elementos como potássio, cálcio, sódio, entre outros, que podem ter implicações no uso das fibras para diferentes aplicações, como insumos agrícolas ou materiais compostos, sem trazer danos ao meio ambiente.

A casca de castanha-do-Brasil, especialmente após os tratamentos químicos, apresenta um potencial promissor como fonte alternativa de celulose e para uso em materiais resistentes. Os compósitos são caracterizados como painéis de fibras de média densidade segundo a norma brasileira NBR 15316-2:2019 e norma europeia EN 317:1993.

Dentro dos aspectos relacionados às propriedades mecânicas, físicas e morfológicas, o tratamento químico teve um impacto considerável na adesão entre matriz e fibra. Os compósitos com fibras tratadas e com 25% de resina mostraram melhorias significativas na resistência à flexão e no módulo de ruptura, com valores que atenderam ou excederam os requisitos das normas aplicáveis.

As micrografias do MEV obtidas da superfície dos corpos de prova fraturados dos ensaios de resistência revelaram uma dispersão matriz-reforço, onde foi possível verificar algumas fissuras, mas sugere-se que seja no local onde ocorreu o procedimento mecânico de flexão. Em relação à superfície dos compósitos foi possível verificar a agregação das fibras,

consequentemente, ocorreu maior compactação e aderência desses compósitos com as fibras tratadas. Tais resultados mostraram que o compósito de poliuretano natural pode ser competitivo no mercado, uma vez que, são compatíveis com outras resinas sintéticas já utilizadas na indústria.

Esse estudo como contribuição científica destaca a importância de considerar as alternativas para indústrias de engenharia civil, agrícola, movelaria e outros, já avaliadas em uma perspectiva ambiental. Tem relevância e resume a apresentação de dados primários sobre o processamento da fibra da casca de castanha-do-Brasil, com tratamentos químicos para uso em compósitos, que pode atender às demandas da sociedade por novos subprodutos. Destaca-se que esses produtos têm baixo impacto ambiental e sua produção comercial pode promover uma bioeconomia que gera empregos nas comunidades locais produtoras de castanhas.

Desta forma, os compósitos aglomerados da casca de castanha-do-Brasil e resina à base de óleo de mamona (PU) desenvolvido neste trabalho podem ser relevantes nas áreas: ambiental, econômico e social, por serem obtidos de fontes renováveis, o que os torna de grande importância científica e tecnológica na obtenção de novos materiais para uso na engenharia civil e outros.

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que em pesquisas futuras sejam feitos estudos de uma menor porcentagem de química no tratamento das fibras, com intuito de causar menores impactos no meio ambiente e utilizar o método de tração e biodegradação nos compósitos adquiridos. Sugere-se ainda investigar a viabilidade técnica, ambiental, econômica e social dos compósitos desenvolvido para usos como embalagens de grande porte, com vistas à substituição de produtos de madeira.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Norlailiza; ZAKARIA, Mohd Rafein. Oligosaccharide from hemicellulose. In: **Lignocellulose for future bioeconomy**. Elsevier. p. 135-152. 2019.
- AOAC - Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of analysis**. 20th edition. AOAC International, Gaithersburg, MD, USA. 2016.
- American Society for Testing and Materials. **ASTM D4274 - 16 Standard Test Methods for Testing Polyurethane Raw Materials: Determination of Hydroxyl Numbers of polyols**. (2010)
- ABDUL KHALIL, H. P. S., Bhat, A.H., and Ireana Yusra, A. F. “Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review,” **Carbohydrate Polymers**. 87(2), 963-979. 2012. DOI: 10.1016/j.carbol.2011.08.078.
- AHMAD, N.; ZAKARIA, M. R. **Oligosaccharide from Hemicellulose**. Lignocellulose for Future Bioeconomy. 2019. DOI: 10.1016/b978-0-12-816354-2.00008-6.
- ALAMAR, P. D.; **Caracterização do perfil de fibras em resíduos agroindustriais amazônicos e de sua capacidade de adsorção seletiva**. f. 43-48. Dissertação (mestrado em materiais) – Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. 2012.
- ARGENBIO. **La biotecnología en la fabricación del papel**, nº 97. Disponível em: <http://www.porquebiotecnologia.com.ar/index.php?action=cuaderno&opt=5&tipo=1¬e=97>. Acesso em 09 de nov. 2022.
- Amazonas segue como maior produtor de castanha-do-Brasil, aponta IBGE**. Disponível em: <https://cieam.com.br/amazonas-segue-como-maior-produtor-de-castanha-do-para-do-pais>. Acesso em 01 nov. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2:2018 – Painéis de partículas de média densidade - parte 2: requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 71 p. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: “Painéis de partículas de média densidade, parte 2: Requisitos e métodos de ensaio”, Rio de Janeiro, 2002.
- ASTM D638-10: **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. 2010. ASTM, American Society for Testing and Materials. **Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials**. ASTM D3039/D 3039M, 1995.
- BENAIMECHE, O., SEGHIR, N. T., SADOWSKI, Ł., MELLAS, M. **The Utilization of Vegetable Fibers in Cementitious Materials**. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2019. DOI: 10.1016/b978-0-12-803581-8.11596-6.
- BATTEGAZZORE, DANIELE; NOORI, AMIR; FRACHE, ALBERTO. Natural wastes as particle filler for poly (lactic acid)-based composites. **Journal of Composite Materials**, v. 53, n. 6, p. 783-797, 2019.

BOSENBECKER, MARIANE WEIRICH. **Obtenção de celulose a partir da casca de arroz e sua utilização como carga em compósitos com matriz de polietileno de alta densidade.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas. 2018.

BATISTA, K.B., PADILHA, R.P.L., CASTRO, T.O., SILVA, C.F.S.C., ARAÚJO, M.F.A.S., LEITE, L.F.M., LINS, V.F.C. High-temperature, low-temperature and weathering aging performance of lignin modified asphalt binders. **Ind Crops Prod**, 111, 107-116. 6. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.010>

BEISL, STEFAN; FRIEDL, ANTON; MILTNER, ANGELA. Lignin from micro- to nanosize: Applications. **International Journal of Molecular Sciences**, [S. l.], v. 18, n. 11, 2017.

BOUVIE, L., BORELLA, D. R., PORTO, P. A. O., SILVA, A. C., LEONEL, S. Caracterização físico-química dos frutos de castanheira do Brasil. **Nativa**, 4(2), 107-111. 2016.

BERTOLINI, M. S. M., CHRISTOFORO, A. L., CALIL NETO, C., ROCCO LAHR, F. A. Particulate composites with wastes from treated wood and tire rubber. **Advanced Materials Research**, v. 1025-1026, p. 288-291, 2014.

BERTOLINI, S. M. NASCIMENTO, M. F., LAHR, F. A. R., CHAHUD, E. **Emprego de resíduos de Pinus sp tratado com CCB e resina PU de mamona na produção de chapas de partículas.** In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos; EESC/USP. cap. 2, p. 23-55. 2013.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS).** Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

BNDES. **Panorama de mercado: painéis de madeira.** 40. ed. Rio de Janeiro, 2014. p. 323-384. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3023/1/Panorama%20de%20mer>. Acesso em: 23 de dez de 2023.

BUENO, ADRIANA MESQUITA CORRÊA; TORRES, DANIELLE ALENCAR PARENTE. Experiências recentes da União Europeia e dos Estados Unidos em bioeconomia e oportunidades para o Brasil. **Revista Tempo do Mundo**, v. 28, p.177-208, 2022.

BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal.** Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.

BOERJAN, W., RALPH, J., BAUCHER, M. Lignin biosynthesis. **Annu Rev Plant Biol**, 54, 519– 8 546. 2003. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.134938>

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeto de Monitoramento da Castanha do Brasil - Relatório de Atividades.** Brasília, p.110, 2002.

COLLINS, M. N., NECHIFOR, M., TANASĂ, F., ZĂNOAGĂ, M., MCLOUGHLIN, A., STRÓŻYK, M. A., TEACĂ, C. A. Valorization of lignin in polymer and composite systems for advanced engineering applications—a review. **International journal of biological macromolecules**, v. 131, p. 828-849, 2019.

CHAVAN, R. B., RATHI, S., JYOTHI, V. G. S., SHASTRI, N. R. Cellulose based polymers in development of amorphous solid dispersions. **Asian journal of pharmaceutical sciences**, v. 14, n. 3, p. 248-264, 2019.

CZADERNA, A. KOCEMBA, A., KOZANECKI, M., MUCHA, M., MRÓZ, P. The influence of cellulose derivatives on water structure in gypsum. **Construction and Building Materials**, [s.l.], 2018. ISSN: 09500618, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.062.

CARDOSO, B. R., DUARTE, G. B. S., REIS, B. Z., COZZOLINO, S. M. Brazil nuts: Nutritional composition, health benefits and safety aspects. **Food Research International**, v. 100, p. 9-18, 2017.

CHANG, I., IM, J., CHO, G.C. Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally friendly and sustainable geotechnical engineering. **Sustainability**, 8 (3), 251. 2016. 10.3390/su8030251.

CARVALHO, A. G. MORI, F. A., MENDES, R. F., ZANUNCIO, A. J. V., DA SILVA, M. G., MENDES, L. M., DE OLIVEIRA MORI, C. L. S. Use of tannin adhesive from *Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville in the production of OSB panels. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, n. 4, p. 425-432, 2014.

CHÁVEZ-SIFONTES, M., DOMINE, M. E. Lignin, structure, and applications: depolymerization methods for obtaining aromatic derivatives of industrial interest. **Av Cienc Ing**, 4 (4), 15-46. 2013.

CALLISTER JR, WILLIAM D. **Materials science and engineering an introduction**. 2007.

CAMPOS, A. D., TEODORO, K. B., MARCONCINI, J. M., MATTOSO, L. H., MARTINS-FRANCHETTI, S. M. Efeito do Tratamento das Fibras nas Propriedades do Biocompósito de Amido Termoplástico/Policaprolactona/Sisal, **Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 217-222, 2011.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; CLARO NETO, S. **A revolução verde da mamona**. Química Nova na Escola, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 3-8, fev. 2010.

CHAVES, N., **Dossiê técnico** (Cultivo da Castanha-do-Brasil). CDT/UNB, 2007.

DA COSTA, P. R., FERREIRA, L. M. D. M. C., DA SILVA PEREIRA, G. V., DE AGUIAR ANDRADE, E. H., DO RÊGO, J. D. A. R., SILVA-JÚNIOR, J. O. C. BRASIL, D. D. S. B. Estudo do resíduo sólido do processamento da Castanha-do-Brasil para a obtenção de subprodutos com valor agregado. **Conjecturas**, 22(11), 672-691. 2022.

DE OLIVEIRA L. B., DE SOUZA COELHO, C. C., DAS GRAÃ, A., FREITAS-SILVA, O. Non-timber Amazonian Forest products and their valuable edible nuts: Cutia nut, Egg nut, Sapucaia nut and Brazil nut. **Journal of Agricultural Studies**, v. 9, n. 1, p. 286-302, 2021.

DE SOUZA, C. D. R; DA SILVA, KLEYNER DE CARVALHO. Potencial energético dos resíduos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* HBK) para produção de carvão ativado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e53310212698-e53310212698, 2021.

DIAS, J. B., DE CARVALHO, C. E. G., AMORIM, P. G. R., DE SOUZA, E. M., KUNRATH, N. F; MARQUES, D. D. Avaliação de briquetes produzidos a partir da mistura de resíduos de casca da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) e da serragem de jacarandá (*Dalbergia sp.*) para fins energéticos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 19841-19869, 2019.

EICHHORN, S. J. NANOWHISKERS de celulose: materiais promissores para formulários. **Matéria mole**, 7(2), 303–315. 2011.

EVERARD, C. D., MCDONNELL, K. P., FAGAN, C. C. Prediction of biomass gross calorific values using visible and near infrared spectroscopy. **Biomass and Bioenergy**, 45, 203-211. 2012.

EUROPEAN UNION. Innovating for sustainable growth: a bioeconomy for Europe. Brussels: Directorate-General for research and Innovation, Unit F-Bioeconomy, 2012. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f0d8515-8dc0-4435-ba53-9570e47dbd51>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Rumo À Economia Circular: O Racional De Acelerar a Transição. **In: Ellen MacArthur Foundation**. fish scale collagen. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 79, p. 618–626, 2015.

FIGUEIREDO, H. C. N. **Obtenção e caracterização de compósitos biodegradáveis a partir de resíduos agroenergéticos**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agroenergia. Universidade Federal do Tocantins. 2020.

FERRO, F. S., ALMEIDA, T. H. D., SOUZA, A. M. D., ALMEIDA, D. H. D., CHRISTOFORO, A. L., LAHR, F. A. R. Painel híbrido OSB/MDP de madeira Pinus taeda e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 7-14, 2019.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. 2003.

FREIRE, A. L. F. FIGUEIRÊDO, M. B., ROSA, M. D. F., JÚNIOR, C. A. Impactos ambientais de painéis de madeira e derivados-Uma revisão de literatura. **Revista ESPACIOS**. v. 36, 2015. FAO. Food and Agriculture Organization of the United States. **Forestry Production and trade**. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca5703m/ca5703m.pdf>. Acesso em 12 de jan de 2024.

Ferreira, W. F. D. S., de Alencar, E. R., Blum, L. E. B., Ferreira, M. D. A., Mendonca, M. A., Racanicci, A. M. C., & Urruchi, W. M. I. Ozonation of Brazil nuts in aqueous média at different pH levels: ozone decomposition, aspergillus flavus inactivation, and effects on nut color and crude oil lipid profile. **Ozone: Science & Engineering**, v. 43, n. 4, p. 351-362, 2021.

FARIA, EMILIA DE OLIVEIRA; PIRES, ARMANDO DE AZEVEDO CALDEIRA. Economia circular e bioeconomia: Um novo caminho para a sustentabilidade? Sinergia - **Revista do Instituto De Ciências Econômicas, Administrativas e Contábeis (ICEAC)**, Rio Grande, v.25, n.1, p. 79-88, 2021.

GILIO, CAROLINE GRAMINHA. **Avaliação de painéis de partículas homogêneas empregando-se madeira de hevea brasiliensis e tectona grandis, aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. Dissertação. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP. 2020.

GODOY, J. **Estudo de um novo compósito madeira / resina poliuretano para o desenvolvimento de um isolador híbrido**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2007.

HANSEN, N. M. L.; PLACKETT, D. Sustainable films and coatings from hemicelluloses: A review. **Biomacromolecules**, v. 9, p. 1493-1505, 2008.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório** 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em 18 de dez de 2023.

KLUCZKOVSKI, ARIANE MENDONÇA; DE OLIVEIRA, LETICIA BEZERRA; MACIEL, BEATRIZ JANUÁRIO. Caracterização e extração do óleo de castanha-do-Brasil: revisão. **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 3, p. 391-402, 2021.

KAUR, RAVNEET. GERA, P., JHA, M. K., BHASKAR, T. Reaction parameters effect on hydrothermal liquefaction of castor (*Ricinus Communis*) residue for energy and valuable hydrocarbons recovery. **Renewable Energy**, v. 141, p. 1026-1041, 2019.

KOUADRI, I.; SATHA, H. Extraction and characterization of cellulose and cellulose nanofibers from *Citrullus colocynthis* seeds. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], 2018. ISSN: 09266690, DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.08.051.

KÉRI, M. PALCSU, L., TÚRI, M., HEIM, E., CZÉBELY, A., NOVÁK, L., & BÁNYAI, I. 13c nmr analysis of cellulose samples from different preparation methods. **Cellulose**, v. 22, n. 4, p. 2211–2220, 2015.

KHALIL, H. P. S. A.; BHAT, A. H.; YUSRA, A. F. I. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. **Carbohydrate Polymers**, 87, 963– 979. 2012.

KLEMM, D., HEUBLEIN, B., FINK, HP E BOHN, A. Celulose: biopolímero fascinante matéria-prima mais rica e sustentável. **Angewandte Chemie International Edition**, 44 (22), 3358–3393. 2005.

KLOCK, U., DE MUÑIZ, G. I. B., HERNANDEZ, J. A., DE ANDRADE, A. S. Química da madeira 3. ed. **Manual didático. Curitiba: Universidade Federal do Paraná**, 2005.

JIN, X., HU, Z., WU, S., SONG, T., YUE, F., XIANG, Z. Promoting the material properties of xylan-type hemicelluloses from the extraction step. **Carbohydrate polymers**, v. 215, p. 235-245, 2019.

LIMA, A. K. M. D., Vasconcelos, A. G. F. D., Vasconcelos, A. F., Ferreira, A. D., Beviláqua, M. F., Pinto, C. X., ... & Rezende, L. A. M. S. D. BIOECONOMIA E O FUTURO DO DESENVOLVIMENTO DO BRASIL E DA AMAZÔNIA. **OPEN SCIENCE RESEARCH VI**, v. 6, n. 1, p. 1445-1465, 2022.

LIANG, W.; LV, M.; YANG, X. The Combined Effects of Temperature and Humidity on Initial Emissible Formaldehyde Concentration of a Medium-Density Fiberboard. **Building and Environment**, v. 98, p. 80-88, 2016.

MANSOR, M. R., MASTURA, M. T., SAPUAN, S. M., ZAINUDIN, A. Z. The environmental impact of natural fiber composites through life cycle assessment analysis. **Woodhead Publishing: Series in Composites Science and Engineering**, p. 257-285. 2019.

MANTANIS, G. I. ATHANASSIADOU, E. T., BARBU, M. C., WIJNENDAELE, K. Adhesive systems used in the European particleboard, MDF and OSB industries. **Wood Material Science and Engineering**, v. 13, n. 2, p. 104-116, 2018.

MENG, YAHUI; PANG, ZHIQIANG; DONG, CUIHUA. Enhancing cellulose dissolution in ionic liquid by solid acid addition. **Carbohydrate Polymers**, v. 163, p. 317-323, 2017.

MISRA, M.; PANDEY, J. K.; MOHANTY, A. K. **Biocomposites: Design and Mechanical Performance**. 1^a ed. Elsevier Science, Oxford, 2015.

MANFIO, D. RODRIGUES, M. N., SAVI, G. D., SCUSSEL, V. M. BRAZIL NUT (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) Selenium Distribution and Physical Chemical Characteristics of Shell, Brown Skin and Edible Part from Two Amazon Regions. **Asian Journal of Agriculture and Rural Development**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 287–293, 2012.

MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. **Engenharia Agrícola**. v. 26, n. 1, p. 10, 2006.

NAVAS, C.N; REBOREDO, M.M; GRANADOS, D.L. Comparative Study of Agroindustrial Wastes for their use in Polymer Matrix Composites. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 778 – 785, 2015.

NOGUEIRA, I.M.S.N.; LAHR, F.A.R.; GIACON, V.M. Desenvolvimento e caracterização de painéis de partículas aglomeradas utilizando o resíduo do ouriço da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) e resina poliuretana derivada do óleo de mamona. **Revista Matéria**, v.23, n.1, 2018.

NOGUEIRA, R. M., RUFFATO, S., CARNEIRO, J. S., PIRES, E. M., ALVARES, V. S. Avaliação da carbonização do ouriço da castanha-do-brasil em forno tipo tambor. **Scientific Electronic Archives**, 6, 7-17. 2014.

NORTON, RUTH E. Conservation of artifacts made from plant materials. In: **The conservation of artifacts made from plant materials**. 1990. p. 195-285. 1990.

OLIVEIRA, S. L. FREIRE, T. P., MENDES, L. M., MENDES, R. F. The effect of post-heat treatment in MDF panels. **Materials Research**, v. 20, n. 1, p. 183-190, 2017.

OLIVEIRA, J. M. C.; LOBO, P. C. **Avaliação do Potencial Energético de Resíduos de Biomassa Amazônica**. In: 4^o Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas. 2002.

PEREIRA, P. H. F.; ROSA, M. F.; CIOFFI, M. O. H.; BENINI, K. C. C. C.; MILANESE, A. C.; VOORWALD, H. J. C.; MULINARI, D. R. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. **Polímeros**, v. 25, n. 1, p. 9 - 22, 2015.

PETRECHEN, G. P.; ARDUIN, Marcos; AMBRÓSIO, José D. Morphological characterization of Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) fruit pericarp. **Journal of Renewable Materials**, v. 7, n. 7, p. 678-687, 2019.

PETRECHEN, G. P. **Caracterização dos materiais lignocelulósicos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*), preparação e caracterização de seus compósitos com polipropileno**. Dissertação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, São Carlos, 2017.

PEREIRA JR., N. **Biomass of lignocellulosic composition for fuel ethanol production within the context of biorefinery**. In. series on biotechnology. Ed. Nei Pereira Jr. Amiga Digital. Escola de Química/UFRJ. 2008. ISBN 978-85- 903967-3-4.

QUEIROZ, J. F; Homma, A.K. O; Filgueiras, G.C; Menezes, A.J. E.A.de; Reymão, A.E.N; Santos, M.A.S. dos. Produção e mercado dos produtos florestais não madeireiros: o caso da castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa* HBK). **Research, Society and Development**, v.11, p.13, 2022.

QUIRINO, M. G. **Estudo de matriz polimérica produzida com resina natural e fibra da semente de açaí (Euterpe precatória)**, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Amazonas, 2010.

RIBEIRO, F. F; SARAIVA-BONATTO, E. C; MOURA, R. P. de M; MOURA, M. A. S. Caracterização do resíduo agrícola da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H. B. K). **Revista Terceira Margem Amazônia**, v. 6, n.15, p. 61-73, 2020. Doi: <http://dx.doi.org/10.36882/2525-4812.2020v6i15p61-73>.

RASTOGI, AKANKSHA; BANERJEE, RINTU. Production and characterization of cellulose from *Leifsonia* sp. **Process Biochemistry**, v. 85, p. 35-42, 2019.

ROFFAEL, E.; SCHNEIDER, T.; DIX, B. Influence of moisture content on the formaldehyde release of particle- and fiberboards bonded with tannin-formaldehyde resins. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 5, p. 597-605, 2015.

RAVEN, PETER H.; EVERT, RAY F.; EICHHORN, SUSAN E. Biologia vegetal. In: **Biologia vegetal**. 2007. p. 830-830. 2007.

RODRIGUES, M. R. P. **Caracterização e utilização do resíduo da borracha de pneus inservíveis em compósitos aplicáveis na construção civil**. 252f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia da São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SOUZA, C. D. R.; SILVA, K. C. Potencial energético dos resíduos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) para produção de carvão ativado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e53310212698. 2021.

SANTANA JÚNIOR, CLÁUDIO CARNEIRO. **Utilização de biomassas lignocelulósicas da Amazônia Legal para produção de bioprodutos em um contexto econômico e socioambiental**. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente, Palmas, 2020.

SHIROSAKI, R. K., ALMEIDA, T. H. D., PANZERA, T. H., CHRISTOFORO, A. L., LAHR, F. A. R. Caracterização de painéis de partículas de média densidade feitos com resina poliuretana monocomponente à base de mamona. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 37-43, 2019.

SINGH, K., KUMAR, A., AWASTHI, S., PANDEY, S. K., MISHRA, P. Adsorption mechanism of carboxymethyl cellulose onto mesoporous mustard carbon: Experimental and theoretical aspects. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 581, p. 123786, 2019. ISSN: 09277757, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.123786.

SINGH, SINGH, Y., KUMAR, J., NAIK, T. P., PABLA, B. S., SINGH, I. Processing and characterization of pineapple fiber reinforced recycled polyethylene composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 2153-2157, 2021.

SANJAY, M. R., MADHU, P., JAWAID, M., SENTHAMARAIKANNAN, P., SENTHIL, S., PRADEEP, S. Characterization, and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, 172, 566-581. 2018.

SBIHI, H. M., NEHDI, I. A., MOKBLI, S., ROMDHANI-YOUNES, M., AL-RESAYES, S. I. Hexane and ethanol extracted seed oils and leaf essential compositions from two castor plant (*Ricinus communis L.*) varieties. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 174-181, 2018.

SANTOS, C., DA, C. Descarte E Reaproveitamento De Resíduos Da Castanha Do Brasil (*Bertholletia Excelsa*) Em Uma Cooperativa Extrativista No Município De Laranjal Do Jari. In: **I Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Anais. Gramado**. 2018.

SOUZA, A. M., NASCIMENTO, M. F., ALMEIDA, D. H., SILVA, D. A. L., ALMEIDA, T. H., CHRISTOFORO, A. L., LAHR, F. A. Wood-Based Composite Made of Wood Waste and Epoxy Based Ink-Waste Adhesive: a cleaner production alternative. **Journal of Cleaner Production**, v. 193, p. 549- 562, 2018.

SANTOS, F., IULIANELLI, G. C., TAVARES, M. I. Effect of microcrystalline and nanocrystals cellulose fillers in materials based on PLA matrix. **Polymer Testing**, v. 61, p. 280-288, 2017.

SANTOS, MARCIO JOSÉ TEIXEIRA DOS. **Aproveitamento de resíduos da indústria de óleos vegetais produzidos na Amazônia**. 2014, 87 f, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

SILVA, S. A. M. D., CHRISTOFORO, A. L., PANZERA, T. H., ALMEIDA, D. H. D., SEGANTINI, A. A. D. S., LAHR, F. A. R. Painéis de Partículas de Madeira Leucena e resina Poliuretana Derivada de Óleo de Mamona. **Ciência Rural**, v. 43, p. 1399- 1404, 2013.

SPINACÉ, M. A. S.; LAMBERT, C. S.; FERMOSELLI, K. K. G.; PAOLI, M. Characterization of lignocellulosic curaua fibres. **Carbohydrate polymers**, v. 77, p. 47-53, 2009.

SEGAL, L., CREELY, J. J., MARTIN JR, A. E., CONRAD, C. M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. **Textile Research Journal**, 1959. ISSN: 00405175, DOI: 10.1177/004051755902901003.

SILVA, JEFFERSON RENAN SANTOS DA. **Obtenção e caracterização de um material compósito produzido com resíduos da castanha-do-brasil e poliestireno de alto impacto**. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

SANTIAGO, R., J. BARROS-RIOS, e R.A. MALVAR, Impact of cell wall composition on maize resistance to pests and diseases. **International journal of molecular sciences**. 14(4): p. 6960-6980. 2013.

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 661 - 671, 2009.

SILVIA L. F.; NETO, A. G. V. C. de; RADOVANOVIC, E. Compósitos polietileno após-consumo/fibras naturais: análise de ensaios mecânicos de tensão e flexão e de resistência ao impacto. **Sociedade Brasileira de Química**, p.1, 2008.

SÔNEGO, M., SCIUTI, V. F., VARGAS, R., CANTO, R. B., PESSAN, L. A. Composite design bioinspired by the mesocarp of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*). **Bioinspiration & Biomimetics**. 2022. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ac6f37>.

TAMILSELVI, A. JAYAKUMAR, G. C., CHARAN, K. S., SAHU, B., DEEPA, P. R., KANTH, S. V., KANAGARAJ. Extraction of cellulose from renewable resources and its application in leather finishing. **Journal of Cleaner Production**, 2019. ISSN: 09596526, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.401.

TROVATI, GRAZIELLA. SUMAN, M. V. N., SANCHES, E. A., CAMPELO, P. H., NETO, R. B., NETO, S. C., TROVATI, L. R. Production and characterization of polyurethane castor oil (*Ricinus communis*) foam for nautical fender. **Polymer Testing**, v. 73, p.87-93, fev. 2019.

TAPPI. **T 222 om-02. Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. TAPPI test methods, [s.l.], 2006. ISBN: 1384-6574, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2006.08.008.

UEDA, KARINA SAYURI. **Extração de nanocristais de celulose da casca da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2018.

UN, (United Nations). Resolution adopted by the General Assembly on 27 July 2012 - A/RES/66/288*. (September 2012). <https://doi.org/A/RES/66/288>.

WANG, Y., LIU, W., ZHANG, L., HOU, Q. Characterization and comparison of lignin derived from corncob residues to better understand its potential applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s.l.], 2019. ISSN: 18790003, DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.05.013.

VASSILEV, S. V., BAXTER, D., VASSILEVA, C. G., ANDERSEN, L. K. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. **Fuel**, 105, 40-76. 2013.

ZHONG, R., GU, J., GAO, Z., TU, D., HU, C. Impacts of Urea-Formaldehyde Resin Residue on Recycling and Reconstitution of Wood-Based Panels. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 78, p. 60-66, 2017.

ZENID, G. J. **Madeiras e suas características**. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Eds.). *Tecnologias aplicadas ao setor Madeireiro*. Jerônimo Monteiro: Suprema Gráfica e Editora. p. 125 -158. 2007.