



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE PAINÉIS
DE POLIURETANO COM FIBRAS DE CURAUÁ E RESÍDUOS MADEIREIROS**

EUGENIO RENOIR DE GÓES BORGES

MANAUS
2019

EUGENIO RENOIR DE GÓES BORGES

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE PAINÉIS
DE POLIURETANO COM FIBRAS DE CURAUÁ E RESÍDUOS MADEIREIROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Orientadora: Dr^a. Ângela Mari dos Santos Costella

Coorientadora: Dr^a. Virgínia Mansanares Giacon

MANAUS

2019

Ficha Catalográfica

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

B732d Borges, Eugênio Rênoir de Góes
Desenvolvimento e caracterização física e mecânica de painéis de poliuretano com fibras de curauá e resíduos madeireiros / Eugênio Rênoir de Góes Borges. 2019
71 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Ângela Mari dos Santos Costella
Coorientadora: Virginia Mansanares Giacon
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Ananas erectifolius. 2. Tratamento alcalino. 3. Merceirização. 4. Condutividade térmica. 5. Resina poliuretana. I. Costella, Ângela Mari dos Santos II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº. 005/2019

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO AO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

DATA DO EXAME: 06/05/2019

DISCENTE: Eugenio Renoir de Góes Borges

ORIENTADOR: Profa. Dra Ângela Mari dos Santos Costella

COORDENADOR: Profa. Dra. Virginia Mansanares Giacon

BANCA EXAMINADORA: (Nome Completo)

Profa. Dra Ângela Mari dos Santos Costella (Presidente)

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho (Membro Interno)

Prof. Dr. Rannier Marques Mendonça (Membro Externo)

TITULO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE PAINÉIS DE POLIURETANO COM FIBRAS DE CURAUÁ E RESÍDUOS MADEIREIROS

LOCAL: Sala Multiuso II da Faculdade de Tecnologia/UFAM.

HORA DE INÍCIO: 14h00

De acordo com o Regimento Interno do Programa Pós – Graduação em Engenharia Civil, aprovados pelo Conselho de Ensino e Pesquisa/CONSEP/UFAM e CAPES, o (a) aluno (a) submeteu sua dissertação em forma escrita e oral, sendo após exposição de cerca de 40 minutos arguido oralmente pelos membros da banca, tendo tido como resultado:

(X) Aprovação por unanimidade de sua dissertação. O (A) aluno (a) foi considerado aprovado, podendo pleitear o título de Mestre.

() Reprovação de sua Dissertação. O (A) aluno (a) não foi considerado aprovado (a) na sua Defesa de Dissertação. Não podendo pleitear o título de Mestre.

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que será assinada pelos membros da banca e pelo (a) aluno (a).

Observações _____

Manaus, 06 de maio de 2019

Profa. Dra Ângela Mari dos Santos Costella (Presidente)

Ângela Costella

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho (Membro Interno)

João de Almeida M. Filho

Prof. Dr. Rannier Marques Mendonça (Membro Externo)

R. Mendonça

Eugenio Renoir de Góes Borges (Discente)

Eugenio Renoir G. Borges

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pela confiança depositada em mim. À minha parceira de todas as horas Alessandra e ao meu mais novo amor Nicolle.

AGRADECIMENTOS

Ao Pai que tudo rege, pela proporção de saúde e conhecimento todos os dias.

À minha família, que não é pequena, mas em especial aos meus pais Eugenio e Dalva, meus irmãos Darling e Neto, seus cônjuges e filhos.

À minha orientadora Dra Angela Costella, por confiar no meu trabalho, pelas nossas conversas sobre os conhecimentos mais amplos que me enriqueceram como pessoa e profissional. Também à minha coorientadora Dra Virgínia Giacon, por me acolher em seu laboratório, pelo auxílio prestado nessa pesquisa e pelos nossos cafés tomados.

Aos demais professores do mestrado com os quais pude aprender inúmeras coisas, ampliando a visão periférica do saber. Em especial ao Dr. João Melo Filho, por toda a assistência quanto aos ensaios e pela disponibilidade de tempo a mim concedida, haja vista que o procurei várias vezes.

Aos técnicos: da UFAM – Diogo (Lamac), pelo convívio quase que diário, ajuda nos ensaios e discussões que somente enriqueceram o trabalho realizado; Miécio e Camila (Labmat) pela auxílio e disponibilidade de tempo na explicação do ensaio de condutividade térmica; Do IFAM – André Hulk (LEM), pela concessão da máquina e realização dos ensaios mecânicos; Do INPA – Lucas Castanhola e Jackeline (LTMOE), pelo ensaio de MEV.

Aos amigos que me ajudaram nessa empreitada, dentro e fora do âmbito acadêmico, sendo inclusive meu braço direito quando este estava quebrado, dentre eles, Aedjota, Naiara, Bruno, Saulo, Miguelina, Isabelle e Gabriel.

A todos aqueles que torceram por mim em mais um objetivo acadêmico e em especial à Msc. Ivana de La-Rocque por sempre me incentivar desde a graduação, acreditando no meu potencial.

À Dra. Alex-Sandra, minha incentivadora de todos os dias, escovadora e desfiadora de fibras, que sempre acredita em mim em todos os cenários possíveis, independentemente da situação.

À FAPEAM, pelo apoio financeiro e fomento incansável da pesquisa no Estado.

À UFAM, pelos seus recursos disponibilizados na área técnica e administrativa, essenciais para a conclusão desta pesquisa.

A vocês, eu agradeço.

RESUMO

A busca por materiais com utilização de elementos provenientes de fontes renováveis e resíduos de produtos industrializados é alvo de constantes pesquisas que visam o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis. A região amazônica possui altas temperaturas e umidade relativa do ar, o que causa desconforto térmico nas edificações convencionais. Além disso, o alto volume de resíduos de madeira, decorrente do baixo aproveitamento de serrarias, gera um grande impacto ambiental. Em virtude disto, os compósitos que utilizam fontes renováveis, como as fibras lignocelulósicas, e subprodutos de outros materiais, como a serragem da madeira, são alternativas para um mercado mais sustentável da construção civil. O objetivo deste trabalho foi produzir compósitos com fibras de curauá e resíduos madeireiros aglutinados com resina poliuretana de óleo de mamona, variando a proporção de seus componentes e avaliando suas propriedades físicas e mecânicas. Os painéis foram produzidos com as fibras tratadas em solução de NaOH a 5 % em massa e resíduos madeireiros com granulometria entre 0,250 mm e 0,425 mm. Foram avaliadas as propriedades de umidade, densidade, inchamento, absorção, resistência à flexão, módulo de elasticidade, condutividade térmica e morfologia dos compósitos. A partir dos resultados, inferiu-se que o tratamento alcalino nas fibras foi eficaz na remoção de hemicelulose e lignina e que a característica hidrofílica da fibra elevou o inchamento e absorção do compósito. Contudo, este tratamento reduziu as propriedades mecânicas dos painéis, sugerindo uma maior quantidade de resina para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas. Todavia, os valores de MOR e MOE nas faixas de 7,8-14 MPa e 1441-2256 MPa, respectivamente, aliados à baixa condutividade térmica entre 0,26 e 0,38 W/mK sugerem o potencial de utilização destes compósitos como material alternativo para a construção de edificações, inclusive como melhoria do conforto térmico, tendo em vista sua proximidade com materiais convencionais utilizados na construção civil, como o gesso acartonado.

Palavras-chave: *Ananas erectifolius*. Tratamento alcalino. Merceirização. Condutividade térmica. Resina poliuretana.

ABSTRACT

The development of sustainable materials obtained by renewable resources and residues has been the main objective of various researches. Amazon region presents high temperatures and relative humidity, which causes thermal discomfort in conventional buildings. Furthermore, high volume of wood waste, due to the low exploitation of sawmills, generates a great environmental impact. Because of this, composites that use renewable sources such as lignocellulosic fibers and by-products of other materials, such as wood sawing, are alternatives for a more sustainable construction market. The purpose of this research was to produce composites with curauá fibers and wood residues agglutinated with polyurethane resin of castor oil, varying ratio of its components and evaluating its physical, mechanical and thermal properties. Particleboard were produced in different proportions, with fibers treated with 5 % NaOH concentration and wood residues sieved in a range of 0.425 mm and 0.250 mm and had their properties of humidity, density, swelling, absorption, flexural strength, elastic modulus, thermal conductivity and scanning electron microscopy evaluated. From the results, it is inferred that the alkaline treatment in the fibers was effective in the removal of hemicellulose and lignin and that the hydrophilic characteristic of the fiber increases the swelling and absorption of the composite. However, this treatment has reduced the mechanical properties of the panels, implying that a greater amount of resin is needed for the improvement of physical and mechanical properties. Nevertheless, the values of MOR and MOE from 7.8 to 14 MPa and from 1441 to 2256 MPa, respectively, together with the low thermal conductivity between 0.26 and 0.38 W / mK suggest the potential of using these composites as material alternative for the construction of buildings, including as an improvement of thermal comfort, considering its proximity to conventional materials used in civil construction, such as gypsum board.

Keywords: *Ananas erectifolius*. Waste wood. Alkaline treatment. Thermal conductivity. Castor oil resin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das fibras naturais.	17
Figura 2 – Representação da estrutura de uma fibra vegetal.	18
Figura 3 – Planta do curauá.	20
Figura 4 – Processo de desfibramento das folhas de curauá.	20
Figura 5 – Produção mundial de resíduos de madeira (2010 a 2017).	22
Figura 6 – Arranjo básico do analisador de condutividade térmica	29
Figura 7 – Materiais: a) Fibra de curauá; b) Resíduos de madeira; c) Resina: (i) polioli e (ii) pré-polímero.	33
Figura 8 – Organograma dos métodos utilizados.	33
Figura 9 – (a) Moinho micro de facas; (b) Analisador de umidade.	35
Figura 10 – Etapas de produção da placa.	37
Figura 11 – (a) Balança semi-analítica; (b) Micrômetro digital.	37
Figura 12 – Pontos de aferição no corpo de prova para ensaio de densidade.	39
Figura 13 – Analisador de condutividade térmica.	41
Figura 14 – Máquina para ensaio de flexão.	42
Figura 15 – Esquema de gráfico tensão-deflexão e sua reta tangente.	43
Figura 16 – Curvas deTG para as fibras de curauá.	44
Figura 17 – Curvas de DTG para as fibras de curauá.	45
Figura 18 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: a) T0 (escala: 500 μ m); b) T3 (escala: 200 μ m); c) T0 (escala: 200 μ m); d) T3 (escala: 200 μ m)	48
Figura 19 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: a) T1 (escala: 200 μ m); b) T2 (escala: 200 μ m); c) T1 (escala: 20 μ m); d) T2 (escala: 20 μ m)	49
Figura 20 – Microscopia eletrônica de varredura do compósito T4: a) escala: 200 μ m; b) escala: 50 μ m.	50
Figura 21 – Densidade, variação percentual e limites superiores das normas.	51
Figura 22 – Acúmulo de resina no compósito T2.	52
Figura 23 – Resultados de umidade dos compósitos.	53
Figura 24 – Resultados de inchamento e absorção.	54
Figura 25 – Curvas típicas do gráfico de tensão x deflexão dos compósitos.	57
Figura 26 – Resultados do módulo de elasticidade e os limites mínimos da NBR 14810-2.	58
Figura 27 – Resultados do módulo de ruptura e os limites mínimos da NBR 14810-2.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre fibras naturais e fibras de vidro	16
Tabela 2 – Composição química de algumas fibras naturais vegetais	18
Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras.....	19
Tabela 4 – Densidade e composição química de algumas espécies de madeira.....	23
Tabela 5 – Classificação de painéis aglomerados	25
Tabela 6 – Requisitos mínimos ou máximos de propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados.....	26
Tabela 7 – Pesquisas realizadas com fibras ou resíduos orgânicos e serragem	27
Tabela 8 – Densidade e condutividade térmica de alguns materiais	28
Tabela 9 – Resultados de diâmetro, resistência à tração e módulo de elasticidade para fibra de curauá.....	31
Tabela 10 – Parâmetros do tratamento alcalino nas fibras	34
Tabela 11 – Composição das placas em percentual	36
Tabela 12 – Perda de massa e temperatura de degradação das fibras de curauá.....	46
Tabela 13 – Teor de umidade dos componentes.....	46
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de caracterização física	55
Tabela 15 – Resultados do ensaio de condutividade térmica	55
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica.....	60

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

ASTM – American Society for Testyng & Materials

FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of United Nations

IFAM – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas

LABMAT – Laboratório de Materiais

LaMAC – Laboratório de Materiais Amazônicos e Compósitos

LEM – Laboratório de Ensaio de Materiais

LTMOE – Laboratório Temático de Microscopia Ótica e Eletrônica

MDF – Medium-density Fiberboard

MDP – Medium-density Particleboard

MOE – Módulo de elasticidade

MOR – Módulo de ruptura

NBR – Norma Brasileira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	FIBRAS VEGETAIS	16
2.1.1	Classificação	16
2.1.2	Composição química	17
2.1.3	Propriedades físicas e mecânicas.....	19
2.1.4	Curauá.....	19
2.2	RESÍDUOS DE MADEIRA	21
2.2.1	Rendimento das serrarias	21
2.2.2	Classificação e disposição	22
2.2.3	Composição química	23
2.3	ADESIVOS PARA AGLUTINAÇÃO	23
2.3.1	Adesivos sintéticos	23
2.3.2	Resina poliuretana à base do óleo de mamona	24
2.4	PAINÉIS AGLOMERADOS.....	25
2.4.1	Classificação e disposição	25
2.4.2	Propriedades físicas e mecânicas.....	26
2.4.3	Características morfológicas.....	27
2.4.4	Condutividade térmica.....	27
2.4.5	Fatores que influenciam na produção dos painéis	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	MATERIAIS.....	33
3.2	MÉTODOS	33
3.2.1	Processamento da matéria prima	34
3.2.2	Caracterização da matéria prima	34
3.2.3	Produção dos compósitos	35
3.2.4	Caracterização física dos compósitos	37
3.2.5	Caracterização mecânica dos compósitos.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44

4.1	CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA	44
4.1.1	Análise térmica da fibra	44
4.1.2	Teor de umidade das partículas	46
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	47
4.2.1	Caracterização física	47
4.2.2	Caracterização mecânica	56
5	CONCLUSÃO	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca pela sustentabilidade faz a pesquisa avançar no desenvolvimento de materiais provenientes de resíduos não explorados dentro de uma cadeia produtiva. Entre esses, existem os resíduos lignocelulósicos, que podem ser utilizados como reforço em compósitos poliméricos e mostram-se como uma alternativa viável para a minimização de resíduos descartados, preservando o meio ambiente e fazendo-se o uso de matéria-prima de fonte renovável.

Dentre esses materiais, podem ser utilizadas as fibras vegetais, que tem como vantagens sua baixa densidade, fácil manuseio, oferta contínua, flexibilidade, baixo custo, são renováveis e de natureza biodegradável (ASIM *et al.*, 2015; MOREIRA *et al.*, 2015; VERMA; JAIN, 2017). Além disto, para Pino *et al.* (2017) e Silva *et al.* (2014), esses materiais tem boa aceitação no lugar de materiais tradicionais em aplicações de baixo peso e alta resistência à tração e flexão, e ainda alta fluência e compacidade.

Apesar de servir como um bom reforço em compósitos poliméricos, o principal problema do uso das fibras vegetais com matrizes hidrofóbicas, é sua baixa interação. Portanto, como as fibras vegetais possuem uma natureza hidrofílica, faz-se necessário um tratamento superficial a fim de melhor transmitir os esforços dentro de uma matriz polimérica. O curauá (*Ananas erectifolius*) é uma planta característica da região amazônica e possui boa relação entre custo e propriedades mecânicas, tendo bastante potencial para utilização em compósitos poliméricos.

Além das fibras vegetais, os resíduos madeireiros também são de fonte renovável, podendo ser reciclados para a geração de energia e fabricação de painéis aglomerados, sendo este o seu destino mais comum. A produção de painéis de partículas com madeira reciclada mantém o carbono absorvido nos produtos madeireiros por um longo período, contribuindo para a redução do aquecimento global (KIM; SONG, 2014). Ademais, o baixo rendimento do corte de madeira em serrarias é um fator ambiental preocupante, pois a quantidade de material gerado como resíduo é grande e o descarte inadequado gera poluição ambiental. E conforme Macedo *et al.* (2015), nas últimas décadas, a produção de painéis de madeira cresceu substancialmente, evidenciando a potencialidade dos estudos destinados ao uso de materiais lignocelulósicos e justificando a utilização desses resíduos como matéria-prima na produção de compósitos alternativos visando à sustentabilidade.

O conceito de sustentabilidade deve estar intrínseco em todas as etapas de uma obra, assim como regulamenta a Norma de Desempenho de Edificações – NBR 15575, na qual a

edificação deve ser estudada de maneira geral, e não em partes isoladas. Nesta norma, critérios como estrutura, isolamento acústico, segurança contra incêndio e conforto térmico precisam atender exigências mínimas para o conforto do usuário. De acordo com a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE, 2010), a sensação de conforto térmico está relacionada com as condições de ventilação dos ambientes, isolamento de roupas dos usuários, temperatura e velocidade do ar, umidade, entre outros.

Em virtude disso, o mercado atual da construção tem oferecido materiais convencionais e não convencionais buscando a melhoria do conforto térmico. Dentre os isolantes térmicos convencionais, pode-se citar a lã de vidro e a lã de rocha, com baixas densidade e condutividade térmica, podendo ser usadas como camada de forros ou enchimento de paredes (SILVA; VASCONCELOS, 2018). Contudo, materiais isolantes como o poliuretano e as lãs de rocha e vidro possuem altos processos de custo e produção, portanto, várias pesquisas buscam agregar valor às cadeias produtivas de diversos materiais, como a utilização de fibras naturais – muitas delas provenientes de resíduos – em compósitos como alternativa às fibras sintéticas, no intuito de reforçar a matriz agregando melhores propriedades para o produto final (GOMES; BARBOSA, 2016; MOREIRA *et al.*, 2015). De acordo com Gatani *et al.* (2013) e Lima Jr. *et al.* (2014), esses resíduos podem ser utilizados na composição de painéis aglomerados alternativos, estimulando a produção de novos materiais sustentáveis.

Tendo em vista que no Brasil há uma previsão para redução de índices pluviométricos e aumento considerável de temperatura, principalmente na Região Amazônica, na qual as pesquisas indicam que essa elevação de temperatura será maior que a média global no decorrer do século (INPE, 2011), justifica-se o estudo da produção de novos materiais baseados em fibras vegetais e resíduos lignocelulósicos.

Sendo assim, o presente trabalho busca aliar os materiais lignocelulósicos como a fibra de curauá e o resíduo madeireiro no desenvolvimento e caracterização de painéis aglomerados que detenham bons parâmetros de rigidez, leveza e baixa condutividade térmica, que podem surgir como alternativa aos produtos comercializados atualmente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Produzir e avaliar as propriedades físicas e mecânicas de compósitos de poliuretano com fibras de curauá e resíduos madeireiros.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir qual a concentração de hidróxido de sódio e o tempo de imersão ideais para o tratamento das fibras de curauá;
- Identificar a melhor proporção de fibras de curauá, resíduos de madeira e resina poliuretana de mamona visando as melhores propriedades físicas dos compósitos;
- Analisar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos e suas características morfológicas;
- Avaliar a condutividade térmica dos compósitos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FIBRAS VEGETAIS

2.1.1 Classificação

As fibras naturais podem ser de origem animal, mineral e vegetal. As fibras oriundas de animais possuem proteínas específicas e incluem a seda e a lã. Volastonita e amianto são exemplos de fibras minerais. Já as vegetais são a base de celulose, podendo ser de algodão, cânhamo, juta, sisal e fibras especiais processadas a partir da madeira (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016).

De acordo com Wambua *et al.* (2003), desde a década de 1990, as pesquisas foram intensificadas para materiais poliméricos com a utilização de fibras sintéticas, principalmente a de vidro, nas indústrias automotivas, construção e aeroespacial. No entanto, apesar da fibra de vidro possuir menor custo quando comparada ao carbono e aramida, apresenta desvantagens quando comparadas as fibras vegetais, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre fibras naturais e fibras de vidro

Propriedades	Fibra natural	Fibra de vidro
Densidade	Baixa	Dobro das fibras naturais
Custo	Baixo	Baixo, porém, mais alto que as fibras naturais
Renovável e Reciclável	Sim	Não
Consumo de energia	Baixo	Alto
Abrasão em máquinas	Não	Sim
Risco de saúde quando inalado	Não	Sim
Disposição	Biodegradável	Não Biodegradável

Fonte: Adaptado de Wambua *et al.* (2003)

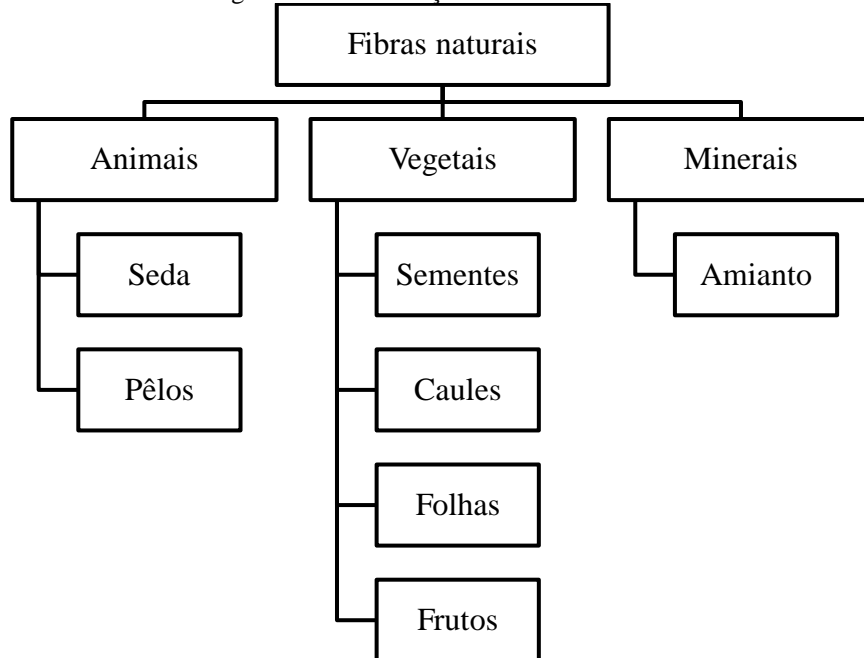
O motivo da não utilização de fibras vegetais em escala comercial se tornou a grande preocupação dos pesquisadores, que é desenvolver maneiras de melhorar a adesão entre fibra e matriz, haja vista que a natureza hidrofílica destas em contato com materiais hidrofóbicos tende a minimizar as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras naturais, reduzindo sua vida útil (AWAL; RANA; SAIN, 2015; CISNEROS-LÓPEZ *et al.*, 2017; HASSAN *et al.*, 2010).

As principais propriedades das fibras vegetais são sua origem renovável, baixa densidade e biodegradabilidade (ASIM *et al.*, 2015; MOREIRA *et al.*, 2015; VERMA; JAIN, 2017). Além disso, a fibra vegetal é econômica e versátil, podendo ser aplicada em peças de automóveis, construção de edifícios, armários de divisórias, móveis para usos domésticos e embalagens para máquinas.

As fibras vegetais são oriundas de diversas partes da planta, como caule, semente, folhas e frutos. De acordo com Faruk (2012), as plantas que produzem fibras vegetais são classificadas como primárias, quando cultivadas para obtenção de fibras, como juta, kenaf e sisal, ou secundárias, quando as fibras são produzidas como subprodutos, como o abacaxi e o coco.

Conforme a NBR 12744 (ABNT, 1992), que trata da classificação de fibras têxteis, as fibras são divididas em naturais (Figura 1) e manufaturadas (artificiais e sintéticas).

Figura 1 – Classificação das fibras naturais.



Fonte: Adaptado da NBR 12744 (ABNT, 1992)

O curauá é uma planta classificado como primária, visto que o seu plantio é para a obtenção de fibras. Seu fruto, apesar de comestível, é insípido e bastante fibroso. Por isso, o interesse econômico está nas fibras extraídas das folhas da planta, que anteriormente eram usadas para confecção de cordas para redes de dormir e linhas de pesca. Comparadas a outros materiais lignocelulósicos, as fibras do curauá possuem alta resistência mecânica e são relativamente macias (ALBIM *et al.*, 2005; MONTEIRO *et al.*, 2006).

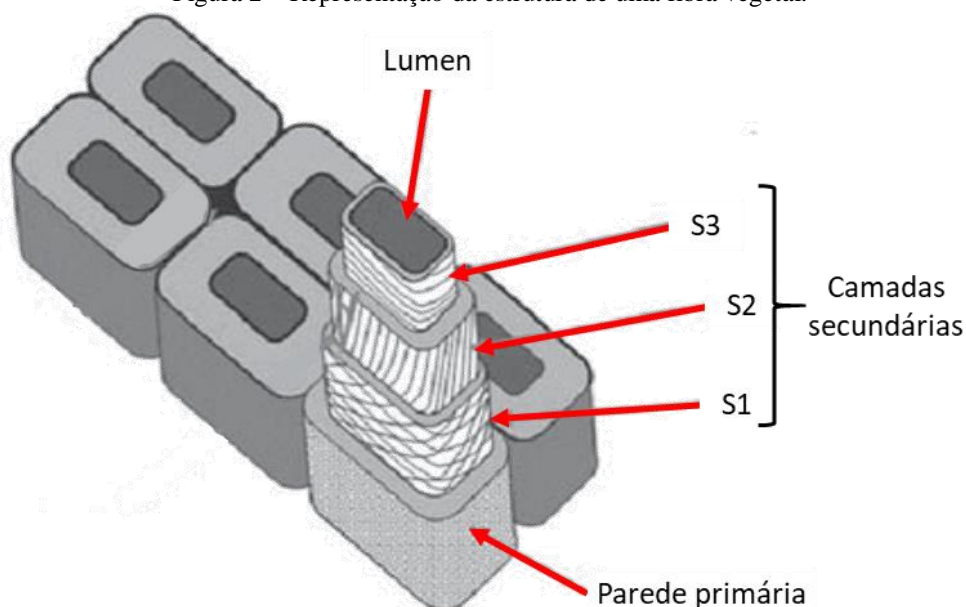
2.1.2 Composição química

Conforme citam Jauhari (2015) e Verma e Jain (2017) as fibras vegetais são constituídas basicamente de celulose, lignina e hemicelulose, por isso a denominação de fibras lignocelulósicas.

A Figura 2 representa a estrutura celular das fibras. As mesmas são formadas por camadas, sendo uma parede celular primária (mais externa) que detém a maior parte de

componentes não celulósicos e forma a superfície da fibra. Esta parede contém três camadas secundárias (S1, S2 e S3) que circundam o lumen. A presença deste último proporciona a absorção de umidade. As paredes celulares são formadas por microfibrilas com diâmetro entre 10 e 30 nanômetros, envoltas em uma matriz de hemicelulose e lignina. Cada microfibrila é composta por 30 a 100 moléculas de celulose em cadeia, o que confere resistência mecânica às fibras (BISMARCK *et. al.*, 2005; YILMAZ, 2015).

Figura 2 – Representação da estrutura de uma fibra vegetal.



Fonte: Adaptado de Kretschmann (2003)

Na Tabela 2 são apresentadas as composições químicas de algumas fibras, dentre elas o curauá.

Tabela 2 – Composição química de algumas fibras naturais vegetais

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Referência
Curauá	58,80 – 78,08	10,00 – 23,80	4,09 – 14,70	(FERREIRA <i>et al.</i> , 2017; SANTOS, 2013; SOLTAN <i>et al.</i> , 2017)
Abacaxi (folha)	64,48 – 70,51	14,21 – 20,89	2,93 – 4,24	(ASIM <i>et al.</i> , 2018; TANPICHAI; WITAYAKRAN, 2018)
Coco	39,79 – 44,20	5,00 – 22,10	32,80 – 43,61	(MANJULA <i>et al.</i> , 2018; SUBHEDAR <i>et al.</i> , 2018)
Juta	61,00 – 74,40	13,60 – 20,40	8,40 – 13,00	(FERREIRA <i>et al.</i> , 2017; JAUHARI <i>et al.</i> , 2015)
Piaçava	29,00 – 43,23	8,34 – 11,00	45,00 – 50,05	(BORGES <i>et al.</i> , 2017; SOLTAN <i>et al.</i> , 2017)
Sisal	60,50 – 78,00	10,00 – 25,70	8,00 – 12,10	(FERREIRA <i>et al.</i> , 2017; JAUHARI <i>et al.</i> , 2015)

Além da composição, outros fatores podem influenciar no desempenho das fibras como idade da planta, local da planta de onde são extraídas, condições climáticas, processo de extração, condições de armazenamento e tempo entre extração e uso (FARUK *et al.*, 2012; PRADO; SPINACÉ, 2015).

2.1.3 Propriedades físicas e mecânicas

As propriedades mecânicas das fibras vegetais dependem de sua composição química e estrutural (VERMA; JAIN, 2017). Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades físicas e mecânicas de fibras vegetais e de uma fibra sintética. Nota-se que a resistência à tração e o módulo de elasticidade são menores nas fibras naturais. Contudo, considerando sua baixa densidade, elas podem ser uma alternativa na substituição da fibra de vidro.

Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras

Fibra	Densidade (kg/m ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Referência
Curauá	1400 – 1420	620 – 632,14	38,10 – 41,70	(FERREIRA <i>et al.</i> , 2017; LEAL NETA <i>et al.</i> , 2015; SOLTAN <i>et al.</i> , 2017)
Abacaxi (folha)	1530	290,61	5,83	(ASIM <i>et al.</i> , 2018)
Coco	1150	131 – 175	4 – 6	(DUAN <i>et al.</i> , 2018)
Juta	1260 – 1300	393 – 1035	26,50 – 61,00	(KIM <i>et al.</i> , 2018; TRIPATHI <i>et al.</i> , 2018)
Piçava	1570	61	1,82	(SOLTAN <i>et al.</i> , 2017)
Sisal	1500	447,20 – 635	9,4 – 22,00	(DUAN <i>et al.</i> , 2018; FERREIRA <i>et al.</i> , 2017)
Vidro	2500	2000 – 3500	70,00 – 72,00	(PRADO; SPINACÉ, 2015; TRIPATHI <i>et al.</i> , 2018)

2.1.4 Curauá

O curauá (*Ananas erectifolius*) é oriundo da região amazônica e pertence à família Bromeliaceae, a mesma família do abacaxi (*Ananas comosus*), com o qual se assemelha (Figura 3), com cultivos principalmente no estado do Pará (MOREIRA *et al.*, 2016; SENA, 2015).

A fibra do curauá é extraída da folha, que possui dimensões aproximadas de 5 cm de largura, 2 a 3 mm de espessura e comprimento entre 1,0 m e 1,5 m. Devido ao seu baixo custo, baixa densidade e alta resistência à tração, tem sido objeto de estudo como alternativa para a fibra de vidro e outros materiais dentro das indústrias têxteis, automobilística e da construção civil (PINO *et al.*, 2017; SENA, 2015).

Figura 3 – Planta do curauá.

Fonte: Coelho *et al.* (2014)

De acordo com Sena (2015), as folhas são colhidas manualmente e de forma individual após um ano, na primeira colheita, e posteriormente de 3 a 4 meses, rendendo em média 48 folhas por ano (aproximadamente 3 kg de folhas), o que gera em torno de 3600 kg de fibra seca por hectare/ano e 60 toneladas de mucilagem, que pode ser utilizada como adubo orgânico ou na alimentação de animais. Conforme este autor, o rendimento do desfibramento (Figura 4) das folhas varia de 2 a 4 kg de fibra seca por hora de trabalho, dependendo da habilidade do operador na máquina desfibradora. O beneficiamento consiste, além do desfibramento mecânico, nos processos de lavagem e secagem das fibras, que visam retirar os resíduos de mucilagem e, após secas em varais ou estufa solar, colocar em fardos para comercialização.

Figura 4 – Processo de desfibramento das folhas de curauá.



Fonte: (SENA, 2015)

2.2 RESÍDUOS DE MADEIRA

2.2.1 Rendimento das serrarias

O baixo aproveitamento de cortes de madeira nas serrarias corrobora para uma grande geração de resíduos, que podem se tornar poluentes ambientais. Portanto, aliados a uma matriz polimérica com fibras lignocelulósicas, os compósitos produzidos a partir deste material, destinado inicialmente ao descarte, pode gerar valor na cadeia de produção na indústria da madeira.

O rendimento de corte da madeira em uma serraria fornece a informação do quanto foi aproveitado para a comercialização e quanto foi destinado como resíduo. O rendimento médio varia conforme o diâmetro das toras, procedimentos de operação, equipamentos utilizados, nível de automação, experiência da mão de obra e modelos de corte (ANJOS; FONTE, 2017; BATISTA *et al.*, 2015).

Barbosa *et al.* (2014) encontraram rendimentos médios entre 41,18 % e 44,07 % para toras da espécie *Pinus elliottii* no Rio Grande do Sul. Anjos e Fonte (2017) trabalharam com toras de Eucalipto, na Região Sul do Brasil, e acharam rendimento entre 42,35 % e 48,29 %. Para esta mesma espécie e região, Batista *et al.* (2015) notaram uma variação próxima a 53,6 %. Na região amazônica, Lima (2017) e Mota (2018) analisaram o rendimento de diferentes espécies de madeiras amazônicas, encontrando rendimentos entre 54,40 % e 59,13 % para o Angelim Vermelho, entre 32,60 % e 44,72 % para o Jatobá e entre 39,85 % e 40,51 % para o Ipê. Porém, a Resolução nº 474/16 (CONAMA, 2016) autoriza o desdobramento de madeiras com coeficiente de rendimento volumétrico de 35 %, salvo em caso de estudo técnico apresentado e aceito pelos órgãos ambientais competentes.

Em virtude destes números e pela alternativa de melhorar o aproveitamento da cadeia produtiva de madeira, existem estudos para a utilização dos resíduos madeireiros em painéis compósitos utilizando matrizes poliméricas, aliando uma fibra lignocelulósica como o curauá (SANTOS, 2013) ou o coco (FIORELLI *et al.*, 2015). Há ainda a possibilidade de utilizar somente o resíduo da madeira (ZAU *et al.*, 2014) em uma matriz polimérica ou agregá-lo em uma matriz cimentícia (RIBEIRO, 2016).

De acordo com Barbosa *et al.* (2014), o aproveitamento desses resíduos possibilita valor agregado ao processo de produção, aumentando competitividade, criando empregos diretos e indiretos e minimizando o descarte inadequado no meio ambiente.

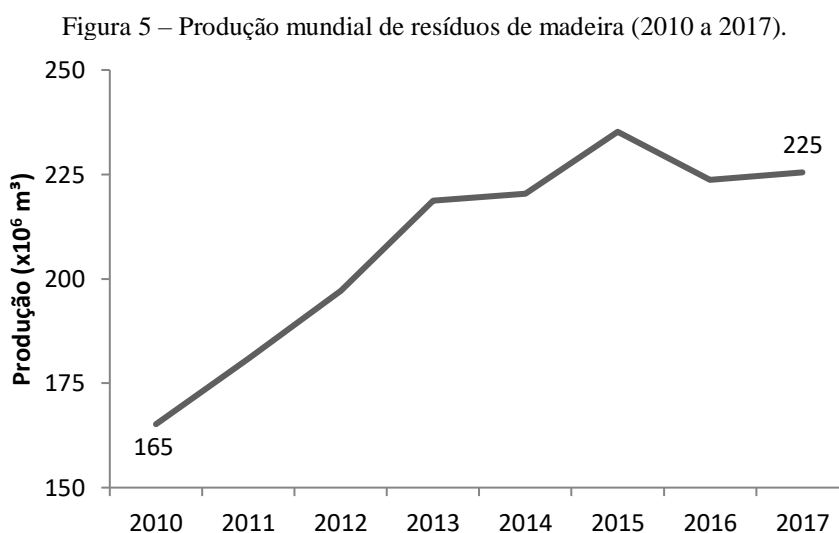
2.2.2 Classificação e disposição

Os resíduos de madeira são considerados, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), como não perigosos (classe II). Conforme Fontes (1994), eles podem ser classificados em três grupos distintos:

- Lenha: as partes maiores, como costaneiras, aparas e cascas;
- Cepilho (maravalha): proveniente da plaina quando uma madeira é beneficiada;
- Serragem: oriundo da operação das serras, em formato de pó.

De acordo com Silva *et al.* (2017), maravalha e serragem somam 94 % do total da produção de resíduos em empresas do ramo moveleiro e de fabricação de esquadrias. Para os autores, este material pode ser reaproveitado, evitando que se tornem poluente ambiental e racionalizando os recursos florestais.

A *Food and Agriculture Organization of United Nations* (FAOSTAT) estimou que a produção mundial de resíduos de madeira entre os anos de 2010 e 2018 cresceu de 165 para 225 milhões de metros cúbicos (m³), conforme Figura 5. Neste mesmo período, o Brasil aumentou sua geração de resíduos madeireiros em 70 %, tornando-se em 2017, o segundo maior produtor (19,1 milhões de m³), ficando somente atrás da China (98 milhões de m³) (FAOSTAT, 2019a).



Fonte: (FAOSTAT, 2019a)

No entanto, a organização não estima o quanto deste material é reaproveitado para outros fins. Portanto, faz-se jus o estudo de alternativas para a utilização dos resíduos de madeira, haja vista sua vasta quantidade que pode afetar o meio ambiente em caso de descarte inadequado.

2.2.3 Composição química

A madeira é um material lignocelulósico composto, assim como as fibras, principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. A Tabela 4 apresenta a densidade e a composição química de algumas espécies de madeira.

Tabela 4 – Densidade e composição química de algumas espécies de madeira

Espécie	Densidade (kg/m ³)	Holocelulose (%)	Lignina (%)	Extrativos (%)	Referência
Amapá-doce	-	62,95	33,51	3,54	(SANTOS, 2013)
Angelim-pedra	615	56,15	31,77	11,52	(CASTRO <i>et al.</i> , 2015)
Cumaru	865	58,33	34,29	18,32	(ZAU <i>et al.</i> , 2014)
Cumarurana	742	56,76	33,28	9,56	(CASTRO <i>et al.</i> , 2015)
Ipê amarelo do campo	> 1000	62,60	37,20	3,90	(ZBOROWSKA <i>et al.</i> , 2016)
Jatobá	789	54,98	31,88	12,78	(CASTRO <i>et al.</i> , 2015)
Louro-Inhamuí	-	67,52	27,86	5,89	(SANTOS, 2013)
Louro-Vermelho	535	56,51	33,63	9,60	(CASTRO <i>et al.</i> , 2015)

Percebe-se que o maior componente da madeira é a holocelulose, que é a combinação da hemicelulose com a celulose. A utilização de resíduos de madeira em compósitos é realizado de diversas maneiras, podendo ser utilizado a casca (PÁSZTORY *et al.*, 2017), a serragem do beneficiamento (ZAU *et al.*, 2014) e de marcenarias ou indústrias de móveis (ROCHA, 2016).

2.3 ADESIVOS PARA AGLUTINAÇÃO

2.3.1 Adesivos sintéticos

A resina ureia-formaldeído é a mais utilizada no comércio de painéis aglomerados. No entanto, as indústrias também produzem as resinas compostas de melamina-uréia-formaldeído e fenol-melamina-uréia-formaldeído para aplicações semi-estruturais e fenol formaldeído e melamina-formaldeído para emprego em painéis estruturais (IWAKIRI *et al.*, 2005).

Os adesivos sintéticos são formados a partir do petróleo e gás natural. Tendo em vista a instabilidade dos preços de combustíveis fósseis e a busca incessante de materiais renováveis, esses adesivos de origem sintética sofrem incerteza do mercado quanto à sua disponibilidade e custo (CARVALHO *et al.*, 2016).

No entanto, outros adesivos alternativos são estudados devido à crescente preocupação ambiental e busca por materiais de origem renovável, como aqueles à base de tanino vegetal

encontrados em cascas, raízes, frutos, sementes e flores de algumas espécies arbóreas, dentre elas a mamona (DIAS, 2005; MELO *et al.*, 2010).

2.3.2 Resina poliuretana à base do óleo de mamona

De acordo com Dias (2005), o óleo é extraído da planta da mamona (*Ricinus communis*), que é abundantemente encontrada nas regiões tropicais e subtropicais do Brasil. Com a mistura do componente feito a partir deste óleo (poliol) e o diisocianato derivado do petróleo (pré-polímero), origina-se uma resina de poliuretano, capaz de realizar o processo de polimerização.

Essa resina é um material que serve como alternativa aos adesivos sintéticos, devido à sua baixa toxicidade e origem renovável. Possui estrutura semi-cristalina, temperatura inicial de degradação a partir de 210-229 °C e temperatura de transição vítrea na faixa de 50-68 °C quando produzidas na proporção 1:1 de poliol e pré-polímero. A transição vítrea é a temperatura na qual o polímero está mudando de fase, sendo que acima desta temperatura as cadeias moleculares se rearranjam, modificando sua estrutura (PEREIRA, 2010; CARVALHO *et al.*, 2014).

Quanto à proporção dos componentes para confecção da resina poliuretana e suas propriedades mecânicas, Pereira (2010) encontrou alta resistência à tração (12,47 MPa) e baixo alongamento na ruptura (16,76mm) nos poliuretanos com a proporção poliol à base da mamona e pré-polímero de 1:1, resultados superiores ao que se encontra quando é aumentado o teor do pré-polímero. Estes valores, juntamente com os trabalhos de Rebelo (2016), Fiorelli *et al.* (2015), Santos (2013) e Barbosa (2016) subsidiaram a escolha desta mesma proporção para o desenvolvimento desta pesquisa.

2.3.2.1 Utilização da resina em compósitos

A quantidade de resina interfere nas propriedades dos compósitos. Por isso, encontram-se diversas pesquisas sobre sua utilização. Rebelo (2016) avaliou o efeito do tratamento alcalino em compósitos com fibras de piaçava, variando a resina entre 15 % e 20 %. Santos (2013) utilizou 15 % para o compósito com resíduos de madeira e fibras de curauá, encontrando resultados físico-mecânicos promissores, enquanto Fiorelli *et al.* (2015) usaram 10 % para seu compósito com fibra de coco e maravalha de *Pinus spp*, apresentando resultados dentro das normas. No entanto, os painéis não foram utilizados para avaliar a condutividade térmica. Cravo *et al.* (2017) analisaram painéis com sacos de cimento reciclados e constataram que é possível reduzir o teor de resina bicomponente à base de óleo de mamona de 15 % para 12 % (em massa), pois não há mudança significativa em índices físicos ou na condutividade térmica.

2.4 PAINÉIS AGLOMERADOS

2.4.1 Classificação e disposição

Os painéis aglomerados podem ser divididos em painéis de partículas ou de fibras, conforme Tabela 5, a qual apresenta um resumo sobre a classificação dos painéis quanto à sua densidade.

Tabela 5 – Classificação de painéis aglomerados

Referência	Densidade (kg/m ³)	Classificação do painel
NBR 14810-1 (ABNT, 2013a)	551 – 750	Partículas de média densidade (MDP)
ASTM D1554 (2016)	160 – 500	Fibra celulósica*
	500 – 1000	Fibra de média densidade (MDF)
	500 – 800	Compensado de média densidade
	> 800	Compensado de alta densidade
	< 640	Partículas de baixa densidade
	640 – 800	Partículas de média densidade (MDP)
	> 800	Partículas de alta densidade
NBR 15316-2 (ABNT, 2015)	450 – 550	<i>Ultralight</i>
	551 – 650	<i>Light</i>
	651 – 800	Fibra de média densidade (MDF)
	> 800	Fibra de alta densidade (HDF)

*Painel não consolidado sobre ação de pressão e temperatura

Para a ASTM D1554 (2016), *Medium-density Fiberboard* (MDF) é um painel composto principalmente por fibras celulósicas, produzido por um sistema de colagem polimerizado sob pressão e temperatura, podendo ter aditivos para a melhoria de certas propriedades. O painel de partículas é definido, de forma genérica, como aquele que é produzido com materiais celulósicos diferentes das fibras, geralmente por pequenas peças ou partículas, que também pode conter aditivos. Este é classificado conforme sua densidade, sendo o de média denominado de *Medium-density Particleboard* (MDP). Os *hardboards* (compensado, no Brasil) são os painéis confeccionados usualmente com fibras oriundas da madeira e classificados entre média e alta densidade.

As normas brasileiras que englobam a classificação desses painéis são: a NBR 14810-1 (ABNT, 2013a), para painéis de partículas, que define a chapa de madeira aglomerada como um produto com espessura entre 3 e 50mm, composto por partículas de madeira que se aglomeram com resinas sintéticas ou naturais, sob um processo de moldagem envolvendo

pressão e temperatura; e a norma NBR 15316-2 (ABNT, 2015) que trata sobre os painéis de fibras, classificando o painel MDF para uso não estrutural em condições secas.

O Brasil está entre os maiores produtores de painéis aglomerados. Em 2017, foi o terceiro maior produtor de painéis MDF e HDF, com uma quantidade aproximada de 4 milhões de m³, à frente de países como Estados Unidos e Rússia e atrás somente da China e Turquia, que produziram 59 milhões e 4,7 milhões de m³, respectivamente (FAOSTAT, 2019b).

2.4.2 Propriedades físicas e mecânicas

As propriedades físicas de umidade e inchamento, e mecânicas, de resistência à flexão estática (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) de painéis aglomerados não estruturais são determinadas por normas brasileiras e variam de acordo com espessura e condição de uso. A Tabela 6 apresenta alguns desses requisitos mínimos (MOR e MOE) e máximos (Umidade e Inchamento) para os painéis de média densidade.

Tabela 6 – Requisitos mínimos ou máximos de propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados

Tipo do painel	Espessura (mm)	Umidade (%)	Inchamento (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
Uso interno em condições secas*	6 – 13	5 – 13	18	11	1800
Uso interno em condições úmidas*	6 – 13	5 – 13	17	15	2050
Uso em condições secas**	9 – 12	4 – 11	15	22	2500

Fonte: Adaptado de NBR 14810-2 (ABNT, 2013b)* e NBR 15316-2 (ABNT, 2015)**

Para a propriedade física de absorção, não constam requisitos mínimos em norma, no entanto, várias pesquisas calculam essa propriedade ao caracterizar seus materiais devido à informação de absorção em massa que ela representa. Rocha (2016) encontrou um valor médio de 23,16 % em painéis com bagaço de cana de açúcar e resíduos madeireiros. Já Mesquita (2018) descobriu valores de 68 % em painéis de partículas de açaí com tratamento alcalino e 83 % sem o tratamento, evidenciando a importância do tratamento químico para materiais lignocelulósicos.

Recentemente, alguns estudos foram realizados com fibras lignocelulósicas e serragem de madeira, em diferentes proporções, conforme Tabela 7. As pesquisas indicam um potencial da utilização destes compósitos como painéis de baixa, média ou alta densidade.

Tabela 7 – Pesquisas realizadas com fibras ou resíduos orgânicos e serragem

Fibra ou resíduo orgânico	Madeira	Proporção fibra/madeira	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Referência
Curauá	Louro e Amapá	50/50	24 – 27	3200 – 3600	Santos (2013)
Coco	Pinus	75/25 50/50 25/75	23 – 26	1600 – 2300	Fiorelli et. al (2015)
Bagaço de cana	Serragem de marcenaria	20/80 30/70 50/50	9 – 12	1800 – 2100	Rocha (2016)
Café	Eucalipto	20/80 30/70 50/50	4 – 6	400 – 550	Scatolino et. al (2017)

2.4.3 Características morfológicas

Um dos fatores que têm sido estudado em compósitos poliméricos é a adesão fibra/matriz, que é a interação com que a resina poliuretana realiza com os componentes celulósicos como a fibra e a madeira. Paula (2017) avaliou a morfologia de compósitos produzidos com 50 % de resina poliuretana de mamona, variando a proporção dos componentes fibras de sisal e serragem de *Pinus*, concluindo que o aumento da quantidade de fibras gerou maior formação de vazios no interior do painel, reduzindo os resultados de resistência mecânica e aumentando os valores de absorção. Além disso, a autora observou que quanto maior a quantidade de serragem, mais homogêneo fica o painel, melhorando a compactação devido às partículas de madeira proporcionarem melhor empacotamento, aumentando assim a densidade.

Sousa (2016) estudou a influência da merceirização da fibra de curauá como reforço em compósitos poliméricos com polihidroxibutirato. O autor chegou a concluir que o tratamento alcalino nas fibras proporcionou aos compósitos melhores propriedades mecânicas de resistência à flexão e ao impacto, comparados ao polímero puro, à medida que aumentava a quantidade do reforço lignocelulósico. No entanto, o máximo teor estudado foi de 20 %. Relata ainda que aqueles compósitos com fibra natural não obtiveram ganho de propriedades mecânicas devido a sua fraca interação entre a superfície da fibra e a matriz do polímero, ocorrendo vários descolamentos da fibra quando se analisaram as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2.4.4 Condutividade térmica

De acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2013c), o conforto térmico é uma sensação psicofisiológica de uma pessoa em relação ao ambiente em que ela está. Esta característica é um componente individual que depende de vários fatores, como taxa metabólica, vestimentas

dos indivíduos, temperatura e velocidade do ar, temperatura radiante e umidade (ASHRAE, 2010). Dentre os parâmetros para mensurar o conforto térmico existem características para avaliação dos materiais, como a condutividade térmica e transmitância térmica.

A quantidade de energia transferida por unidade de tempo é determinada pela lei de Fourier na condução térmica. A taxa de transferência de calor, denominada fluxo térmico (q''_x) em uma determinada área, perpendicular à direção desta transferência, é proporcional à variação de temperatura (dT/dx), conforme a Equação 1. A condutividade térmica (k) é um parâmetro de transporte característico que depende da estrutura física, atômica e molecular da matéria. Sua unidade de medida é em W/mK (INCROPERA *et al.*, 2011).

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

De acordo com Incropera *et al.* (2011), materiais de baixa condutividade térmica combinados produzem um sistema com essa característica ainda menor. Tais materiais são conhecidos como isolantes térmicos, no qual o material se encontra disperso em um espaço que contém ar. Para Wang (1988), valores de condutividade térmica até 0,25 W/mK caracterizam um material como isolante térmico

A Tabela 8 apresenta os valores de densidade e condutividade térmica de alguns materiais da construção civil que são utilizados para isolamento térmico.

Tabela 8 – Densidade e condutividade térmica de alguns materiais

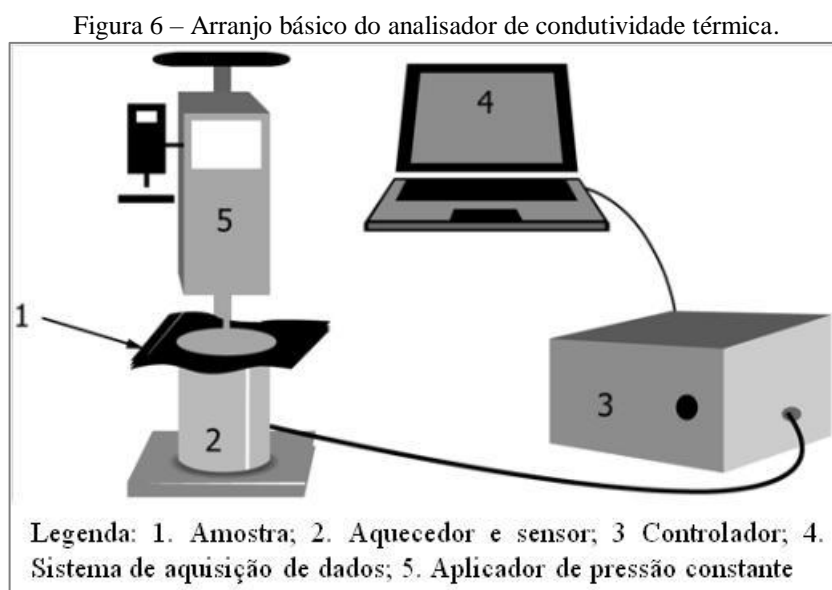
Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)
Aglomerado de fibras de madeira (denso)	850 – 1000	0,20
Aglomerado de partículas de madeira	650 – 750	0,14 – 0,17
Placas de gesso acartonado	750 – 1000	0,35

Fonte: Adaptado da NBR 15220-2 (ABNT, 2005) e Incropera *et al.* (2011)

Existem diferentes maneiras de medir a condutividade térmica, dentre elas as determinadas pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005), que são os métodos do princípio da placa quente protegida e o fluximétrico. O *Laser Flash Analysis* (LFA), equipamento desenvolvido conforme normas americanas, também é outra forma de mensurar tal propriedade. No entanto, estes métodos podem demorar horas para conclusão do ensaio e, além disso, destroem a amostra de ensaio.

A Figura 6 exibe o arranjo básico de funcionamento e os componentes do Analisador de Condutividade Térmica, que segue a norma ASTM D7894 (2016b), no qual uma corrente conhecida é aplicada na amostra, resultando em um aumento da temperatura na interface entre o sensor e a amostra. A condutividade térmica é inversamente proporcional à taxa de aumento

de voltagem captada no sensor. As propriedades térmicas do material analisado são exibidas em tempo real.



Fonte: Adaptado de ASTM D7894 (2016b)

No estudo de painéis com densidade até 600 kg/m^3 e utilização de 15 % de resina poliuretana à base de óleo de mamona, Cravo (2013) encontrou condutividade térmica de $0,29 \text{ W/mK}$ em compósitos com casca de amendoim e fibra de coco, enquanto Cravo *et al.* (2017) descobriram valores de $0,16 \text{ W/mK}$ em placas de partículas produzidas com sacos de cimento. Este mesmo resultado foi obtido por Fiorelli *et al.* (2017) em seus painéis multicamadas com bagaço de cana de açúcar com adição de fibras de curauá.

2.4.5 Fatores que influenciam na produção dos painéis

2.4.5.1 Comprimento das fibras

Um fator relevante para a produção de compósitos com fibras lignocelulósicas é o comprimento da fibra a ser utilizado, pois interfere diretamente em seu comportamento mecânico. De acordo com Silva Filho e Garcez (2007), o menor comprimento necessário para o desenvolvimento das máximas tensões (conhecido como comprimento crítico) influencia no mecanismo de transferência de tensões em um compósito.

Para Silva *et al.* (2014), um comprimento menor que o crítico não gerará ancoragem suficiente, podendo ter as fibras sacadas da matriz, reduzindo propriedades como resistência e tenacidade. Porém, conforme Hassan *et al.* (2010), caso a fibra tenha um comprimento muito maior que o crítico, poderá se aglomerar, causando falhas e, conseqüentemente, reduzindo a resistência, haja vista que as fibras serão incapazes de transferir tensões.

Cada fibra detém um comprimento crítico distinto, dependendo de suas propriedades. Mohanty e Misra (1995) estudaram compósitos com diferentes comprimentos (20, 30, 40 e 50mm) de fibra de palmeira e resina fenol formaldeído, encontrando melhores resultados de resistência à tração e módulo na fibra com 40mm. Monteiro e D'Almeida (2006) utilizaram o ensaio de *pullout* como técnica para avaliar o comprimento crítico de fibras em uma matriz polimérica constituída de poliéster e encontraram para a fibra de coco um valor de 23,79mm. Silva *et al.* (2014) também estudaram o comprimento da fibra de coco, porém, em uma matriz cimentícia, descobrindo também o melhor comprimento de 25mm para a propriedade mecânica de resistência à compressão.

O comprimento crítico da fibra de curauá foi determinado por Monteiro *et al.* (2008), pela metodologia de um ensaio de *pullout* com vários comprimentos em uma matriz de poliéster. O estudo concluiu que o menor comprimento que a fibra deve ter para obter um livre desacoplamento é de 10,20mm e o máximo para que a fibra não desacople da matriz e atinja as melhores características de adesão e resistência ao arrancamento é de 38,83mm.

2.4.5.2 Tratamento das fibras

As fibras vegetais possuem característica hidrofílica, limitando seu uso na produção de compósitos, portanto, as mesmas tem sido objeto de várias pesquisas que buscam, além de melhorar a adesão entre fibra e matriz, diminuir a absorção de água nos compósitos com diferentes tratamentos químicos, como a merceirização, silano, isocianato, permanganato e agentes de acoplamento maleado (CISNEROS-LÓPEZ *et al.*, 2017; LIEW *et al.*, 2017; REBELO, 2016; VERMA; JAIN, 2017).

De acordo com Verma e Jain (2017), o mais amplamente utilizado para a produção de compósitos é o tratamento alcalino (merceirização), no qual a adição de solução de hidróxido de sódio (NaOH) permite criar uma região amorfa, possibilitando maior penetração de produtos químicos e formando novas cadeias moleculares que aumentam a rugosidade da superfície. Conforme Zukowski *et al.* (2018), o tratamento alcalino tem como objetivo remover a hemicelulose e lignina presente na parede celular e aumentar a rugosidade das fibras, melhorando assim sua adesão.

Gomes *et al.* (2004) estudaram o efeito do tratamento alcalino na fibra de curauá em diferentes concentrações e tempos de imersão. Os resultados das principais características avaliadas são apresentados na Tabela 9. Os autores constataram que o diâmetro da fibra diminuiu com o tratamento, com exceção para as fibras tratadas com 5 % em 2h.

Tabela 9 – Resultados de diâmetro, resistência à tração e módulo de elasticidade para fibra de curauá

Tempo de tratamento	0h	1 hora			2 horas		
Concentração de NaOH (%)	0	5	10	15	5	10	15
Diâmetro da fibra (μm)	66,0	58,4	62,9	55,6	94,3	45,8	54,8
Resistência à tração (MPa)	913	736	597	539	842	551	523
Módulo de elasticidade (GPa)	30,3	26,8	22,4	18,9	24	22,1	18,4

Fonte: Adaptado de (GOMES *et al.*, 2004)

Nota-se ainda que o menor decréscimo quanto a resistência à tração foi no tratamento com 5 % de NaOH imerso por 2 horas. Uma redução de aproximadamente 8 %, enquanto as outras amostras reduziram de 19 % a 43 %. Neste mesmo tratamento, o módulo de elasticidade obteve a segunda menor redução (21 %).

Beltrami *et al.* (2014) avaliaram a mesma fibra, com tratamentos em proporções distintas (1, 5 e 10 % de NaOH), aplicada em compósitos com polipropileno. Neste caso, os autores concluíram que o tratamento com 5 % de NaOH durante 2 horas rendeu melhoria nas propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade, resistência à flexão e resistência ao impacto, com aumento de 3 %, 24 %, 30 % e 12 %, respectivamente, quando comparados aos compósitos com fibras não tratadas.

Os estudos apresentados sugerem a viabilidade do uso da fibra de curauá em compósitos poliméricos. Além disso, o tratamento alcalino em fibras naturais vegetais se faz necessário para que haja uma melhor adesão com a matriz polimérica. Dessa forma, as transferências de cargas que são realizadas entre as fibras podem ser melhoradas.

2.4.5.3 Pressão, tempo e temperatura na moldagem

Os painéis de partículas podem ser prensados em diferentes temperaturas e tempos. Segundo Paes *et al.* (2011) esses parâmetros são correlatos e devem ser controlados para garantir que a temperatura da parte interna do painel atinja o nível adequado para a cura da resina. Barbosa (2016) e Rebelo (2016) utilizaram temperatura de prensagem à 100°C por 10min em painéis com resíduos de açaí, com pressão 15 MPa, e piaçava, com pressão de 10 MPa.

Rocha (2016) utilizou a temperatura de prensagem à 100°C e pressão de 3,2 MPa em painéis com aproveitamento de resíduos de madeira e bagaço de cana-de-açúcar, encontrando bons resultados de umidade, tração perpendicular, módulos de ruptura e elasticidade. Cravo *et al.* (2017) e Negrão *et al.* (2014) também utilizaram a mesma temperatura de prensagem, porém com pressão de 5 MPa em painéis aglomerados fabricados com sacos de cimento reciclados e

partículas de madeiras tropicais, respectivamente, encontrando parâmetros dentro das normas nacionais e internacionais.

Os painéis aglomerados com fibras de curauá e resíduos madeireiros foram prensados por Santos (2013) à 100°C e 5 MPa por 10 min. Os resultados encontrados em proporção 50 % de resíduos de madeira e 50 % de fibras de curauá foram promissores para a aplicação em painéis industriais.

2.4.5.4 Umidade da matéria-prima

A umidade das fibras e partículas também influencia na produção de painéis aglomerados. De acordo com Rebelo (2016), quando as fibras são aquecidas durante o processo de prensagem elas tendem a se expandir e contrair por efeito térmico, podendo reduzir a resistência mecânica do compósito. Conforme Rocha (2016), que analisou compósitos com bagaço de cana e serragem, a resina poliuretana de mamona admite teores de umidade dos substratos entre 5 % e 12 %.

Paes *et al.* (2011) utilizaram resíduos de madeira *Pinus elliottii* com umidade a 12 % na produção de painéis de partículas de média densidade. Fiorelli *et al.* (2015) usaram resíduos de *Pinus spp* com adição de fibra de coco com umidade máxima de 10 %. Os pesquisadores aplicaram a resina poliuretana à base de óleo de mamona e encontraram resultados em conformidade com normas brasileiras e americanas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

As fibras de curauá em estado natural (Figura 7a) foram obtidas na empresa Pematec Triangel do Brasil Ltda, na cidade de Santarém/PA. O resíduo de madeira (Figura 7b) em formato de serragem foi doado pela Madeireira Coming (Manaus/AM). Este material é proveniente da serragem de diversas espécies de madeira, sendo as principais ipê, angelim, jatobá e amapá. A resina bicomponente poliuretana à base de óleo de mamona (Figura 7c) é oriunda da empresa Plural Indústria de Comércio de Produtos Químicos Ltda, da cidade de São Carlos/SP, sendo composta por dois componentes, o polioli e o pré-polímero.

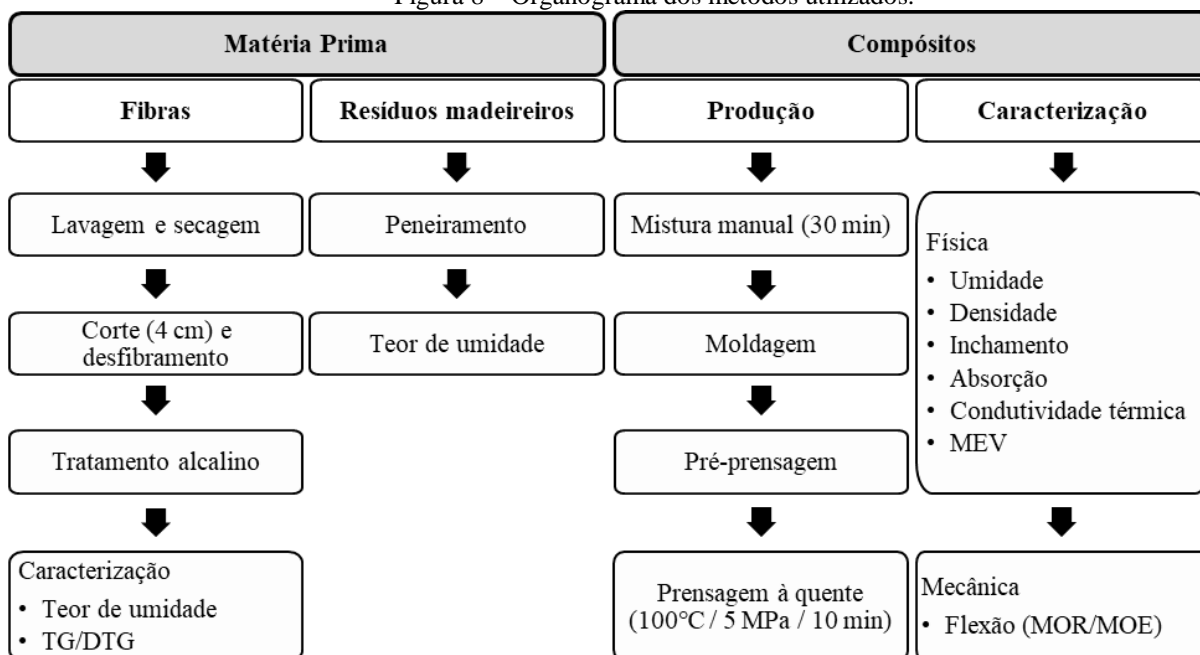
Figura 7 – Materiais: a) Fibra de curauá; b) Resíduos de madeira; c) Resina: (i) polioli e (ii) pré-polímero.



3.2 MÉTODOS

Os métodos de processamento da matéria-prima, produção do compósito e de sua caracterização seguiram conforme o organograma da Figura 8.

Figura 8 – Organograma dos métodos utilizados.



3.2.1 Processamento da matéria prima

Os processos de lavagem, secagem e tratamento das fibras, assim como o peneiramento dos resíduos madeireiros foram realizados na Universidade Federal do Amazonas (UFAM), no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LaMAC).

3.2.1.1 Tratamento alcalino da fibra de curauá

As fibras de curauá foram lavadas com água corrente e expostas ao sol. Após secagem, foram penteadas com escova de aço, cortadas em comprimento aproximado de 4 cm e desfiadas para que ficassem soltas e fossem retirados vestígios de sujidade. Tais procedimentos foram baseados no processamento das fibras utilizado por Leal Neta *et al.* (2015) e no comprimento máximo crítico encontrado por Monteiro *et al.* (2008).

Para a determinação do tratamento alcalino mais adequado a ser utilizado na produção dos painéis foram realizados dois tratamentos preliminares nas fibras de curauá. Aproximadamente 100 gramas de fibras foram tratadas em solução de hidróxido de sódio em massa com tempo de imersão distintos, conforme os parâmetros da Tabela 10. Após a imersão, as fibras tratadas foram lavadas com água até a obtenção de pH neutro, expostas ao sol por 4h para a retirada de umidade inicial e colocadas em estufa a 60°C por 24h para a secagem.

Tabela 10 – Parâmetros do tratamento alcalino nas fibras

Nomenclatura	Concentração NaOH (em massa)	Tempo de imersão
Sem tratamento	0 %	-
5 % NaOH – 2h	5 %	2 horas
10 % NaOH – 1h	10 %	1 hora

As fibras de curauá utilizadas na produção dos painéis de poliuretano foram aquelas tratadas em solução de NaOH a 5 % em massa e tempo de imersão de 2 horas.

3.2.1.2 Peneiramento do resíduo de madeira

Para a produção dos compósitos foram utilizados os resíduos madeireiros em uma distribuição de tamanho de 0,425 mm e 0,250 mm, selecionados por meio das peneiras Tyler 35 e 60 Mesh.

3.2.2 Caracterização da matéria prima

A análise térmica das fibras e os ensaios de teor de umidade dos componentes principais do compósito foram realizados no LaMAC/UFAM.

3.2.2.1 Análise térmica da fibra

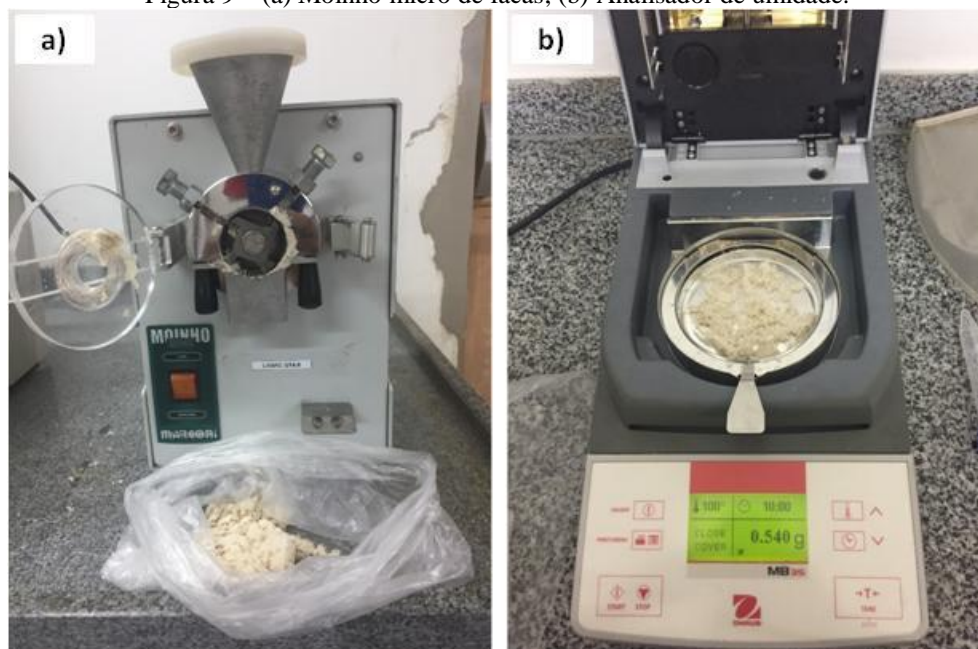
As amostras foram avaliadas em um analisador térmico, marca TA Instruments, modelo SDT Q600, utilizando método dinâmico com razão de aquecimento $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até a temperatura 600°C em atmosfera inerte de nitrogênio.

3.2.2.2 Teor de umidade das partículas

Para medida do teor de umidade, as fibras tratadas e sem tratamento foram moídas em um moinho micro de facas, marca MARCONI, modelo MA048 (Figura 9a).

A análise da umidade das partículas foi realizada com 3 amostras com massa aproximada de 1g para cada um dos componentes (fibra e resíduos madeireiros) separadamente em um analisador de umidade halógeno, marca OHAUS, modelo MB35 (Figura 9b), antes da confecção dos compósitos, obtendo sua média aritmética simples.

Figura 9 – (a) Moinho micro de facas; (b) Analisador de umidade.



3.2.3 Produção dos compósitos

Para a produção dos compósitos, primeiramente calculou-se a massa necessária para uma placa de média densidade, buscando-se alcançar um valor inferior a $800 \text{ kg}/\text{m}^3$, limite superior da ASTM D1554 (2016). De acordo com Paes *et al.* (2011), dependendo da temperatura e pressão aplicada, a densidade final do painel sofre variações. Portanto, buscando classificar o compósito como painel de média densidade, estimou-se a massa dos componentes para obtenção de uma densidade teórica de $700 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Considerando-se que o molde para produção dos painéis tem dimensões de 28 x 28 x 1 cm, obteve-se para o cálculo de massa do material seco (Equação 2):

$$D = \frac{M}{V} \rightarrow 0,70 = \frac{M}{28 \times 28 \times 1} \rightarrow m = 548,80g \approx 550g \quad (2)$$

Onde,

D = densidade (g. cm⁻³)

M = massa (g)

V = volume (cm³)

As placas foram produzidas em cinco diferentes proporções (Tabela 11), variando seus componentes de reforço (fibras de curauá e resíduos madeireiros) e matriz (resina poliuretana à base do óleo de mamona), sendo que para o painel de referência (T0), as fibras de curauá não receberam tratamento alcalino. A quantidade mínima de resina utilizada, na proporção 1:1 (poliol:pré-polímero), foi de 15 % em massa, visto que em menores proporções houve dificuldade na homogeneização do painel.

Tabela 11 – Composição das placas em percentual

Tratamento	Fibra de curauá (%)	Resíduo de madeira (%)	Proporção Reforço / Matriz (%)
T0*	50	50	82,5 / 17,5
T1	25	75	85 / 15
T2	25	75	80 / 20
T3	50	50	82,5 / 17,5
T4	75	25	80 / 20

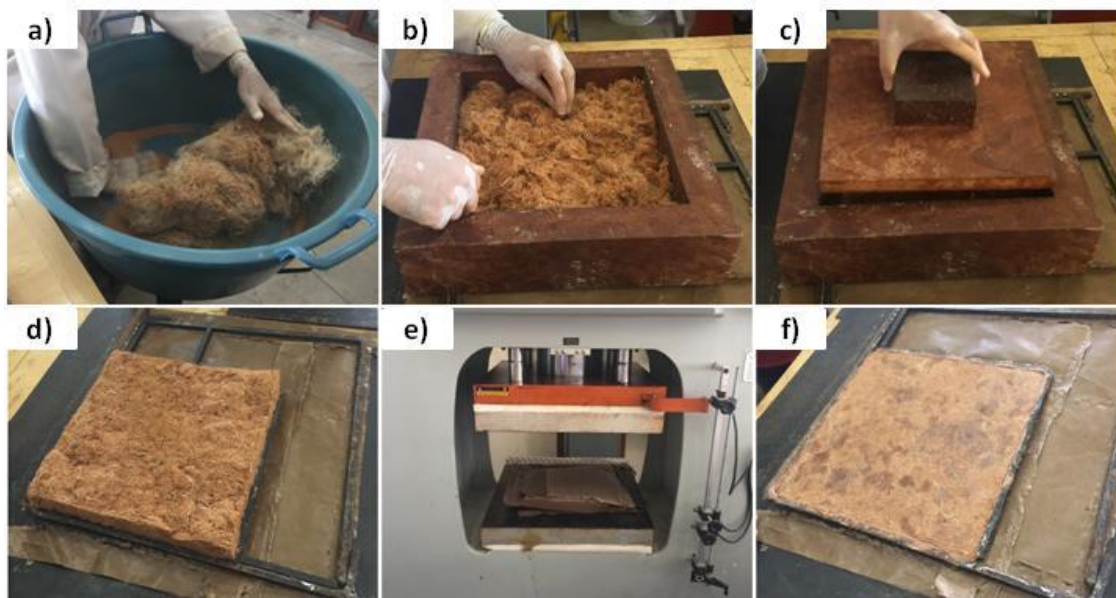
*No compósito de referência, as fibras de curauá não passaram por tratamento alcalino.

3.2.3.1 Processo de produção dos compósitos

A matéria-prima foi misturada manualmente (Figura 10a) com a resina bicomponente sendo adicionada ao resíduo de madeira e fibras de curauá previamente misturados entre si, em um processo que durou, aproximadamente, 30 minutos. A mistura foi acondicionada dentro dos moldes metálico/madeira (Figura 10b) e recebeu uma pré-prensagem manual para formação de colchão, conforme Figura 10c e Figura 10d, respectivamente. Posteriormente, foi colocada em uma prensa hidráulica (Figura 10e), marca HIDRAL-MAC, modelo PHH 100 T, com temperatura aproximada de 100°C, pressão de 50 bar (5 MPa) e por um período de 10 minutos. De acordo com Fiorelli *et al.* (2017), este tempo e temperatura são suficientes para o processo de polimerização da resina. O papel teflon foi utilizado para que o compósito não aderisse nas

chapas metálicas da máquina e a cera com carnaúba auxiliou no processo de desmolde da placa prensada (Figura 10f).

Figura 10 – Etapas de produção da placa: (a) Mistura dos componentes; (b) Material dentro do molde; (c) Pré-prensagem manual; (d) Colchão formado após pré-prensagem; (e) Chapa na prensa hidráulica; (f) Paineis compósito prensado.



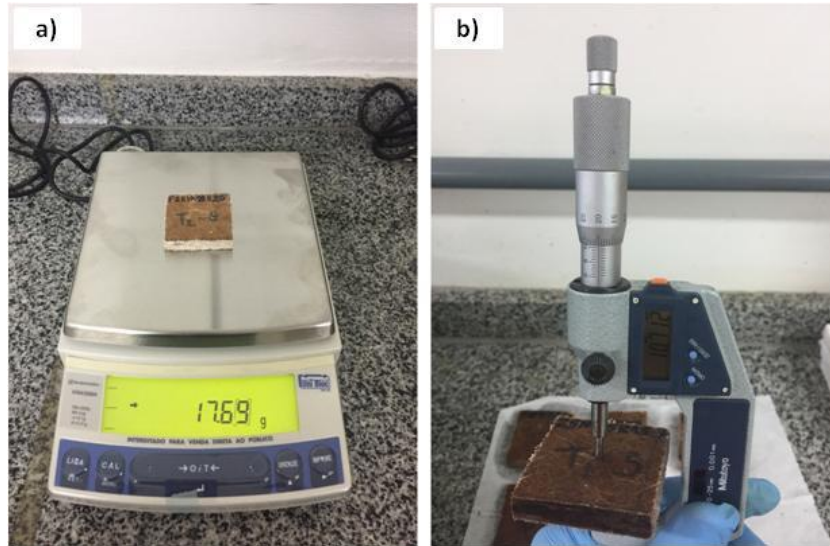
3.2.4 Caracterização física dos compósitos

Os ensaios de caracterização física de densidade, umidade, inchamento e absorção foram realizados no LaMAC/UFAM, conforme a NBR 14810-2 (ABNT, 2013b). As dimensões e determinação da massa foram realizadas com paquímetro digital marca Carbografite e balança semi-analítica Shimadzu UX6200H (

Figura 11a) com precisão de 0,01 mm e 0,01 g, respectivamente. A espessura dos corpos de prova foi aferida utilizando um micrômetro digital, marca Mitutoyo (

Figura 11b), com precisão de 0,001 mm.

Figura 11 – (a) Balança semi-analítica; (b) Micrômetro digital.



Para a análise estatística foram realizadas, em cada tratamento, 8 repetições. Os dados foram tratados por análise de variância (ANOVA), com aplicação de nível de significância de 5 % pelo método de Tukey, com auxílio do software Assistat.

3.2.4.1 Umidade

Os corpos de prova tiveram suas massas úmidas determinadas e então permaneceram acondicionados em estufa à temperatura $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ para secagem até obtenção de massa constante, seguindo a metodologia descrita na NBR 14810-2 (ABNT, 2013b). Em seguida, foram acondicionados em dessecador, até seu resfriamento e tiveram sua massa seca registrada em balança semi-analítica.

Para o cálculo da porcentagem do teor de umidade dos painéis, utilizou-se a Equação 3 para obtenção do resultado referente à média dos corpos de prova.

$$U \% = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (3)$$

Onde,

$U \% =$ teor de umidade (%)

$MU =$ massa úmida do corpo de prova (g)

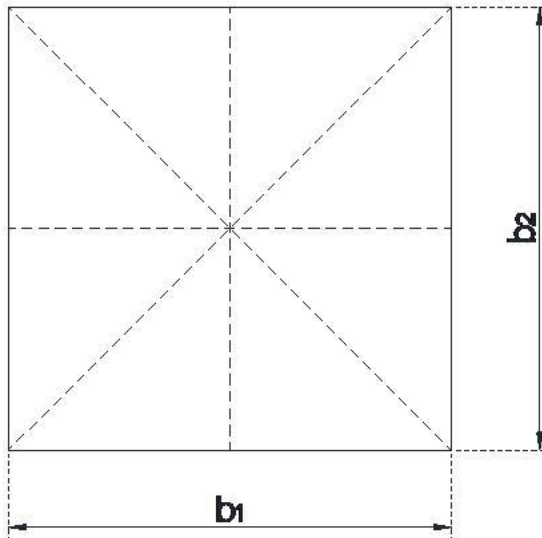
$MS =$ massa seca do corpo de prova (g)

3.2.4.2 Densidade

Os mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de umidade foram aproveitados para o ensaio de densidade, colocando-os novamente em estufa para obtenção de massa constante conforme NBR 14810-2 (ABNT, 2013b). Cada um deles teve seus respectivos valores de

espessura, dimensões e massa determinados. A espessura foi medida na interseção das diagonais e as dimensões conforme Figura 12.

Figura 12 – Pontos de aferição no corpo de prova para ensaio de densidade.



Fonte: (ABNT, 2013b)

O cálculo da densidade foi realizado conforme as Equações 4 e 5.

$$D = \frac{M}{V} \times 1000000 \quad (4)$$

Sendo,

$$V = B_1 \times B_2 \times E \quad (5)$$

Onde,

D = densidade do corpo de prova (kg/m^3)

M = massa do corpo de prova (g)

V = volume do corpo de prova (mm^3)

B_1 e B_2 = dimensões do corpo de prova (mm)

E = espessura do corpo de prova (mm)

Em seguida, calculou-se a densidade média ($D_{\text{média}}$) e a variação percentual da densidade ($D\%$) de cada um dos corpos de prova em relação à $D_{\text{média}}$, utilizando a Equação 6:

$$D\% = \frac{D - D_{\text{média}}}{D_{\text{média}}} \times 100 \quad (6)$$

3.2.4.3 Inchamento e Absorção

Com as massas e espessuras previamente determinadas, os corpos de prova utilizados no ensaio de densidade foram colocados imersos em água deionizada e mantidos à temperatura aproximada de 22°C em um recipiente plástico. Após 24 horas de imersão, os corpos de prova foram retirados e tiveram seu excesso de água removido com papel absorvente. As respectivas massas e espessura foram novamente mensuradas. Os ensaios seguiram as normas NBR 14810-2 (ABNT, 2013b) para o inchamento e os cálculos da NBR 14810-3 (ABNT, 2006) para a absorção.

Para o cálculo de inchamento, a Equação 7 foi utilizada e para absorção a Equação 8, obtendo-se suas respectivas médias.

$$I = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100 \quad (7)$$

Onde,

I = inchamento em espessura do corpo de prova (%)

E_1 = espessura do corpo de prova após imersão (mm)

E_0 = espessura do corpo de prova antes da imersão (mm)

$$A = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (8)$$

Onde,

A = absorção em massa do corpo de prova (%)

M_1 = massa do corpo de prova após imersão (mm)

M_0 = massa do corpo de prova antes da imersão (mm)

3.2.4.4 Condutividade térmica

O ensaio de condutividade térmica dos painéis foi realizado no Laboratório de Materiais (LABMAT), na UFAM, em um analisador de condutividade TCi C-Therm (Figura 13), com capacidade para obter resultados de condutividade térmica na faixa de 0 a 500W/mK.

Figura 13 – Analisador de condutividade térmica.



As amostras dos compósitos produzidos com medidas aproximadas de 50 x 50 x 10 mm foram lixadas em uma politriz na sequência de lixas 80, 120, 400 e 600 e revestidas com resina acrílica incolor. O objetivo deste processamento foi reduzir a rugosidade dos compósitos para que não influenciasse no ensaio, haja vista que o equipamento realiza uma medição na superfície do compósito. Os ensaios foram realizados em temperatura de $26 \pm 1^\circ\text{C}$.

Para a análise estatística foram realizadas, em cada tratamento, 30 repetições, conforme recomendação do fabricante, para estabilização das aferições. Os dados foram tratados por análise de variância (ANOVA), com aplicação de nível de significância de 5 % pelo método de Tukey, com auxílio do software Assistat.

3.2.4.5 Microscopia eletrônica de varredura

O ensaio de MEV foi realizado no Laboratório Temático de Microscopia Ótica e Eletrônica, no Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas (LTMOE/INPA) em um microscópio eletrônico de varredura TESCAN VEGA3 em alto vácuo. As amostras, uma de cada composição, foram cortadas em dimensões aproximadas de 10 x 10 x 5 mm. A superfície na qual as imagens foram realizadas são da parte lateral do compósito (espessura) após corte e lixamento em politriz na sequência de lixas 80, 120, 400 e 600.

3.2.5 Caracterização mecânica dos compósitos

O ensaio de caracterização mecânica de resistência à flexão estática foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e estão conforme a NBR 14810-2 (ABNT, 2013b).

Os corpos de prova medindo 250 x 50 mm foram colocados em estufa até obtenção de massa constante. As medidas de espessura foram obtidas com micrômetro digital em seis pontos distribuídos entre as duas extremidades e centro do corpo de prova e a largura foi mensurada com um paquímetro digital em três posições, sendo uma no centro e duas nas extremidades.

Para a análise estatística foram realizadas, em cada tratamento, 7 repetições. Os dados foram tratados por análise de variância (ANOVA), com aplicação de nível de significância de 5 % pelo método de Tukey, com auxílio do software Assistat.

Utilizou-se uma máquina de ensaios, marca Instron, modelo 5982, com capacidade de carga 100 kN (

Figura 14). Aplicou-se velocidade constante de 10 mm/min e foram obtidos resultados de deslocamento e deflexão.

Figura 14 – Máquina para ensaio de flexão.



3.2.5.1 Flexão estática em 3 pontos

Para o cálculo da resistência à flexão estática, utilizou-se a Equação 9 da NBR 14810-2 (ABNT, 2013b), obtendo-se sua respectiva média.

$$MOR = \frac{1,5 \times P \times D_i}{B \times E^2} \quad (9)$$

Onde,

MOR = módulo de resistência à flexão estática (N/mm²)

P = carga de ruptura (N)

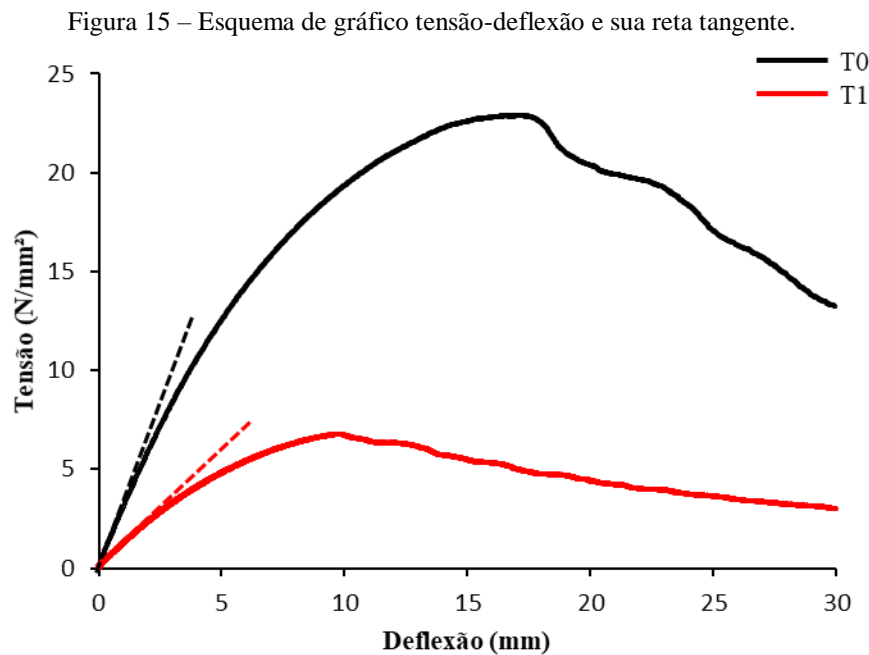
Di = distância entre apoios do aparelho (mm)

B = largura do corpo de prova (mm)

E = espessura do corpo de prova (mm)

3.2.5.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi calculado conforme a inclinação da reta tangente da curva apresentada nos gráficos de tensão-deflexão. A Figura 15 apresenta um esquema do gráfico realizado para cálculo do MOE das amostras, considerando a reta tangente característica do MOE, representada pela linha tracejada.

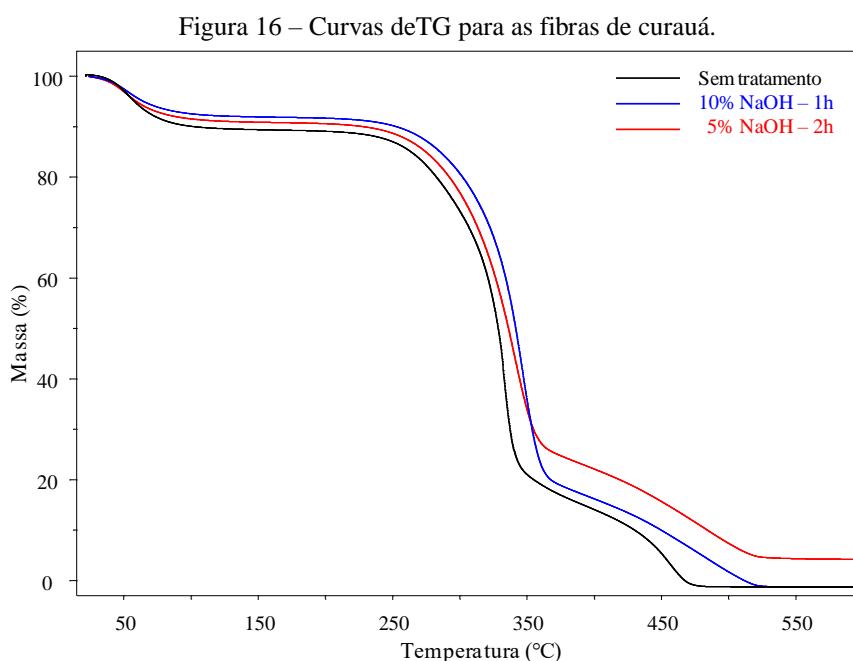


4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

4.1.1 Análise térmica da fibra

As curvas de termogravimetria (TG) e a derivada da termogravimetria (DTG) das fibras de curauá sem tratamento e com tratamento alcalino com concentrações em massa de 5 % e 10 % de NaOH são apresentadas nos gráficos da Figura 16 e Figura 17, respectivamente. A Tabela 12 apresenta os percentuais de perda de massa e as faixas de temperaturas de degradação em cada evento.



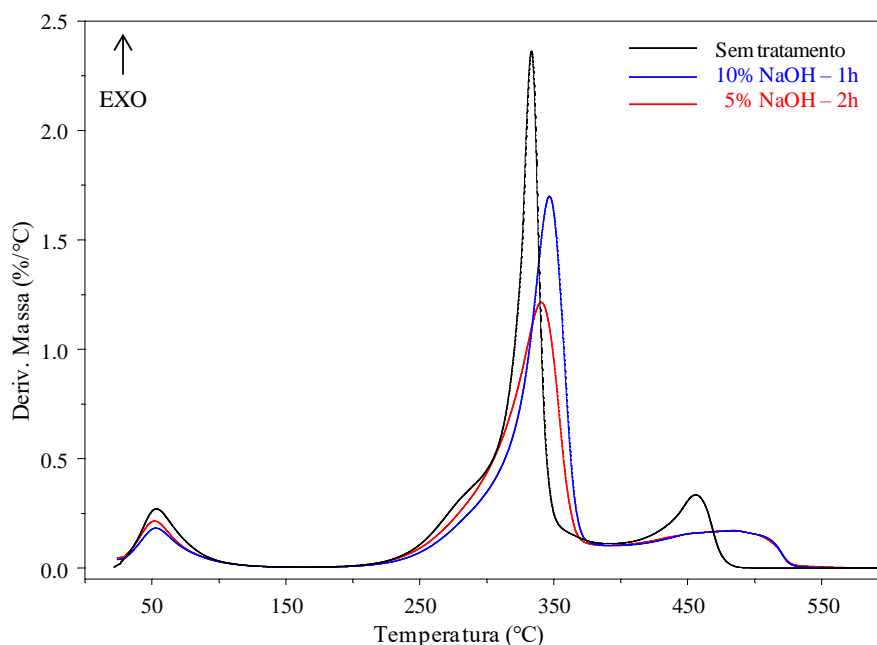
Os resultados indicam que houve um aumento na temperatura inicial de degradação térmica em aproximadamente 12 % nas fibras com tratamento em 5 % de NaOH e 10 % naquelas tratadas com 10 % NaOH, similar ao que fora observado por Gehlen (2014) e Corrêa *et al.* (2010). Tal comportamento pode ser atribuído devido à baixa temperatura de decomposição dos componentes não celulósicos removidos, como a lignina e hemicelulose.

A partir de 350°C as fibras tratadas com 5 % NaOH demonstram melhor estabilidade térmica, pois possuem menor perda de massa comparada à amostra tratada a 10 % de NaOH. Beltrami *et al.* (2014) observaram o mesmo comportamento, no qual as fibras tratadas com menor teor de NaOH obtiveram melhor estabilidade térmica a partir desta temperatura.

Nas curvas de DTG a ocorrência dos eventos térmicos fica mais evidente, sendo possível perceber os eventos referentes à perda de umidade e degradações da holocelulose e lignina.

O primeiro evento ocorre na faixa de temperatura de 25°C à 125°C, referente à umidade presente nas fibras. A faixa de degradação da holocelulose se encontra entre 200°C e 380°C, semelhante aos resultados encontrados por Santos (2013) e Gehlen (2014), sendo que até 300°C se observa o evento referente à presença de hemicelulose (SANTOS, 2013), que é mais visível na fibra sem tratamento.

Figura 17 – Curvas de DTG para as fibras de curauá.



Na faixa de 250°C à 300°C, o evento relacionado a perda da hemicelulose é perceptível pois o ombro desaparece para as fibras tratadas, sugerindo que o tratamento alterou a estabilidade térmica do componente. De acordo com Leal Neta *et al.* (2015), a lignina se decompõe parcialmente em temperatura aproximada de 450°C, o que foi comprovado pelo gráfico da Figura 17. A degradação é mais lenta e menos intensa para as fibras tratadas e a separação dos eventos térmicos na faixa de temperatura para temperaturas mais altas se mostra contínua e suave, sem nítida definição de separação entre os eventos.

Segundo Zukowski *et al.* (2018), o tratamento alcalino possui a função de remover os componentes hemicelulose e lignina da fibra, aumentando assim o seu teor de celulose, o que tende a atribuir maior resistência mecânica para as mesmas, haja vista o seu melhor remanejamento das cadeias de celulose.

Tabela 12 – Perda de massa e temperatura de degradação das fibras de curauá

Nomenclatura	1º evento		2º evento		3º evento	
	Faixa de temperatura (°C)	Perda de massa (%)	Faixa de temperatura (°C)	Perda de massa (%)	Faixa de temperatura (°C)	Perda de massa (%)
Sem tratamento	25 – 125	10,6	200 – 380	73,2	400 – 500	17,1
5 % NaOH – 2h		8,3		66,0		17,9
10 % NaOH – 1h		7,7		73,9		17,2

Com base nas perdas de massa (Tabela 12), observou-se que a fibra tratada com concentração de 5 % NaOH mostrou perda inferior no processo de degradação da celulose, sugerindo maior estabilidade térmica. Portanto, avaliando as análises termogravimétricas e observando que o tratamento alcalino obteve eficiência na remoção dos componentes hemicelulose e lignina, adotou-se para a produção dos compósitos, o tratamento com concentração de 5 % de NaOH (m/m) imerso por um período de 2 horas.

4.1.2 Teor de umidade das partículas

A umidade das fibras e do resíduo de madeira foi analisada individualmente antes da produção dos compósitos, obtendo resultados conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Teor de umidade dos componentes

Nomenclatura	Teor de umidade (%)	Desvio padrão
Fibra de curauá natural	8,89	0,34
Fibra de curauá tratada (5 % NaOH)	8,01	0,49
Resíduo de madeira	11,89	1,04

A metodologia adotada para o tratamento e processo de secagem das fibras de curauá manteve seu teor de umidade próximo ao seu estado natural. Os valores são superiores aos encontrados por Gehlen (2014), que obteve um valor de 5,5 %. Contudo, a autora também não encontrou diferenças no teor de umidade das fibras após o tratamento.

De acordo com Rocha (2016), a resina poliuretana de mamona admite teores de umidade dos substratos entre 5 % e 12 %. Portanto, nesta pesquisa, os resíduos de madeira não passaram por tratamento térmico para a redução da umidade, devido à sua proximidade com este valor.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

4.2.1 Caracterização física

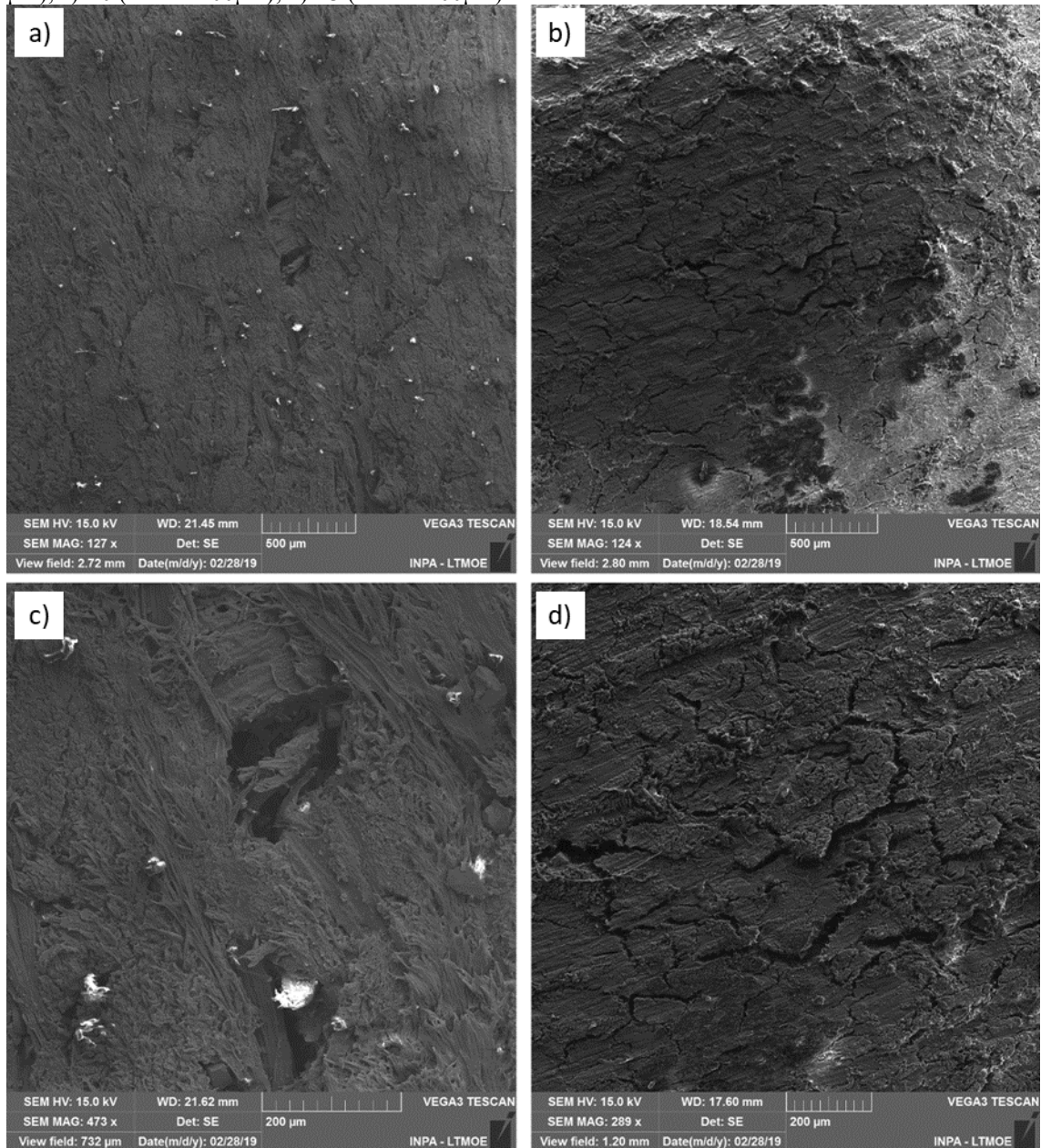
4.2.1.1 Microscopia eletrônica de varredura

Conforme Sousa (2016), a formação de bolhas pode ser prejudicial às propriedades físicas e mecânicas do compósito devido à acumulação de tensões em um determinado ponto. No entanto, pela Figura 18a é possível perceber uma boa homogeneidade da morfologia na superfície do compósito T0, no qual a fibra não foi tratada, o que pode ocasionar a melhor distribuição das tensões na matriz, confirmado pelos bons resultados mecânicos deste compósito. Porém, a Figura 18b apresenta indícios de falhas de adesão na superfície do compósito, provavelmente ocasionado pelo tratamento alcalino na fibra de curauá, que proporcionou o aumento da porosidade nas fibras, criando mais vazios e retendo maior quantidade de água, como fora observado pelo resultado de absorção. Sendo assim, pelas características das microscopias analisadas, espera-se que as propriedades mecânicas tenham melhor resultado no compósito sem o tratamento na fibra, haja vista a melhor distribuição de tensões entre os componentes lignocelulósicos e a matriz polimérica.

Além disso, é possível observar pela ampliação da imagem do painel T0 (Figura 18c), que apesar do vazio encontrado, observou-se uma boa dispersão dos componentes, sendo que não foi possível identificar o resíduo madeireiro ou aglomerações do mesmo, o que pode indicar a obtenção de uma massa homogênea na qual o resíduo madeireiro estaria acoplado às fibras e sendo recoberto pela resina. Na Figura 18d se destaca a presença de falhas de adesão que podem ter comprometido tanto a resistência mecânica quanto a absorção de água do compósito T3. Contudo, Mesquita (2018) encontrou morfologia distinta em compósitos com açáí e resina poliuretana de mamona, nos quais aqueles com tratamento com concentração de 0,5 % de NaOH demonstraram menores vazios entre a resina e as partículas. Tal fato pode ter sido

ocasionado pela melhor compactação do material particulado neste compósito e pela absorção inferior da partícula quando comparada às fibras.

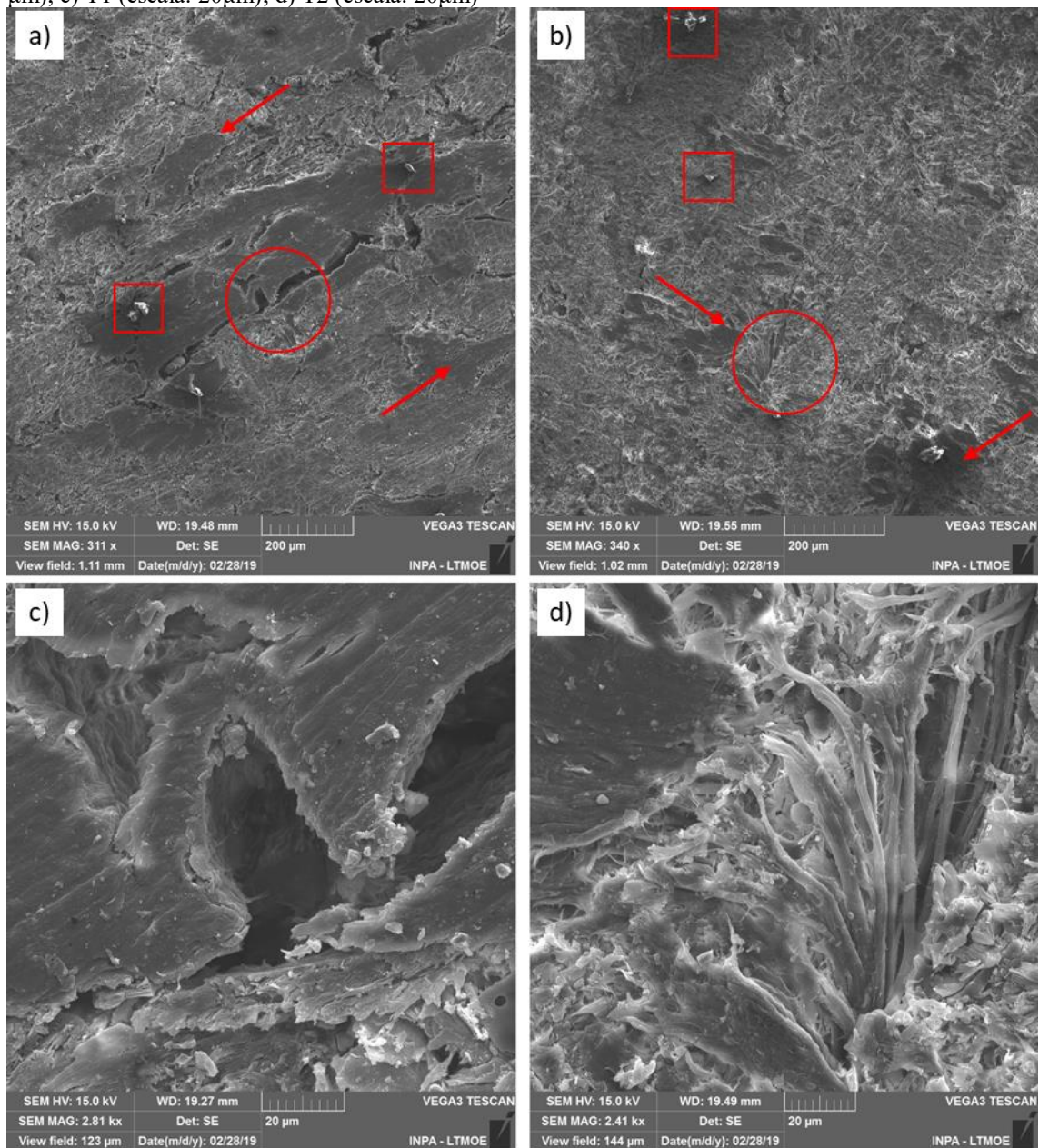
Figura 18 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: a) T0 (escala: 500 μ m); b) T3 (escala: 200 μ m); c) T0 (escala: 200 μ m); d) T3 (escala: 200 μ m)



As setas indicadas na Figura 19a e Figura 19b, referente ao MEV dos painéis T1 e T2, respectivamente indicam regiões de domínio da fase matriz nestes compósitos, demonstrando falha na homogeneidade na mistura. Além disso, a área indicada pelos quadrados é relatada por Sousa (2016) como formação de bolhas, que pode atuar na concentração de tensões e ser prejudicial ao comportamento mecânico. A formação de vazios foi detectada em alguns pontos do painel T1, onde a região com predominância da fase matriz mostra espaços vazios da vizinhança a qual aparenta ser composta por fibra e resina, mostrando falhas de aderência entre

as fases, como é possível averiguar na Figura 19c. Alguns fatores relacionados aos mecanismos da polimerização podem contribuir para a formação destes vazios na região polimérica, que envolve a contração típica da formação do polímero bem como a formação de gases CO_2 durante a reação e desprendimento de vapor de água (MARINHO et al., 2013). No entanto, a Figura 19d mostra em destaque uma região onde são visualizadas as microfibrilas recobertas pela matriz, o que possivelmente gerou melhorias em suas propriedades mecânicas.

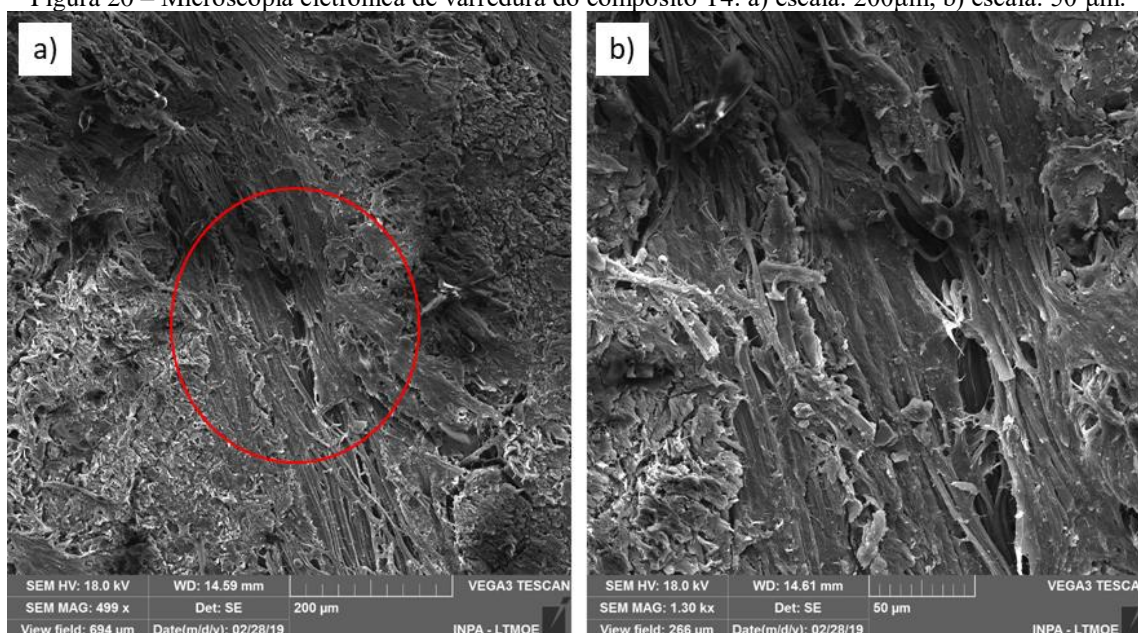
Figura 19 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: a) T1 (escala: 200 μm); b) T2 (escala: 200 μm); c) T1 (escala: 20 μm); d) T2 (escala: 20 μm)



A Figura 20a exibe o MEV do compósito T4, que detém o maior volume de fibras. No entanto, não são visualizadas aglomerações de fibras, sugerindo uma boa homogeneização

apesar do processo manual de mistura. Pela Figura 20b é possível observar que a resina poliuretana proporcionou boa adesão ao encobrir as fibras tratadas, porém, também se nota a grande quantidade de vazios, justificando a alta absorção deste compósito. Paula (2017) analisou a microscopia de painéis poliméricos com fibras de sisal e serragem aglutinados com resina poliuretana de mamona. A autora relatou a dificuldade na homogeneização de compósitos com maior volume de fibras e confirmou que a formação de vazios nestes aumentou a absorção de água quando comparados àqueles com menor teor de fibras.

Figura 20 – Microscopia eletrônica de varredura do compósito T4: a) escala: 200µm; b) escala: 50 µm.

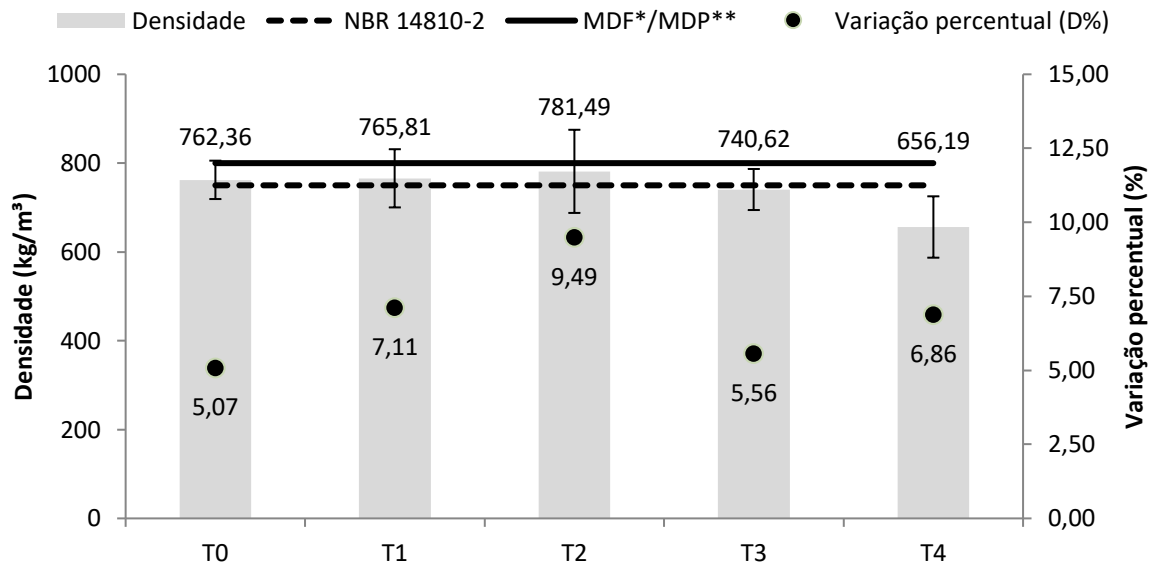


4.2.1.2 Densidade

O aumento da densidade do valor planejado foi esperado, pois conforme previsto e ainda segundo Paes *et al.* (2011), a aplicação de pressão e temperatura causa melhor compactação. Os valores de densidade indicam que os painéis ensaiados podem ser classificados como MDF pela NBR 15316-2 (ABNT, 2015) ou MDP, pela ASTM D1554 (2016). No entanto, quanto à NBR 14810-1 (ABNT, 2013a), somente os painéis T3 e T4 podem ser considerados como média densidade, enquanto os demais são de alta densidade, conforme é possível observar na Figura 21.

Nota-se que para os painéis T1 e T2, nos quais se mantém a quantidade de materiais secos, o aumento na quantidade de resina não interferiu na densidade. Analisando os compósitos de mesmas proporções, porém com a diferença no tratamento das fibras (T0 e T3), observou-se que o tratamento com hidróxido de sódio nas fibras de curauá não interferiu na densidade do compósito.

Figura 21 – Densidade, variação percentual e limites superiores das normas.

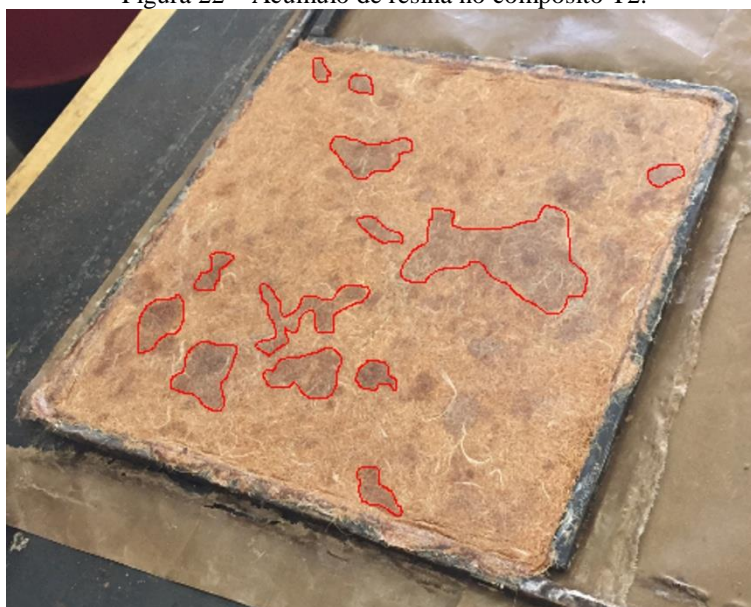


Fonte: *NBR 15316-2; **ASTM D1554-10(16)

Porém, em T4, o maior volume de fibras dificultou a homogeneização para a quantidade de resina aplicada. Tal comportamento fora observado por Paula (2017) em compósitos com resina de mamona, fibras de sisal e serragem. Além disso, a autora concluiu que a densidade se eleva conforme o aumento da quantidade de serragem. Corroborando com isso, Verma e Jain (2017) afirmam que a baixa densidade é uma propriedade característica das fibras vegetais, o que propiciou neste compósito a redução desta propriedade, haja vista ser a proporção com maior quantidade de fibras.

As maiores variações percentuais foram encontradas em T1 (7,11 %) e T2 (9,49 %), superior ao valor solicitado pela NBR 14810-2 (ABNT, 2013b) e NBR 15316-2 (ABNT, 2015) como requisito máximo, de ± 7 %. Estes resultados indicam que o aumento da proporção de resíduos madeireiros dificulta a homogeneidade dos compósitos, o que fora perceptível pelo acúmulo de resina destacado nestas placas (Figura 22).

Figura 22 – Acúmulo de resina no compósito T2.



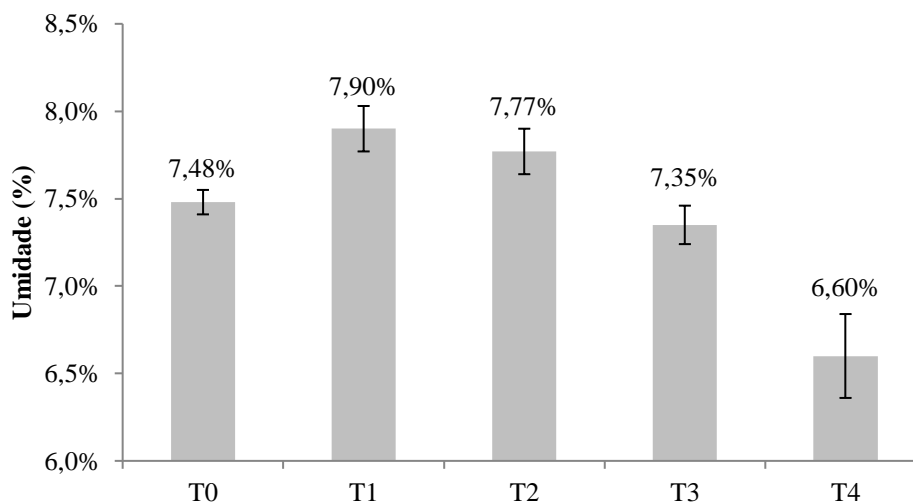
Os valores encontrados na pesquisa podem ser comparados com a literatura. Barbosa (2016) estimou seu painel com caroço de açaí em 800 kg/m^3 e encontrou densidades superior ao esperado. Rebelo (2016) seguiu a mesma estimativa, mas obteve resultados mais próximos ao planejado para os compósitos com fibras de piaçava tratada. Com resíduos de madeiras amazônicas e *Pinus taeda*, Iwakiri *et al.* (2016) encontraram uma pequena variação de 695 a 757 kg/m^3 para seus painéis estimados em 750 kg/m^3 .

A variação da pressão, temperatura e, além disso, o tipo de material evidencia que esses parâmetros precisam ser bem estudados e controlados para que se obtenha a densidade desejada (NEGRÃO *et al.*, 2014; PAES *et al.*, 2011). Logo, o planejamento quantitativo apresentado neste estudo se mostrou eficiente, haja vista que as densidades obtidas foram inferiores a 800 kg/m^3 , conforme planejado.

4.2.1.3 Umidade

A umidade nos painéis com menor proporção de fibras (T1 e T2) não diferem entre si, inferindo que o aumento na quantidade de resina não interfere nesta propriedade. No entanto, quando se aumenta o teor de fibras no compósito, a umidade decresce, como é possível observar pelo resultado de T4, como é possível observar na Figura 23. Tal fato pode ser explicado pela umidade das partículas antes da produção dos painéis, no qual as fibras possuíam menor umidade inicial do que os resíduos de madeira. Analisando a influência do tratamento alcalino na fibra, notou-se que este fator não interfere nesta característica, tendo em vista os resultados entre T0 e T3, os quais não diferem estatisticamente entre si.

Figura 23 – Resultados de umidade dos compósitos.



Todos os painéis ensaiados ficaram entre os limites da NBR 14810-2 (ABNT, 2013b), de 5 % a 13 % e da NBR 15316-2 (ABNT, 2015), de 4 % a 11 %, atendendo aos requisitos gerais para painéis de média densidade.

4.2.1.4 Inchamento e Absorção

O aumento da quantidade de resina não se mostrou como uma propriedade que interfere nos resultados de inchamento e absorção, como é possível observar entre os painéis T1 e T2 (Figura 24). No entanto, evidencia-se uma tendência para a redução desses valores com o aumento da resina, assim como fora avaliado por Barbosa (2016), que concluiu que os valores de inchamento reduziram conforme o aumento da resina em painéis com caroços de açaí e Rebelo (2016), que analisou esse efeito em painéis com fibra de piaçava, atribuindo a este mesmo desempenho o caráter hidrofóbico da matriz poliuretana. Cravo *et al.* (2017) estudaram painéis confeccionados com sacos de cimento reciclados, nos quais o inchamento também reduziu conforme o aumento do teor de resina.

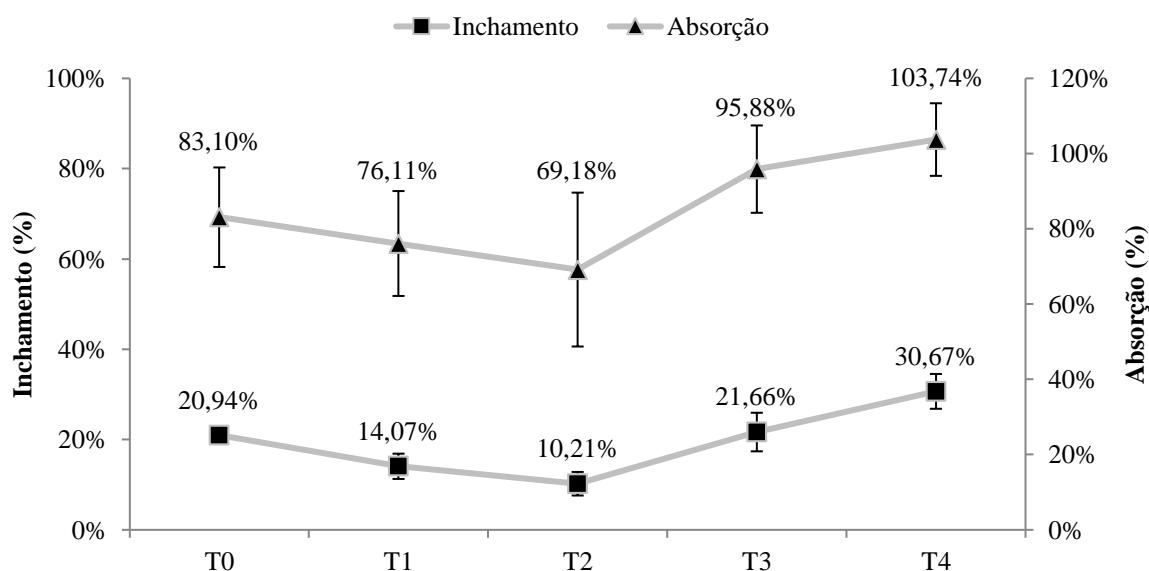


Figura 24 – Resultados de inchamento e absorção.

O acréscimo de fibras nos compósitos T0, T3 e T4 aumenta os valores de inchamento e absorção. Além da natureza hidrofílica das fibras, seus poros aumentam após o tratamento com hidróxido de sódio, haja vista que ligações contendo lignina são quebradas, permitindo melhor absorção de água (KALIA *et al.*, 2011; SUBHEDAR; GOGATE, 2014). Conforme Panthapulakkal e Sain (2007), compósitos reforçados com fibras vegetais podem absorver bastante umidade, haja vista que a água pode ficar retida entre os espaços interfibrilares, o que explicaria os altos valores encontrados de absorção e inchamento, principalmente em T4, no qual há maior quantidade de fibras que foram submetidas a tratamento alcalino, ocasionando maior porosidade das mesmas. Sendo assim, infere-se que um maior teor de resina possa causar melhor impermeabilização nas fibras tratadas, com potencial de melhoria nas propriedades físicas de inchamento e absorção.

A NBR 14810-2 (ABNT, 2013b) limita o inchamento para painéis não estruturais em condições secas (Tipo P2), com espessura entre 6 e 13mm em 18 %. Já a NBR 15316-2 (ABNT, 2015) estipula o valor de 15 % como máximo para MDF de 9 a 12mm para uso não estrutural em condições secas. Os resultados obtidos foram inferiores aos da norma somente para os compósitos com menor quantidade de fibra (T1 e T2). No entanto, ambas as normas não especificam valores para absorção.

4.2.1.5 Análise estatística

Os resultados da caracterização física dos compósitos estão apresentados na Tabela 14, juntamente com seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação. Os resultados sugerem que o acréscimo de fibras reduz a densidade dos compósitos, confirmando a

característica de baixa densidade das fibras vegetais. Além disso, o maior volume de fibras indica menor umidade e os resultados de inchamento e absorção implicam que o aumento do teor de fibras pode prejudicar estas propriedades físicas. Todavia, isto é explicado devido à porosidade das fibras, principalmente após o tratamento químico, indicando que maiores teores de resina poderiam ser uma maneira de combater o aumento dessas mesmas propriedades.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de caracterização física

Tratamento	Densidade (kg/m ³)	Umidade (%)	Inchamento (%)	Absorção (%)
T0	762,36 a ± 43,21	7,48 b ± 0,07	20,94 b ± 1,49	83,10 abc ± 13,22
T1	765,81 a ± 65,50	7,90 a ± 0,13	14,07 c ± 2,80	76,11 bc ± 13,94
T2	781,49 a ± 93,62	7,77 a ± 0,13	10,21 c ± 2,61	69,18 c ± 20,45
T3	740,62 ab ± 46,19	7,35 b ± 0,11	21,66 b ± 4,27	95,88 ab ± 11,61
T4	656,91 b ± 69,11	6,60 c ± 0,24	30,67 a ± 3,86	103,74 a ± 9,65
CV (%)	9,53	2,11	17,34	17,80

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

4.2.1.6 Condutividade térmica

Os resultados referentes aos compósitos são apresentados na Tabela 15, na qual se constata que o tratamento alcalino na fibra foi fator importante para o aumento de 32,5 % da condutividade térmica, conforme visto entre T0 e T3. Scalioni *et al.* (2017) obtiveram o mesmo entendimento sobre a influência do tratamento alcalino nas fibras de curauá em seus compósitos poliméricos, nos quais esta propriedade se elevou em 42 % nos compósitos com o tratamento nas fibras. Os painéis T0 e T2 são iguais estatisticamente entre si e possuem o menor valor entre os compósitos estudados. O acréscimo da resina em T2 pode ter causado a redução da condutividade térmica quando comparado à T1, tendo em vista que uma espuma de poliuretano possui valores entre 0,02 e 0,03 W/mK (ABNT, 2005; CARRIÇO *et al.*, 2017).

Tabela 15 – Resultados do ensaio de condutividade térmica

Tratamento	Condutividade térmica (W/mK)
T0	0,2611 d ± 0,0084
T1	0,3306 c ± 0,0148
T2	0,2588 d ± 0,0068
T3	0,3460 b ± 0,0045
T4	0,3793 a ± 0,0037
CV (%)	2,77

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

De acordo com Cravo (2013), fatores como a mistura dos componentes da matriz e a utilização da resina poliuretana podem influenciar na condutividade térmica, haja vista que cada

material tem um valor específico desta característica. Conforme Volf *et al.* (2015), materiais lignocelulósicos possuem baixa condutividade térmica, como a fibra de madeira (0,048 W/mK) e de cânhamo (0,052 W/mK). Já Vidil *et al.* (2016) afirmaram que a condutividade térmica pode variar em função da densidade do compósito, dos tipos de fibras vegetais e ainda o processo utilizado para a produção dos painéis.

Os resultados desta pesquisa podem ser comparados aos valores encontrados por pesquisas com compósitos utilizando materiais lignocelulósicos, como fibra de coco e casca de amendoim (0,29 W/mK) e bagaço de cana de açúcar com adição de fibras de curauá (0,16 W/mK) (Cravo, 2013; Fiorelli *et al.*, 2017) ou com painéis de partículas feitas de saco de cimento (0,16 W/mK) (Cravo *et al.*, 2017).

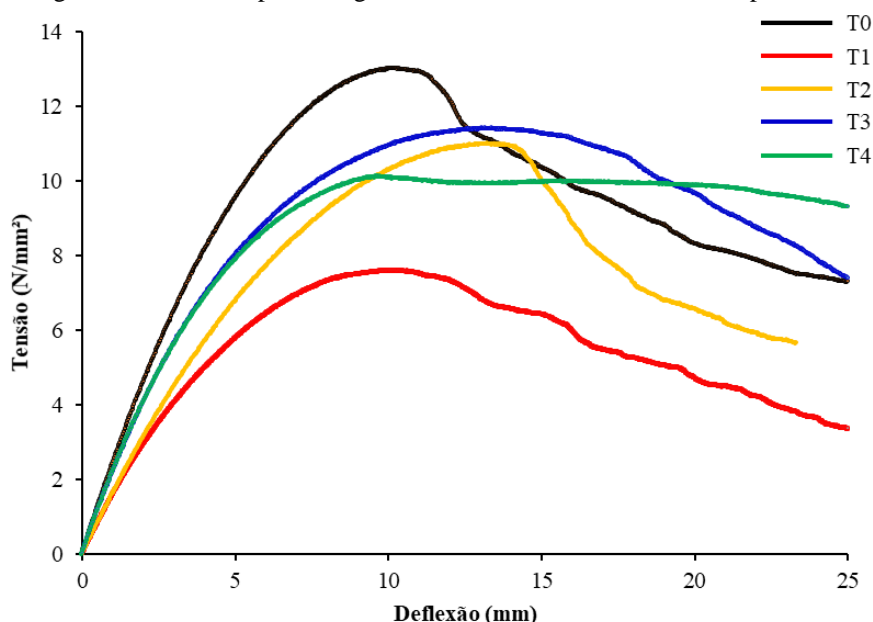
Além disso, os valores de condutividade térmica obtidos são próximos aos que se encontram em materiais disponíveis no mercado como as placas de gesso acartonado (0,35 W/mK), aglomerados de fibras de madeira (0,20 W/mK) e aglomerados de partículas de madeira (0,17 W/mK) (ABNT, 2005), confirmando seu potencial de utilização como isolamento térmico.

4.2.2 Caracterização mecânica

4.2.2.1 Módulo de elasticidade

A Figura 25 apresenta as curvas típicas do gráfico tensão x deflexão para os compósitos ensaiados. As curvas foram realizadas com dados da amostra mais próxima da média do módulo de elasticidade de cada um dos painéis. Nota-se que T0 obteve maior tensão de ruptura e módulo de elasticidade, observado pela tangente da curva correspondente à fase elástica do material. Pelo gráfico é possível constatar a menor tensão de ruptura em T1 e valores próximos de módulo de elasticidade entre T1 e T2, sendo este último maior devido ao acréscimo de resina na proporção, o que ocasionou melhor compactação dos materiais e melhor revestimento das fibras pela resina poliuretana. Para os compósitos T3 e T4, percebe-se maior tenacidade naquele com maior volume de fibras, o que é esperado devido às características de absorção de energia das mesmas. Além disso esses dois painéis atendem ao requisito mínimo da NBR 14810, conferindo seu potencial para utilização na construção civil, desde que se melhore a característica de tensão máxima de ruptura.

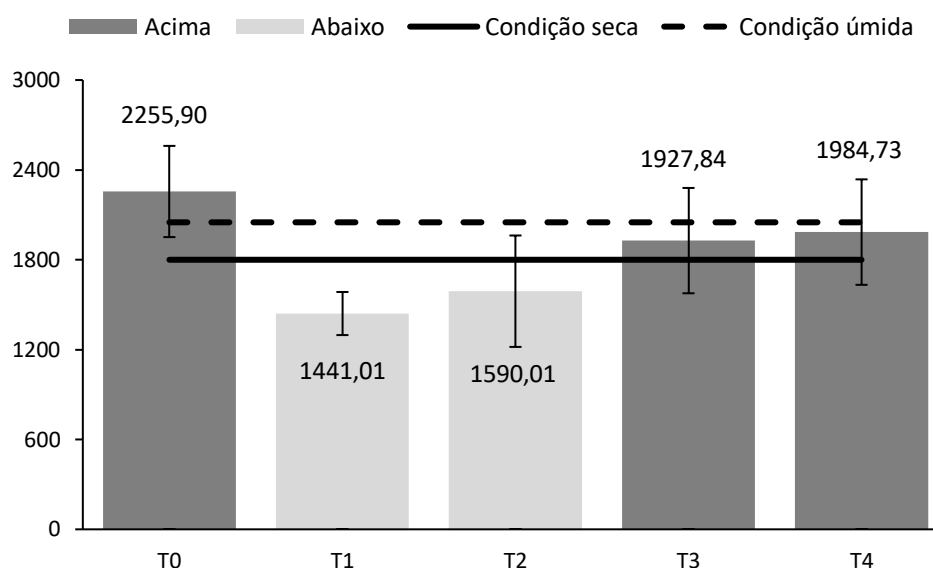
Figura 25 – Curvas típicas do gráfico de tensão x deflexão dos compósitos.



Os resultados obtidos de MOE, conforme o gráfico da Figura 26, inferem que para o tratamento alcalino na fibra de curauá ser efetivo, em relação às propriedades dos compósitos, seria necessária uma maior quantidade de resina como é possível observar pelo aumento em T2 de 10,34 % quando comparado à T1. Os valores encontrados confirmam ainda o alto módulo de elasticidade presente nas fibras, haja vista a melhora no MOE quando o volume de fibras é acrescido, como é possível observar nos compósitos com 50 % (T0 e T3) e 75 % (T4) de fibra de curauá.

Entre os compósitos T0 e T3, aquele sem o tratamento alcalino na fibra de curauá tem MOE superior em aproximadamente 17 %. Apesar da merceirização nas fibras ter sido relatada como método eficiente na melhoria de propriedades mecânicas de compósitos poliméricos, Scalioni et. al (2017) também encontraram redução de MOE em 20 % em compósitos poliméricos com fibras de curauá tratadas quando comparados àqueles com fibras puras. Eles relatam que a redução pode ter sido causada pelas mudanças morfológicas causadas pelo tratamento alcalino, que apesar de aumentar a rugosidade da superfície, também aumenta a porosidade da fibra, gerando maior retenção de água.

Figura 26 – Resultados do módulo de elasticidade e os limites mínimos da NBR 14810-2.



A Figura 26 apresenta ainda os valores encontrados em comparação à NBR 14810-2 para painéis com espessura de 6 a 13mm em condições secas e úmidas. Os painéis T1 e T2 não atingiram o limite mínimo em nenhuma das condições, enquanto os demais painéis atendem para a condição seca. Somente o painel no qual não houve o tratamento alcalino na fibra de curauá (T0) atendeu ao limite mínimo de 2050 MPa para painéis em condições de umidade. Quanto à NBR 15316, nenhum dos compósitos ensaiados atendeu o limite mínimo de 2500 MPa para serem considerados como painel MDF.

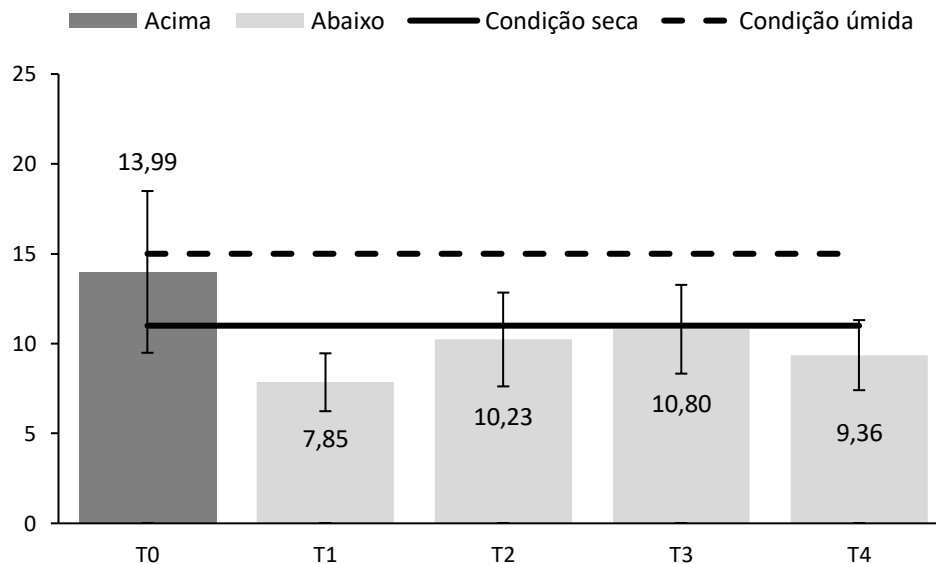
Os resultados obtidos são inferiores aos valores encontrados por Santos (2013), os quais obtiveram média entre 3200 e 3600 MPa. Contudo, a autora relatou desvios padrões entre 600 e 2000 MPa, provavelmente causado pela falta de homogeneização nos painéis. Todavia, os valores são compatíveis aos compósitos produzidos com resíduos madeireiros (ZAU et. al, 2014), entre 1900 e 2200 MPa; com fibras de coco e resíduo de Pinus (FIORELLI et. al, 2015), entre 1700 e 2300 MPa; e com bagaço de cana e serragem (ROCHA, 2016), entre 1800 e 2100 MPa.

4.2.2.2 Flexão estática

Os valores de MOR apresentados na Figura 27 evidenciam que o aumento da resina de 15 % para 20 % nos painéis T1 e T2 provoca melhores resultados em aproximadamente 30 %. Tal comportamento fora observado por Zau et. al (2014) em aglomerados de partículas com resíduo de cumaru, no qual os resultados obtiveram aumento de 36 % quando se elevou a quantidade de resina de 10 % para 15 %.

O painel T4, com maior teor de fibras, obteve menor resultado de MOR quando comparados aos demais, com exceção de T1, no qual se tem menor quantidade de resina. Este mesmo desempenho foi constatado em outras pesquisas com painéis compósitos com partículas de madeira e fibras ou resíduos vegetais, nas quais o MOR foi reduzindo conforme o incremento de fibra de coco (FIORELLI et. al, 2015) e resíduo de café (SCATOLINO et. al, 2017).

Figura 27 – Resultados do módulo de ruptura e os limites mínimos da NBR 14810-2.



A Figura 27 também apresenta os limites mínimos da NBR 14810-2 para painéis de média densidade com espessura entre 6 e 13mm em condições secas e úmidas, na qual apenas o painel T0 obteve média superior em relação à primeira condição (11 MPa) e o único com potencial para uso em áreas úmidas. Com exceção de T1, os demais painéis não se diferem estatisticamente entre si, indicando seu potencial uso em condições secas, conforme os parâmetros desta norma brasileira. Porém, quanto à NBR 15316, para painéis entre 9 e 12mm, os valores mínimos de MOR são estipulados em 22 MPa, o que não foi obtido em nenhum dos compósitos ensaiados.

O painel T1 foi o que obteve menor MOR, inferindo que a menor quantidade de resina não foi suficiente para recobrir as fibras, que ficaram expostas, conforme observado no MEV, gerando assim pontos de fragilidade quanto à tensão. Com exceção deste, os resultados de MOR são compatíveis àqueles encontrados por Rocha (2016), de 9 a 12 MPa, em compósitos com bagaço de cana e serragem em proporções similares.

Os resultados encontrados divergem de Santos (2013), que encontrou valores entre 24 e 27 MPa em painéis com resíduos de madeira e fibras de curauá, numa proporção de 50 % em massa de cada material. No entanto, a densidade dos painéis encontrada pela autora são

superiores em 20 % à esta pesquisa. Tangjuank e Kumfu (2011) afirmam que o aumento da densidade causa melhor compactação devido à menor quantidade de espaços vazios, podendo justificar a diferença entre esses dois estudos.

4.2.2.3 Análise estatística

Os resultados da caracterização mecânica dos compósitos estão apresentados na Tabela 16, juntamente com seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação. Os resultados sugerem que uma maior quantidade de fibra e de resina contribuem para o aumento do MOR e MOE. O tratamento químico alcalino nas fibras de curauá pode, apesar da redução em suas propriedades mecânicas, ser benéfico para o compósito, desde que um aumento no teor de resina seja capaz de recobrir a superfície das fibras tratadas, haja vista que as propriedades físicas como o inchamento e absorção reduziram com o aumento da resina. Com a redução destas propriedades, diminuindo os vazios e aumentando a compactação nesses compósitos, esperam-se melhores propriedades mecânicas nos painéis com fibras de curauá tratadas.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica

Tratamento	MOR (MPa)	MOE (MPa)
T0	13.99 a \pm 4.50	2255.90 a \pm 304.49
T1	7.85 b \pm 1.61	1441.01 c \pm 143.85
T2	10.23 ab \pm 2.61	1590.01 bc \pm 372.03
T3	10.80 ab \pm 2.47	1927.84 abc \pm 351.64
T4	9.36 ab \pm 1.95	1984.73 ab \pm 352.12
CV (%)	29.09	18.55

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

5 CONCLUSÃO

Com a utilização de componentes lignocelulósicos em painéis de média densidade foi possível verificar que materiais descartados de maneira inadequada ou mal aproveitados podem ser utilizados de forma sustentável, visando economia e agregação de valor na produção de painéis aglomerados.

Os resultados obtidos sugerem que o tratamento alcalino com concentração de 5 % de NaOH com tempo de imersão de 2h foi eficaz na remoção da hemicelulose e lignina presente nas fibras de curauá, demonstrando-se o melhor tratamento estudado.

A partir das propriedades físicas obtidas para os compósitos, infere-se que o planejamento quantitativo para esta pesquisa foi eficiente para obtenção de painéis de média densidade. Pelos resultados obtidos de inchamento e absorção foi possível notar que o aumento da quantidade de fibras é prejudicial. Porém, o resultado de absorção evidencia que o aumento do teor de resina reduz essa propriedade, pois se acredita que as fibras de curauá foram envolvidas pela matriz, dificultando a retenção de água nas mesmas. Logo, o compósito T2 apresentou melhor comportamento quanto às propriedades físicas

Os resultados das propriedades mecânicas de MOR e MOE corroborados com os valores encontrados nas propriedades físicas e imagens de microscopia sugerem o aumento da resina para melhoria destas características com a intenção de utilização destes compósitos na construção civil, desde que os ensaios comprovem a redução no inchamento e absorção que devem ser ocasionadas pela melhor compactação dos componentes na matriz, gerando menos espaços vazios. Além disso, conclui-se que o tratamento químico alcalino nas fibras de curauá foi benéfico, haja vista a proximidade do valor de MOR com a norma e resultados satisfatórios no MOE.

Os resultados de condutividade térmica dos compósitos ensaiados exibem sua propensão ao uso como material que possa agregar ao conforto térmico, tendo em vista sua proximidade com materiais de uso na construção civil como o gesso acartonado e aglomerados de fibra e partículas madeira.

Conclui-se, portanto, que a utilização de fibras de curauá e resíduos madeiros apresenta-se como uma alternativa para a fabricação de novos materiais destinados a construção de edificações, como em enchimento de paredes e/ou forro. Além disso, a utilização de materiais lignocelulósicos como isolantes térmicos em compósitos poliméricos mostra aspectos interessantes, sendo uma alternativa viável para a minimização de resíduos descartados, preservando o meio ambiente, utilizando matéria prima de fonte renovável e agregando valor ao processo de produção das fibras.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Ensaio de resistência ao arrancamento de parafuso e tração perpendicular como complemento às propriedades mecânicas;
- Estudar a resistência dos compósitos contra ataques de fungos apodrecedores;
- Ensaio para verificar a inflamabilidade dos painéis;
- Estudo para caracterização acústica dos compósitos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12744 – Fibras têxteis. p. 8, 1992.

_____. NBR 10004 – Resíduos sólidos - classificação. p. 71, 2004.

_____. NBR 15220-2 – Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. p. 34, 2005.

_____. NBR 14810-1 – Chapas de madeira aglomerada - Parte 1: Terminologia. p. 4, 2013a.

_____. NBR 14810-2 – Chapas de madeira aglomerada - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. p. 69, 2013b.

_____. NBR 14810-3 – Chapas de madeira aglomerada - Parte 3: Métodos de ensaio. p. 51, 2006.

_____. NBR 15575-1 – Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais Prefácio. p. 60, 2013c.

_____. NBR 15316-2 – Painéis de fibra de média densidade - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. p. 90, 2015.

ALBIM, E. M. S.; LAMEIRA, O. A.; REIS, I. N. R. S.; PANTOJA, S. S. P. Assepsia e estabelecimento *in vitro* de gemas axilares de curauá (*Ananas erectifolius* L.B. Smith) - Bromeliaceae. **Revista de Ciências Agrárias**, n. 43, p. 17–28, 2005.

ANJOS, R. A. M. DOS; FONTE, A. P. N. Rendimento de madeira serrada de espécies de *Eucalyptus*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 1, p. 26–32, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). Thermal environmental conditions for human occupancy. 2010.

ASIM, M.; ABDAN, K.; JAWAID, M.; NASIR, M.; DASHTIZADEH, Z.; ISHAK, M. R.; HOQUE, M. E.. A review on pineapple leaves fibre and its composites. **International Journal of Polymer Science**, v. 2015, p. 1–16, 2015.

ASIM, M. JAWAID, M.; ABDAN, K.; ISHAK, M. R.. The Effect of Silane Treated Fibre Loading on Mechanical Properties of Pineapple Leaf/Kenaf Fibre Filler Phenolic Composites. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 4, p. 1520–1527, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D1554-10. Standard Terminology Relating to Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. p. 1–4, 2016.

_____. ASTM D7894. Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument. p. 1–5, 2016b.

AWAL, A.; RANA, M.; SAIN, M. Thermorheological and mechanical properties of cellulose reinforced PLA bio-composites. **Mechanics of Materials**, v. 80, n. Part A, p. 87–95, jan. 2015.

BARBOSA, A. DE M. **Compósitos poliméricos com resíduo de açaí para mitigação de efeitos térmicos como estratégias eco-alternativas em habitações na Amazônia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Amazonas, 92f., 2016.

- BARBOSA, L. C.; PEDRAZZI, C.; FERREIRA, E. S.; SCHNEID, G. N.; WILLE, V. K. D. Avaliação dos resíduos de uma serraria para a produção de celulose kraft. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 491–500, 2014.
- BATISTA, D. C.; SILVA, J. G. M.; ANDRADE, W. S. P.; VIDAURRE, G. B.. Desempenho operacional de uma serraria de pequeno porte do Município de Alegre, Espírito Santo, Brasil. **Floresta**, v. 45, n. 3, p. 487–496, 2015.
- BELTRAMI, L. V. R.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J. Efeito do tratamento alcalino de fibras de curauá sobre as propriedades de compósitos de matriz biodegradável. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, v. 24, n. 3, p. 388–394, 2014.
- BISMARCK, A.; MISHRA, S.; LAMPKE, T. Plant fibers as reinforcement for green composites. **Natural fibers, biopolymers and biocomposites**, v. 2, p. 37–108, 2005.
- BORGES, T. E. ALMEIDA, J. H. S.; AMICO, S. C.; AMADO, F. D.R.:. Hollow glass microspheres/piassava fiber-reinforced homo- and co-polypropylene composites: preparation and properties. **Polymer Bulletin**, v. 74, n. 6, p. 1979–1993, 2017.
- CARRIÇO, C.; FRAGA, T.; CARVALHO, V. E.; PASA, V. M. D. Polyurethane Foams for Thermal Insulation Uses Produced from Castor Oil and Crude Glycerol Biopolyols. **Molecules**, v. 22, n. 7, p. 1091, 2017.
- CARVALHO, A. G.; ZANUNCIO, A.J.V.; MORI, F.A.; MENDES, R.F.; MENDES, L.M. Adesivos Naturais e Sintéticos em Painéis Compensados. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 7, n. 1, p. 28–35, 2016.
- CARVALHO, J. E.; CHIERICE, G. O.; CLARO NETO, S. Caracterização térmica do poliuretano derivado de óleo vegetal para confecção de dispositivo de assistência ventricular. **Brazilian Journal of Thermal Analysis**, v. 3, n. 1, p. 16–19, 2014.
- CASTRO, J. P.; PERÍGOLO, D. M.; BIANCHI, M. L.; MORI, F. A.; FONSECA, A. S.; ALVES, I. C. N.; VASCONCELLOS, F. J. Uso de espécies Amazônicas para envelhecimento de bebidas destiladas: Análises física e química da madeira. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 319–327, 2015.
- CISNEROS-LÓPEZ, E. O.; ANZALDO, J.; FUENTES-TALAVERA, F.J.; GONZÁLEZ-NÚÑEZ, R.; ROBLEDO-ORTÍZ, J.R.; RODRIGUE, D. Effect of agave fiber surface treatment on the properties of polyethylene composites produced by dry-blending and compression molding. **Polymer Composites**, v. 38, n. 1, p. 96–104, jan. 2017.
- COELHO, D. DE F.; SILVEIRA, E.; TAMBOURGI, E. B. Purification Processes and Market Potential of Bromelain in Brazil. **J. Chem. Chem. Eng.**, v. 8, p. 882–888, 2014.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 474/2016. p. 01–08, 2016.
- CORRÊA, A. C.; TEIXEIRA, E. M.; PESSAN, L. A.; MATTOSO, L. H. C. Cellulose nanofibers from curaua fibers. **Cellulose**, v. 17, n. 6, p. 1183–1192, 22 dez. 2010.
- CRAVO, J. C. M. **Compósito particulado de baixa densidade com casca de amendoim, fibra de coco verde e resina poliuretana à base de óleo de mamona para aplicação como forro de galpões avícolas.** (Mestrado em Zootecnia). Pirassununga: Universidade de São Paulo, 166f, 2013.

CRAVO, J. C. M.; SARTORI, D. L.; MÁRMOL, G.; SCHMIDT, G. M.; BALIEIRO, J. C. C.; FIORELLI, J. Effect of density and resin on the mechanical, physical and thermal performance of particleboards based on cement packaging. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 414–421, 2017.

DIAS, F. M. **Aplicação de Resina Poliuretana À Base De Mamona Na Fabricação De Painéis De Madeira**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). Universidade de São Paulo, 178f, 2005.

DUAN, J. WU, H.; FU, W.; HAO, M. Mechanical properties of hybrid sisal/coir fibers reinforced polylactide biocomposites. **Polymer Composites**, v. 39, p. E188–E199, abr. 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS (FAOSTAT). **Produção mundial de resíduos de madeira (2010 a 2017)**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acesso em: 04 jan. 2019a.

_____. **Produção mundial de MDF/HDF (2017)**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acesso em: 04 jan. 2019b.

FARUK, O; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

FERREIRA, S. R.; SILVA, F. A.; LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 551–561, 2017.

FIORELLI, J.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; NASCIMENTO, M. F.; CURTOLO, D. D.; SARTORI, D. L.; BELINI, U. L. Painéis de partículas monocamadas fabricados com resíduo de madeira e fibra de coco verde. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 105, p. 175–182, 2015.

FIORELLI, J.; GALO, R. G.; CASTRO JR., S. L.; BELINI, U. L.; LASSO, P. R. O.; SAVASTANO JR., H. Multilayer Particleboard Produced with Agroindustrial Waste and Amazonia Vegetable Fibres. **Waste and Biomass Valorization**, v. 0, n. 0, p. 1–11, 20 mar. 2017.

FONTES, P. J. P. **Auto-suficiência energética em serraria de Pinus e aproveitamento dos resíduos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, 153f, 1994.

GATANI, M. P.; FIORELLI, J.; MEDINA, J. C.; ARGUELLO, R.; RUIZ, A.; NASCIMENTO, M. F.; SAVASTANO JR., H. Viabilidade técnica de produção e propriedades de painéis de partículas de casca de amendoim. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 18, n. 2, p. 1286–1293, 2013.

GEHLEN, L. R. **Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açai e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 104f, 2014.

GOMES, A.; GODA, K.; OHGI, J. Effects of Alkali Treatment to Reinforcement on Tensile Properties of Curaua Fiber Green Composites. **JSME International Journal Series A**, v. 47, p. 541–546, 2004.

GOMES, J. P. DA S.; BARBOSA, K. DE M. Compatibilização do sistema cicloviário de Manaus com as diretrizes existente: Estudo de Caso. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, p. 5, 2016.

HASSAN, A.; SALEMA, A. A.; ANI, F. N.; BAKAR, A. A. A review on oil palm empty fruit bunch fiber-reinforced polymer composite materials. **Polymer Composites**, v. 31, n. 12, p. 2079–2101, dez. 2010.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Riscos das mudanças climáticas no Brasil**. São Paulo, 56f, 2011.

IWAKIRI, S.; ANDRADE, A. S.; CARDOSO JR., A. A.; CHIPANSKI, E. R. PRATA, J. G.; ADRIAZOLA, M. K. O. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-ureia-formaldeído. **Cerne**, v. 11, n. 4, p. 323–328, 2005.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; NASCIMENTO, C. C.; AZAMBUJA, R. R.; CAMPELO, S. R.; RIBEIRO, R. S. Produção de painéis aglomerados com misturas de seis espécies de madeiras da amazônia E Pinus taeda. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 259–267, 2016.

JAUHARI, N.; MISHRA, R.; THAKUR, H. Natural Fibre Reinforced Composite Laminates - A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4–5, p. 2868–2877, 2015.

KALIA, S.; DUFRESNE, A.; CHERIAN, B. M.; KAITH, B. S.; AVÉROUS, L.; NJUGUNA, J.; NASSIOPOULOS, E. Cellulose-Based Bio- and Nanocomposites: A Review. **International Journal of Polymer Science**, v. 2011, p. 1–35, 2011.

KIM, M. H.; SONG, H. B. Analysis of the global warming potential for wood waste recycling systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 69, p. 199–207, 2014.

KIM, W.; JEON, J.; AN, B.; LEE, J.; KIM, H.; PARK, C. Effects of Reinforcing Fiber and Microsilica on the Mechanical and Chloride Ion Penetration Properties of Latex-Modified Fiber-Reinforced Rapid-Set Cement Concrete for Pavement Repair. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, p. 1–8, 2018.

KRETSCHMANN, D. Natural materials: Velcro mechanics in wood. **Nature materials**, v. 2, n. 12, p. 775, 2003.

LEAL NETA, L. S.; COSTELLA, A. M. S.; MELO FILHO, J. A.; GIACON, V. M. Caracterização físico-química de fibras de curauá e sua aplicação em compósitos poliméricos. **Scientia Amazonia**, v. 4, n. 1, p. 21–27, 2015.

LIEW, F. K.; HAMDAN, S.; RAHMAN, M. R.; RUSOP, M. Thermomechanical Properties of Jute/Bamboo Cellulose Composite and Its Hybrid Composites: The Effects of Treatment and Fiber Loading. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 1–10, 2017.

LIMA, R. B. **Produção volumétrica bruta, rendimento e modelagem de madeira serrada de espécies comerciais da Amazônia**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal Rural de Pernambuco – Recife, 142f, 2017.

LIMA JÚNIOR, A.; FONSECA, B.; SILVA, M. Produtos ecoeficientes na arquitetura : o emprego de materiais lignocelulósicos. **Revista Janus**, v. 11, n. n. 20, p. 35–44, 2014.

MACEDO, L. B.; FERRO, F. S.; VARANDA, L. D.; CAVALHEIRO, R. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 7, p. 674–679, jul. 2015.

MANJULA, R.; RAJU, N. V.; CHAKRADHAR, R. P. S.; KALKORNSURAPRANEE, E.; JOHNS, J. Influence of Chemical Treatment on Thermal Decomposition and Crystallite Size of Coir Fiber. **International Journal of Thermophysics**, v. 39, n. 1, p. 3, 2018.

MARINHO, N. P.; NASCIMENTO, E. M.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L.; CLARO NETO S.; AZEVEDO, E. C. Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu. **Polímeros**, v. 23, n. 2, p. 201-205, 2013.

MELO, R. R.; SANTINI, E. J.; PAES, J. B.; GARLET, A.; STANGERLIN, D. M.; MENEZZI, C. H. S. D. Resistência de painéis aglomerados confeccionados com madeira de. **Cerne**, v. 16, p. 82–89, 2010.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Studies on Jute Composites—A Literature Review. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 34, n. 5, p. 729–792, set. 1995.

MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P. D. Performance of curaua fibers in pullout tests. **Journal of Materials Science**, v. 43, n. 2, p. 489–493, 27 jan. 2008.

MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P. D.; CARVALHO, E. A.; D'ALMEIDA, J. R. M. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 11, n. 3, p. 197–203, 2006.

MONTEIRO, S. N.; D'ALMEIDA, J. R. M. Ensaios de pullout em fibras lignocelulósicas - uma metodologia de análise. **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, p. 189–196, 2006.

MOREIRA, C. M.; BERTOLUCCI, S. K. V.; LAMEIRA, O. A.; ROCHA, T. T.; ANDRADE, H. B.; GAVILANES, M. L.; PINTO, J. E. B. P. Caracterização morfológica de acessos de curauá do banco ativo de germoplasma da Embrapa Amazônia Oriental. **Revista Agroambiental**, v. 7, n. 2, p. 47–57, 2015.

MOREIRA, C. M.; ANDRADE, H. B.; BERTOLUCCI, S. K. V.; LAMEIRA, O. A.; MOHAMMED, A.; PINTO, J. E. B. P. Plantlet regeneration from young leaf segments of curaua (*Ananas erectifolius*), an Amazon species. **Turkish Journal of Biology**, v. 40, p. 1227–1234, 2016.

MOTA, K. L. R. **Desempenho operacional de uma serraria de médio porte no município de Novo Aripuanã, Amazonas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais). Universidade Federal do Amazonas, 60f, 2018.

NEGRÃO, W. H.; SILVA, S. A. M.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Painéis aglomerados fabricados com mistura de partículas de madeiras tropicais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, p. 103–112, 2014.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 96–108, abr. 2016.

PAES, J. B.; NUNES, S. T.; LAHR, F. A. R.; NASCIMENTO, M. F.; LACERDA, R. M. A. Qualidade de chapas de partículas de *Pinus elliottii* coladas com resina poliuretana sob diferentes combinações de pressão e temperatura. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 551–558, 2011.

PANTHAPULAKKAL, S.; SAIN, M. Agro-residue reinforced high-density polyethylene composites: fiber characterization and analysis of composite properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 6, p. 1445-1454, 2007.

PÁSZTORY, Z.; RONYECZ MOHÁCSINÉ, I.; BÖRCSÖK, Z. Investigation of thermal insulation panels made of black locust tree bark. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 733–735, ago. 2017.

PAULA, C. R. P. **Caracterização de compósitos de poliuretano de óleo vegetal com madeira de pinus taeda e fibras de agave sisalana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 91f, Curitiba, 2017.

PEREIRA, P. H. L. **Estudo das propriedades físico-químicas da poliuretana derivada do óleo de mamona com potencial aplicação na área médica**. Dissertação (Mestrado em Química Analítica). Universidade de São Paulo, 75f, São Carlos, 2010.

PINO, G. G. D.; DÍAZ, F. R. V.; KIELING, A. C.; RIVERA, J. L. V.; MACÊDO NETO, J. C.; BOTELHO, R.; SANTOS, L. R.; TORRES, A. R.; LLERENA, G. F. R.; RODRIGUES, M. A. Influence of the chemical treatment of curauá (*Ananas Erectifolius*) vegetal fibers on the mechanical resistance of composites in epoxy resin matrix. **Review Of Research Journal**, v. 6, n. 9, 2017.

PRADO, K. DE S. DO; SPINACÉ, M. A. S. Characterization of fibers from pineapple's crown, rice husks and cotton textile residues. **Materials Research**, v. 18, n. 3, p. 530–537, jun. 2015.

REBELO, V. S. M. **Efeitos da merceirização em fibras de piaçava amazônica (*Leopoldinia piassaba*) para produção de painéis de partículas de média densidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Amazonas, 133f, 2016.

RIBEIRO, U. G. **Desempenho térmico, acústico e mecânico de compósitos cimentícios produzidos com resíduos da indústria madeireira de Porto Velho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Amazonas, 76f, 2016.

ROCHA, B. B. **Aproveitamento de resíduos de madeira e bagaço de cana-de-açúcar na produção e avaliação de painéis aglomerados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus Ilha Solteira, 95f, 2016.

SANTOS, F. R. S. DOS. **Desenvolvimento e aplicação de compósitos à base de matriz polimérica reforçado com fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e resíduos de madeiras amazônicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Amazonas, 134f, 2013.

SCALIONI, L. V.; GUTIÉRREZ, M. C.; FELISBERTI, M. I. Green composites of poly(3-hydroxybutyrate) and curaua fibers: Morphology and physical, thermal, and mechanical properties. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 134, n. 14, 2017.

SCATOLINO, M.; COSTA, A. O.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Eucalyptus wood and coffee parchment for particleboard production: Physical and mechanical properties. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 139-146, 2017.

SENA, J. C. DE A. **Manual técnico para o cultivo do curauá**. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Governo do Estado do Pará. Marituba, 26f, 2015.

SILVA, D. G. M.; VASCONCELOS, W. L. Isolantes térmicos fibrosos: motivos para sua utilização como revestimentos de trabalho em equipamentos industriais que operam em altas temperaturas - revisão da literatura - parte II. **Cerâmica**, v. 64, n. 369, p. 30–40, mar. 2018.

SILVA, C. P.; VIEIRA, R. S.; SILVA, I. C.; DORNELAS, A. S. P.; BARAÚNA, E. E. P. Quantificação de Resíduos Produzidos nas Indústrias Madeireiras de Gurupi, TO. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 13 jul. 2017.

SILVA, E. J.; SILVA, P. D.; MARQUES, M. L.; FORNARI JR., C. C. M.; GARCIA, F. C.; LUZARDO, F. H. M. Resistência à compressão de argamassas em função da adição de fibra de coco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 12, p. 1268–1273, dez. 2014.

SILVA FILHO, L. S. P.; GARCEZ, M. R. Compósitos de engenharia de matriz polimérica. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, v. 2, p. 1423–1464, 2007.

SOLTAN, D. G.; NEVES, P.; OLVERA, A.; SAVASTANO JR., H. LI, V. C. Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior. **Industrial Crops and Products**, v. 103, p. 1–12, 2017.

SOUSA, V. M. Z. **Caracterização mecânica, térmica e morfológica de compósitos de polihidroxibutirato (PHB) reforçados com fibras de curauá**. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia), Universidade de Brasília, 106f, 2016.

SUBHEDAR, P. B.; GOGATE, P. R. Alkaline and ultrasound assisted alkaline pretreatment for intensification of delignification process from sustainable raw-material. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n. 1, p. 216–225, 2014.

SUBHEDAR, P. B.; RAY, P.; GOGATE, P. R. Intensification of delignification and subsequent hydrolysis for the fermentable sugar production from lignocellulosic biomass using ultrasonic irradiation. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 40, p. 140–150, 2018.

TANGJUANK, S.; KUMFU, S. Particle Boards from Papyrus Fibers as Thermal Insulation. **Journal of Applied Sciences**, v. 11, n. 14, p. 2640–2645, 1 dez. 2011.

TANPICHAI, S.; WITAYAKRAN, S. All-cellulose composites from pineapple leaf microfibers: Structural, thermal, and mechanical properties. **Polymer Composites**, v. 39, n. 3, p. 895–903, mar. 2018.

TRIPATHI, P.; GUPTA, V. K.; DIXIT, A.; MISHRA, R. K.; SHARMA, S. Development and characterization of low cost jute, bagasse and glass fiber reinforced advanced hybrid epoxy composites. **AIMS Materials Science**, v. 5, n. 2, p. 320–337, 2018.

- VERMA, D.; JAIN, S. Effect of natural fibers surface treatment and their reinforcement in thermo-plastic polymer composites: A review. **Current Organic Synthesis**, v. 14, n. 2, p. 186–199, 7 fev. 2017.
- VIDIL, L.; FIORELLI, J.; BILBA, K.; ONÉSIPPE, C.; ARSÈNE, M.; SAVASTANO JR., H. Thermal insulating particle boards reinforced with coconut leaf sheaths. **Green Materials**, v. 4, n. 1, p. 31–40, mar. 2016.
- VOLF, M.; DIVIŠ, J.; HAVLÍK, F. Thermal, Moisture and Biological Behaviour of Natural Insulating Materials. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1599–1604, nov. 2015.
- WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 9, p. 1259–1264, jul. 2003.
- WANG, S. H. Construction materials science. **China Construction Industry Publisher**, Beijing, 1988.
- YILMAZ, Nazire Deniz. Agro-residual fibers as potential reinforcement elements for biocomposites. **Lignocellulosic polymer composites: processing, characterization and properties**, p. 233-270, 2015.
- ZAU, M. D. L.; VASCONCELOS, R. P.; GIACON, V. M.; LAHR, F. A. R. Avaliação das propriedades química, física e mecânica de painéis aglomerados produzidos com resíduo de madeira da Amazônia - Cumaru (*Dipteryx Odorata*) e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Polímeros**, v. 24, n. 6, p. 726–732, 2014.
- ZBOROWSKA, M.; STACHOWIAK-WENCEK, A.; WALISZEWSKA, B.; PRADZYNSKI, W. Colorimetric and ftir atr spectroscopy studies of degradative effects of ultraviolet light on the surface of exotic ipe (*Tabebuia* sp.)wood. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 50, n. 1, p. 71–76, 2016.
- ZUKOWSKI, B.; SILVA, F. DE A.; TOLEDO FILHO, R. D. Design of strain hardening cement-based composites with alkali treated natural curauá fiber. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 150–159, 2018.