

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

JOÃO D'ANUZIO LIMA DE AZEVEDO

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE BORRACHA
NATURAL CONTENDO CARGAS DE FIBRAS DE CURAUÁ**

Bauru – SP

2024

JOÃO D'ANUZIO LIMA DE AZEVEDO

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE BORRACHA
NATURAL CONTENDO CARGAS DE FIBRAS DE CURAUÁ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus Bauru, para obtenção do título de Doutor em Ciências e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Virginia Mansanares Giacon.

Bauru – SP

2024

A994o Azevedo, João D'Anuzio Lima de.
Obtenção e caracterização de compósitos de
borracha natural contendo cargas de fibras de
curauá/João D'Anuzio Lima de Azevedo. --
Bauru, 2024
119 p.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru
Orientador: José Roberto Ribeiro Bortoleto
Coorientadora: Virginia Mansanares Giacon

1. Materiais compósitos. 2. Curauá. 3.
Borracha natural. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Dados fornecidos pelo autor(a).

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE JOÃO D'ANUZIO LIMA DE AZEVEDO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 29 dias do mês de outubro do ano de 2024, às 14h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de JOÃO D'ANUZIO LIMA DE AZEVEDO, intitulada **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE BORRACHA NATURAL CONTENDO CARGAS DE FIBRAS DE CURAUÁ**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO RIBEIRO BORTOLETO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia UnespSorocaba, Prof. Dr. JOSÉ COSTA DE MACEDO NETO (Participação Virtual) do(a) Escola Superior de Tecnologia / Universidade do Estado do Amazonas, Prof. Dr. TERSIO GUILHERME DE SOUZA CRUZ (Participação Virtual) do(a) Campus de Sorocaba / Universidade Federal de São Carlos, Prof.^a Dr.^a MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES SILVA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - Unesp/ Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. AUGUSTO BATAGIN NETO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Ciências e Tecnologia / Instituto de Ciências e Engenharia - Unesp/Câmpus de Itapeva. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO RIBEIRO BORTOLETO

DEDICATÓRIA

À minha família, minha razão de viver.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, que sempre disse; “um dia, você vai ser um doutor”. Enfim, ela acertou... só não sabia de qual tipo!

À minha esposa Eylla e ao meu filho Giovanni, pela compreensão e apoio ao longo desse caminho. Eles são a minha maior motivação!

Ao professor Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto e à professora Dr^a. Virginia Mansanares Giacon, pela atenção, orientação e contribuição dada em todas as etapas desta pesquisa.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e à Universidade Estadual Paulista (UNESP), pela oportunidade de ingressar e cursar o Programa de Doutorado Interinstitucional (DINTER) ofertado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais (POSMAT).

Ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC) da FT/UFAM; ao Laboratório de Ensaio Físico-Químicos de Materiais (LFQM) da FT/UFAM; ao Laboratório de Materiais (LABMAT) da FT/UFAM; Ao Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da EST/UEA; Ao Laboratório de Materiais e Processamento (LabMatPro) da EST/UEA; Ao Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos (CMBIO) da ESA/UEA; À Central Analítica Multiusuário (CA-IFAM-CMC) do IFAM. Todos pelo apoio na realização de ensaios e análises.

A todos aqueles que apoiaram e contribuíram para a realização desse sonho.

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente e as implicações associadas às atividades humanas vem fomentando uma busca crescente por materiais de baixo impacto ambiental. Neste sentido, um seguimento em contínuo desenvolvimento tem sido a aplicação de fibras vegetais como reforço em compósitos de matrizes poliméricas naturais, sendo possível gerar materiais com propriedades térmicas e mecânicas melhoradas. Neste trabalho foram analisadas as propriedades térmicas e mecânicas de um compósito de borracha natural reforçado com fibras de curauá. Amostras de compósitos com diferentes teores em peso de fibra natural (2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15%) foram obtidas. O tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH) foi utilizado para modificar a superfície da fibra de curauá e melhorar a ligação na interface matriz/reforço. Resultados mostraram que o tratamento alcalino elevou o índice de cristalinidade da fibra em 19,2%, porém não afetou o padrão de espalhamento dos compósitos. A análise termogravimétrica revelou que estabilidade térmica dos compósitos e pouca influência tanto pelo teor de fibras quando pela mercerização. Já a condutividade térmica apresentou reduções de até 34,2% em relação à matriz para baixos teores de fibra, enquanto houve tendência de aumento para cargas de fibras mais elevadas. A dureza dos compósitos variou de 25,4 a 62,5 ShA e pode ser aprimorada em até 134% para cargas 15% de fibra natural. A resistência à tração dos compósitos apresentou melhora de até 161% para amostras com cargas de 2,5% de fibra tratada, porém houve tendência de decréscimo com o aumento do teor de fibra, indicando problemas de distribuição da fase dispersa. Portanto, em geral, os compósitos fabricados com fibras tratadas apresentaram propriedades melhores àqueles sem tratamento, evidenciando melhor adesão interfacial e, por fim, o teor de 2,5% de fibra apresenta melhor combinação entre propriedades térmicas e mecânicas.

Palavras-chaves: Fibra de curauá, borracha natural, compósito, lignocelulósica.

ABSTRACT

The concern for the environment and the implications associated with human activities have been driving a growing search for materials with low environmental impact. In this regard, a continuously developing area is the application of plant fibers as reinforcement in natural polymer matrix composites, enabling the production of materials with enhanced thermal and mechanical properties. In this work, the thermal and mechanical properties of a natural rubber composite reinforced with curauá fibers were analyzed. Composite samples with different weight fractions of natural fiber (2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, and 15%) were obtained. Alkaline treatment with sodium hydroxide (NaOH) was used to modify the surface of the curauá fiber and improve the matrix/reinforcement interface bonding. Results showed that the alkaline treatment increased the fiber's crystallinity index by 19.2%, but did not affect the scattering pattern of the composites. Thermogravimetric analysis revealed that the thermal stability of the composites was only slightly influenced by both the fiber content and the mercerization process. In contrast, thermal conductivity showed reductions of up to 34.2% relative to the matrix for low fiber content, while there was a trend toward increase at higher fiber contents. The hardness of the composites varied from 25.4 to 62.5 ShA and could be improved by up to 134% for 15% of natural fiber content. The tensile strength of the composites showed an improvement of up to 161% for samples with 2.5% treated fiber load, although there was a decreasing trend with increasing filler load, indicating issues with the distribution of the dispersed phase. Therefore, in general, the composites made with treated fibers exhibited better properties compared to those without treatment, demonstrating improved interfacial adhesion. Finally, the 2.5% fiber content presented the best combination of thermal and mechanical properties.

Keywords: *Curauá* fiber, Natural rubber, composite, lignocellulosic.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE CARGA.	5
FIGURA 2.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE MATRIZ.	6
FIGURA 2.3 - CULTURA DE MUDAS DE CURAUÁ (A), A FIBRA DE CURAUÁ (B).	7
FIGURA 2.4 - MÁQUINA DESFIBRADORA (A), FIBRA RECÉM PRODUZIDA (B) E MUCILAGEM (C). ..	8
FIGURA 2.5 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA MICROESTRUTURA E ESTRUTURA MOLECULAR DAS PAREDES DE UMA FIBRA NATURAL.	9
FIGURA 2.6 - ANÁLISE TÉRMICA DA FIBRA DE CURAUÁ EM ATMOSFERA DE NITROGÊNIO (A) E EM ATMOSFERA DE OXIGÊNIO (B).	13
FIGURA 2.7 - MEV DA FIBRA DE CURAUÁ NÃO-TRATADA (A) MERCERIZADA (B).	20
FIGURA 2.8 - ESPECTROSCOPIA DO INFRAVERMELHO (FTIR) PARA FIBRAS DE CURAUÁ NATURAIS (A) E COM TRATAMENTO ALCALINO 5% DE NaOH (B).	22
FIGURA 2.9 - APONTAMENTOS SOBRE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CURAUÁ.	23
FIGURA 2.10 - ESTRUTURA MOLECULAR DO CIS-1,4-POLIISOPROPENO.	27
FIGURA 2.11 - LIGAÇÕES CRUZADAS NO PROCESSO DE VULCANIZAÇÃO DA BORRACHA.	29
FIGURA 2.12 - APONTAMENTOS SOBRE A BORRACHA NATURAL REFORÇADA COM FIBRA VEGETAL.	36
FIGURA 3.1 - (A) FIBRA DE CURAUÁ EM ROLO, (B) FIBRA CORTADA E (C) MOÍDA.	39
FIGURA 3.2 - TRATAMENTO ALCALINO. (A) FIBRAS CORTADAS, (B) IMERSÃO EM SOLUÇÃO AQUOSA DE 5% DE NaOH, (C) LAVAGEM COM ÁGUA DESTILADA, (D) FIBRAS TRATADAS E SECAS.	40
FIGURA 3.3 - (A) LÁTEX PRÉ-VULCANIZADO, (B) FIBRA DE CURAUÁ, (C) MISTURA HOMOGENEIZADA, (D) COMPÓSITO EM MOLDE DE VIDRO.	42
FIGURA 3.4 - ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DA FIBRA DE CURAUÁ.	44
FIGURA 3.5 - ENSAIO DE FTIR-ATR DAS FIBRAS DE CURAUÁ TRATADAS E NÃO-TRATADAS.	45
FIGURA 3.6 - MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV), JEOL JSM IT500 HR.	46
FIGURA 3.7 - DIFRATÔMETRO DE RAIO X (DRX), SHIMADZU MAXIMA XRD 7000.	47
FIGURA 3.8 - (A) USO DO C-THERM PARA (A) FIBRA DE CURAUÁ E (C) COMPÓSITO C12,5%-FNT.	48
FIGURA 3.9 - DURÔMETRO KAPTRON, MODELO FE-0063.	49
FIGURA 3.10 - PROJETO DE MOLDE DE CORTE DOS CORPOS DE PROVA, CONFORME ISO 37:2017.	50
FIGURA 3.11 - CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.	50

FIGURA 4.1 - MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS DE BORRACHA NATURAL E FIBRA DE CURAUÁ.....	55
FIGURA 4.2 - TEOR DE UMIDADE EM AMOSTRAS DE COMPÓSITOS COM FIBRAS TRATADAS E NÃO TRATADAS.	58
FIGURA 4.3 - FTIR DAS FIBRAS DE CURAUÁ NÃO TRATADAS E TRATADAS COM NaOH.	60
FIGURA 4.4 - COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS DO INFRAVERMELHO DA FIBRA DE CURAUÁ, DA BORRACHA NATURAL E DOS COMPÓSITOS COM 2,5%, 10% E 15% DE REFORÇO.	63
FIGURA 4.5 - DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X DAS FIBRAS DE CURAUÁ, DA BORRACHA NATURAL E DOS COMPÓSITOS.	66
FIGURA 4.6 - CURVAS DE TG E DTG DAS FIBRAS DE CURAUÁ TRATADAS E NÃO TRATADAS.	68
FIGURA 4.7 - CURVAS DE TGA E DTG DOS COMPÓSITOS COM (A) FIBRA NÃO TRATADA – FNT E COM (B) FIBRAS TRATADAS – FT.....	71
FIGURA 4.8 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/M-K) DAS AMOSTRAS DE CURAUÁ, BORRACHA E COMPÓSITOS COM FIBRAS TRATADAS (FT) E NÃO TRATADAS (FNT).	76
FIGURA 4.9 - CALOR ESPECÍFICO (J/KG-K) DAS AMOSTRAS DE CURAUÁ, BORRACHA E COMPÓSITOS COM FIBRAS TRATADAS (FT) E NÃO TRATADAS (FNT).	79
FIGURA 4.10 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA (M ² /S) DAS AMOSTRAS DE CURAUÁ, BORRACHA E COMPÓSITOS COM FIBRAS TRATADAS (FT) E NÃO TRATADAS (FNT).	79
FIGURA 4.11 - DUREZA MÉDIA DOS COMPÓSITOS COM FIBRA DE CURAUÁ TRATADA E NÃO TRATADA EM ESCALA SHORE A.	81
FIGURA 4.12 - (A) LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, (B) MÓDULO DE ELASTICIDADE A 100% DE ALONGAMENTO E (C) ALONGAMENTO NA RUPTURA DOS COMPÓSITOS DE BORRACHA NATURAL E FIBRA DE CURAUÁ TRATADA E NÃO TRATADA.	84
FIGURA 4.13 - MEV DAS FIBRAS DE CURAUÁ NÃO TRATADAS AMPLIADAS EM 190X (A) E 900X (B).	88
FIGURA 4.14 - MEV DAS FIBRAS DE CURAUÁ TRATADAS COM NaOH AMPLIADAS EM 200X (A) E 900X (B).	88
FIGURA 4.15 - ASPECTO DOS LUMENS DAS FIBRAS DE CURAUÁ (A) NÃO TRATADAS E (B) TRATADAS.	89
FIGURA 4.16 - MEV DOS COMPÓSITOS (A) C2,5%-FNT (B) C2,5%-FT (C) C10%-FNT (D) C10%-FT (E) C15%-FNT E (F) C15%-FT, COM AUMENTO DE 37X.....	91
FIGURA 4.17 - DETALHES DA REGIÃO DE FRATURA DOS COMPÓSITOS (A) C2,5%-FNT AUMENTADO 250X E (B) C2,5%-FT AUMENTADO 1300X.	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÁSTICAS DE DIFERENTES FIBRAS NATURAIS SELECIONADAS.	12
TABELA 2.2 - PROPRIEDADES DE FLEXÃO DE DIFERENTES FIBRAS NATURAIS SELECIONADAS. ...	12
TABELA 2.3 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA FIBRA DE CURAUÁ COM REFORÇO EM COMPÓSITOS.	24
TABELA 2.4 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA BORRACHA	27
TABELA 2.5 - DIFERENÇAS DAS PROPRIEDADES DA BORRACHA VULCANIZADA E NÃO-VULCANIZADA.	29
TABELA 2.6 - DIVERSAS PROPRIEDADES DA BORRACHA NATURAL (POLI ISOPRENO) NÃO VULCANIZADA.	30
TABELA 2.7 - RELAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS SELECIONADAS E ABORDADAS EM ESTUDOS ANTERIORES.	37
TABELA 3.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LÁTEX PRÉ-VULCANIZADO.	39
TABELA 3.2 - COMPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS EM PERCENTUAL EM MASSA.	41
TABELA 4.1 - COMPARATIVO DA DENSIDADE APARENTE MÉDIA DA FIBRA DE CURAUÁ DISPONÍVEL NA LITERATURA, EM G/CM ³	52
TABELA 4.2 - AGRUPAMENTO DAS MÉDIAS DE DENSIDADE APARENTE DAS AMOSTRAS DE FIBRA DE CURAUÁ USANDO O MÉTODO DE TUKEY NO INTERVALO DE 95% DE CONFIANÇA.....	53
TABELA 4.3 - COMPARATIVO DA DENSIDADE APARENTE MÉDIA DA BORRACHA NATURAL (NR) DISPONÍVEL NA LITERATURA, EM G/CM ³	54
TABELA 4.4 - AGRUPAMENTO DAS MÉDIAS DE DENSIDADE APARENTE DAS AMOSTRAS DE COMPÓSITOS USANDO O MÉTODO DE TUKEY NO INTERVALO DE 95% DE CONFIANÇA.	56
TABELA 4.5 - TEOR DE UMIDADE DAS FIBRAS DE CURAUÁ.	57
TABELA 4.6 - AGRUPAMENTO DAS MÉDIAS DO TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS USANDO O MÉTODO DE TUKEY NO INTERVALO DE 95% DE CONFIANÇA.	59
TABELA 4.7 - PRINCIPAIS BANDAS E ATRIBUIÇÕES DOS ESPECTROS DAS FIBRAS DE CURAUÁ.	61
TABELA 4.8 - BANDAS PRINCIPAIS BANDAS E ATRIBUIÇÕES DOS ESPECTROS DA BORRACHA NATURAL E DOS COMPÓSITOS.	64
TABELA 4.9 - ÍNDICES DE CRISTALINIDADE DA FIBRA DE CURAUÁ TRATADA E NÃO TRATADA...66	
TABELA 4.10 - RESUMO DA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA FIBRA DE CURAUÁ.	69

TABELA 4.11 - RESUMO DA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA BORRACHA NATURAL E DOS COMPÓSITOS.	72
TABELA 4.12 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA FIBRA DE CURAUÁ E DE OUTROS MATERIAIS.	74
TABELA 4.13- PROPRIEDADES TÉRMICAS DA FIBRA DE CURAUÁ COM AGRUPAMENTOS DO TESTE TUKEY.	75
TABELA 4.14 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS COMPÓSITOS COM AGRUPAMENTOS DO TESTE TUKEY.	80
TABELA 4.15 - AGRUPAMENTO DAS MÉDIAS DE DUREZA SHORE A DAS AMOSTRAS USANDO O MÉTODO DE TUKEY NO INTERVALO DE 95% DE CONFIANÇA.	83
TABELA 4.16 - AGRUPAMENTO DAS MÉDIAS RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, MÓDULO DE ELASTICIDADE E ALONGAMENTO NA RUPTURA DAS AMOSTRAS USANDO O MÉTODO DE TUKEY NO INTERVALO DE 95% DE CONFIANÇA.	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.1.1	Objetivo Geral	3
1.1.2	Objetivos específicos	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	CIÊNCIA DOS MATERIAIS – UMA BREVE INTRODUÇÃO	4
2.2	MATERIAIS COMPÓSITOS	4
2.3	FIBRA DE CURAUÁ	7
2.3.1	Tratamento alcalino com NaOH (Merceirização)	10
2.3.2	Propriedades mecânicas da fibra de Curauá	11
2.3.3	Propriedades térmicas da fibra de curauá.	12
2.3.4	Compósitos reforçados com fibra de curauá.	15
2.4	BORRACHA NATURAL	25
2.4.1	Látex natural e suas propriedades	26
2.4.2	Biocompósitos e eco-compósitos	30
2.4.3	Compósitos de borracha natural reforçados com fibras vegetais	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	AQUISIÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA	38
3.2	TRATAMENTO QUÍMICO DA FIBRA DE CURAUÁ	40
3.3	PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS	41
3.4	ENSAIOS REALIZADOS	43
3.4.1	Determinação da massa específica	43
3.4.2	Determinação do Teor de umidade	45
3.4.3	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	45
3.4.4	Microscopia de eletrônica de varredura (MEV)	46
3.4.5	Difratometria de Raios X (DRX)	46
3.4.6	Análise termogravimétrica.	47
3.4.7	Condutividade, capacidade e difusividade térmica	48
3.4.8	Dureza Shore A	49
3.4.9	Ensaio de resistência à tração	49
3.4.10	Teste de Tukey	51

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	MASSA ESPECÍFICA	52
4.1.1	Massa específica da fibra.....	52
4.1.2	Massa específica da matriz e dos compósitos	53
4.2	TEOR DE UMIDADE.....	56
4.3	ESPECTOMETRIA DO INFRAVERMELHO	59
4.4	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	65
4.5	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....	67
4.5.1	TG/DTG das fibras de curauá.....	67
4.5.2	TGA/DTG dos compósitos.....	69
4.6	CONDUTIVIDADE TÉRMICA, CALOR ESPECÍFICO E DIFUSIVIDADE TÉRMICA	73
4.6.1	Fibra de curauá	73
4.6.2	Compósitos	75
4.7	DUREZA SHORE A	81
4.8	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	83
4.9	MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA.....	87
4.9.1	Morfologia das fibras de curauá	87
4.9.2	Fotografia dos compósitos.....	89
5	CONCLUSÕES.....	93
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
7	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca por materiais ecologicamente amigáveis (*ecofriendly*) e de baixo custo vem aumentando ao longo das últimas décadas. Isto se deve, em parte, à conscientização da sociedade moderna sobre os impactos ambientais associados à atividade humana, motivando a utilização de materiais obtidos, em sua maioria, de fontes renováveis ou de origem natural. Neste sentido, o Brasil tem alto potencial de contribuição, pois é um grande produtor de fibras lignocelulósicas, com mais de vinte espécies cultivadas em seu território (ROCHA *et al.*, 2022).

Pesquisas já demonstraram a aplicabilidade de diversas fibras vegetais como reforços em compósitos de matrizes poliméricas e, de acordo com Weber (2018), aprimoram significativamente as propriedades mecânicas destes compósitos.

Dentre várias fibras naturais, destaca-se a de curauá (*Ananas erectifolius*), uma planta da família do abacaxi, devido especialmente a sua similaridade com a fibra sintética de vidro, em termos de propriedades mecânicas (ZAH *et al.*, 2007). Tal fato proporcionou sua exploração comercial entre 2005 e 2016 pela empresa PEMATEC TRIANGEL DO BRASIL LTDA (PEMATEC), no município de Santarém-PA, empregando-a na fabricação de mantas agulhadas para a indústria automobilística, gerando emprego e renda na região (SATYANARAYANA, 2007).

Além disso, a fibra de curauá também possui boa estabilidade térmica, apresentando perda de massa a partir de aproximadamente 200°C (ORNAGHI Jr, *et al.*, 2014), todavia, embora sua caracterização térmica tenha sido objeto de estudo de vários pesquisadores, há pouca informação sobre a condutividade térmica deste material, propriedade essencial para classificação de materiais isolantes. Ainda assim, Lopes (2011) afirmou que esta fibra possui propriedades térmicas adequadas para aplicações como isolante térmico, que segundo o autor, apresentou uma condutividade térmica variando entre 0,0132 a 0,0252 W/m-K e, que devido sua baixa densidade, pode resultar em compósitos de baixo custo.

Apesar do potencial da fibra de curauá, houve um declínio da sua produção a partir de 2014 (IBGE, 2021), principalmente, devido à falência da PEMATEC. Já no

Estado do Amazonas, a produção da fibra de curauá é pouco expressiva, com o cultivo em pequenas comunidades, voltado quase que exclusivamente ao artesanato (assim como no Pará, atualmente). Por esta razão, há um esforço por parte dos governos estadual e federal em incentivar o desenvolvimento do mercado de fibras vegetais e aumentar o volume de produção e as variedades disponíveis. Assim, pesquisas que buscam agregar valor às fibras naturais podem contribuir para desenvolvimento sustentável e o crescimento econômico na região amazônica.

Outro material natural abundante com potencial para fabricação de compósitos é a borracha natural, um elastômero extraído da seringueira (*Hevea brasiliensis*). Este polímero já foi utilizado em diversas pesquisas como matriz em compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas, tais como juta, sisal, coco, bambu, entre outras (ARPITHA e YOGESHA, 2017; HASAN *et al.*, 2022). Nesses estudos, tais compósitos de borracha natural e fibras vegetais tendem a apresentar um aumento significativo em suas propriedades mecânicas em relação a matriz pura. Adicionalmente, os compósitos de borracha reforçados com fibra de piaçava e de bainha de coqueiro mostraram bons resultados como isolantes termoacústicos (SANTOS, 2015; SOUZA FILHO, 2015).

Portanto, um material constituído de borracha natural e fibras de curauá tem o potencial de apresentar resistência mecânica razoável para aplicações na indústria, ou construção civil, e características térmicas compatíveis ao uso como isolante térmico.

Diante disso, este trabalho busca desenvolver e caracterizar as propriedades térmicas e mecânicas de um compósito polimérico à base de borracha natural e fibras vegetais de curauá, contribuindo para o fortalecimento da econômica local do Estado do Amazonas e o desenvolvimento de produtos sustentáveis capazes de substituir outros sintéticos disponíveis no mercado.

A presente tese está organizada de forma tradicional, onde inicialmente é apresentada uma revisão teórica e bibliográfica acerca de estudos e pesquisas de materiais compósitos, fibra de curauá e borracha natural. Posteriormente, em materiais e métodos, serão indicados o método de preparação das fibras, o tratamento químico adotado, a fabricação dos compósitos e os ensaios a serem aplicados na caracterização do material. Por fim, são discutidos e apresentados os resultados

pertinentes às características mecânicas e térmicas do compósito e suas possíveis aplicações.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Obter e caracterizar as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos poliméricos com matriz de borracha natural e cargas de fibra de curauá.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar a condutividade térmica da fibra de curauá;
- Produzir compósitos poliméricos com matriz de borracha natural com diferentes teores de fibra de curauá (2,5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% em massa);
- Investigar a influência do tratamento químico com NaOH nas propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos;
- Analisar o efeito da concentração em massa da fibra de curauá nas propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos;
- Estudar a morfologia dos compósitos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIÊNCIA DOS MATERIAIS – UMA BREVE INTRODUÇÃO

A ciência dos materiais é a área do conhecimento que pesquisa as relações entre a estrutura e as propriedades de um material (CALLISTER, 2020). A maior parte dos materiais existentes pode ser classificada em três tipos básicos: metais, cerâmicos e polímeros.

Comumente os materiais metálicos são constituídos por elementos metálicos, onde os elétrons das últimas camadas estão dispersos por todo o material sem pertencer a um átomo específico (ligação metálica), por conta disso, são excelentes condutores elétricos. Já os cerâmicos, são constituídos por elementos metálicos e não-metálicos, normalmente apresentando bom isolamento térmico e elétrico (argilas, cimentos e vidros). Por fim, os polímeros são materiais compostos por carbono, hidrogênio e outros elementos não-metálicos, muitos deles são orgânicos com estruturas moleculares muito longas (plásticos e borrachas, por exemplo).

Callister (2020) menciona três grupos adicionais que podem ser pertinentes: compósitos, que são uma combinação de dois ou mais materiais para maximizar as características de seus componentes; semicondutores, que têm propriedades elétricas intermediárias entre isolantes e condutores elétricos; e biomateriais, que são usados em componentes implantados em corpos humanos e devem ser atóxicos e não reagir com o interior do corpo humano.

Por questão de alinhamento com os objetivos do presente trabalho, a próxima seção abordará em maiores detalhes os conceitos básicos e as principais características dos materiais compósitos.

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

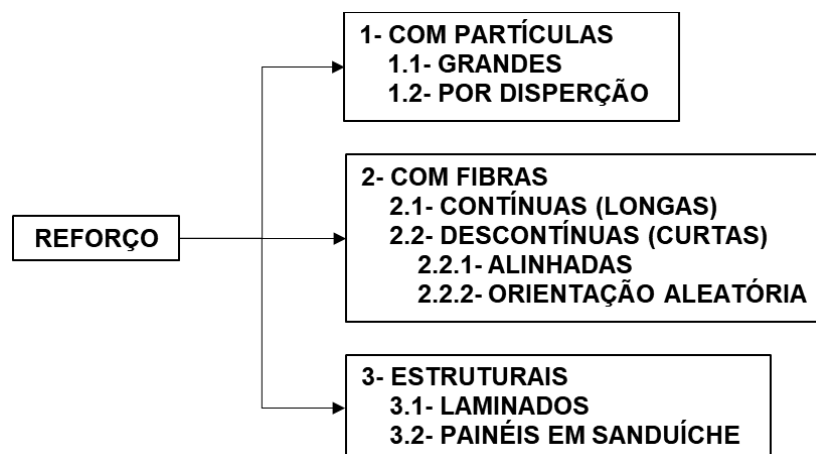
Os materiais compósitos são constituídos de uma mistura entre dois ou mais materiais, geralmente distintos quimicamente, onde é possível observar parcelas

significativas das propriedades de cada um dos seus constituintes (THAKUR et al, 2017).

Morelli (2022) cita que a maioria dos compósitos são compostos por apenas duas fases; uma contínua, que envolve a outra fase; e outra dispersa. Essa fase dispersa pode ser classificada de acordo com suas características quanto à forma das partículas, e seu tamanho, sua distribuição e orientação. De maneira geral, os materiais compósitos podem ser classificados de acordo o tipo de reforço e quanto à natureza da matriz.

Os compósitos podem ser divididos entre os reforçados com partículas, reforçados com fibras e os estruturais, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Classificação dos materiais compósitos em função do tipo de carga.



Fonte: Adaptado de Callister (2020).

Os compósitos contendo partículas como cargas podem ainda se subdividir entre “partículas grandes” e “por dispersão”. A diferença entre ambas está no nível de interação entre a matriz e o reforço. De modo sucinto, a formação de compósitos baseados em carga de partícula grande se dá a nível macroscópico e as propriedades do compósito são influenciadas pelo teor, tamanho e da adesão entre a matriz e a partícula, sendo frequentemente utilizados em compósitos de matrizes de materiais plásticos e elastoméricos. Já o carregamento por dispersão, a interação matriz/carga é a nível atômico ou molecular, por isso, o tamanho das partículas varia entre 10 e

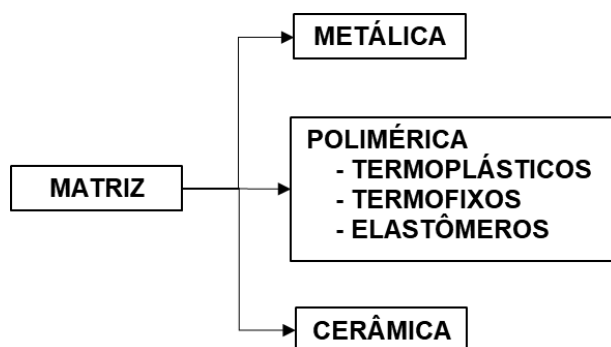
100 nm. É comumente empregado em compósitos de ligas metálicas e a relação entre a partícula e as discordâncias no interior da matriz tem papel crucial nas propriedades do material resultante (CALLISTER, 2020).

Os compósitos reforçados com fibra são aqueles cuja carga se apresenta na forma de fibra, empregando-a onde se necessita de materiais de propriedades mecânicas elevadas com constituintes de baixa densidade, ou seja, mais leves que outros materiais puros de mesma rigidez. As propriedades destes compósitos são influenciadas pelo comprimento das fibras e, quando curtas, pela sua orientação (MORELLI, 2022).

Por fim, para Shackelford (2022), os compósitos estruturais são aqueles cujas as propriedades dependem tanto dos atributos e da geometria dos componentes. Dividem-se em laminados, onde os componentes são empilhados em camadas com alinhamento preferencial de alta resistência, e painéis sanduíches, os quais são constituídos por duas faces externas mais resistentes separadas por uma região central (recheio) menos densa.

Outrossim, compósitos também se classificam de acordo com a matriz utilizada, podendo ser metálica, cerâmica e polimérica, cabendo subdivisões conforme visto na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Classificação dos materiais compósitos em função do tipo de matriz.



Fonte: Adaptado de Souza Filho (2015).

2.3 FIBRA DE CURAUÁ

O curauá (*Ananas erectifolius*) (Fig. 2.3a) é uma bromélia pertencente à família do abacaxi (*Ananas comosus*), tipicamente amazônica. A planta já era conhecida por povos pré-colombianos, os quais utilizavam a fibra (Fig. 2.3b) para a fabricação de cordas e tecidos (SIQUEIRA, 2006). A plantação racional se deu no início do Séc. XX, ao longo do rio Amazonas, principalmente no Estado do Pará, tendo seu auge de cultivo no município de Santarém (PA) (SATYANARAYANA, 2007), quando sua fibra foi utilizada na fabricação de mantas para forro de teto de automóveis entre 2005 e 2016.

Figura 2.3 - Cultura de mudas de curauá (a), A fibra de curauá (b).



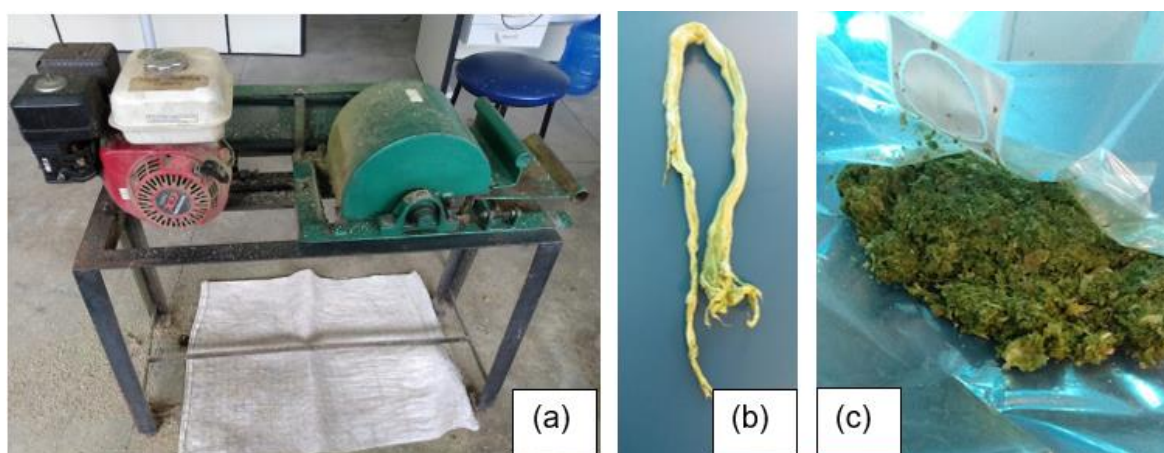
Fonte: Autor (2024).

Segundo Silva (2014), as folhas do curauá podem chegar até 1,50 m de altura e 4,00 cm de largura, são rígidas, eretas e planas. O vegetal também fornece um fruto similar ao abacaxi comum, porém, menor e impróprio ao consumo humano.

As mudas de curauá normalmente estão prontas para a primeira colheita após um ano de plantio e, ulteriormente, de 3 a 4 meses. Conforme estimativas de Sena (2023), o rendimento da fibra de curauá é de 6% do peso da folha, onde, em média, são colhidas 48 folhas por ano, o que equivale a 3,0 kg de folha, podendo render até 3,6 t de fibra seca ao ano por hectare plantado, além de 60 t de mucilagem ao ano como subproduto (Fig. 2.4c), a qual pode ser reaproveitada como adubo orgânico ou insumo para ração animal.

A obtenção da fibra se dá pelo processo de desfibramento das folhas, manualmente ou com o auxílio de uma máquina desfibradora (Fig. 2.4a). A fibra recém produzida (Fig. 2.4b) deve ser lavada e posta para secar em estufa ou ao sol. No caso deste último, em até 5 dias, a fibra estará seca o suficiente para ser esticada por choque mecânico (a fibra é lançada continuamente sobre uma superfície rígida) e, por fim, pronta para o uso artesanal (fabricação de linha têxtil, e.g.).

Figura 2.4 - Máquina desfibradora (a), Fibra recém produzida (b) e Mucilagem (c).



Fonte: Autor (2024).

O resultado disso é uma fibra altamente resistente, com baixa densidade, renovável e biodegradável (BORGES, 2019), de baixo custo e potencial substituta da fibra de vido (ZAH *et al.*, 2007).

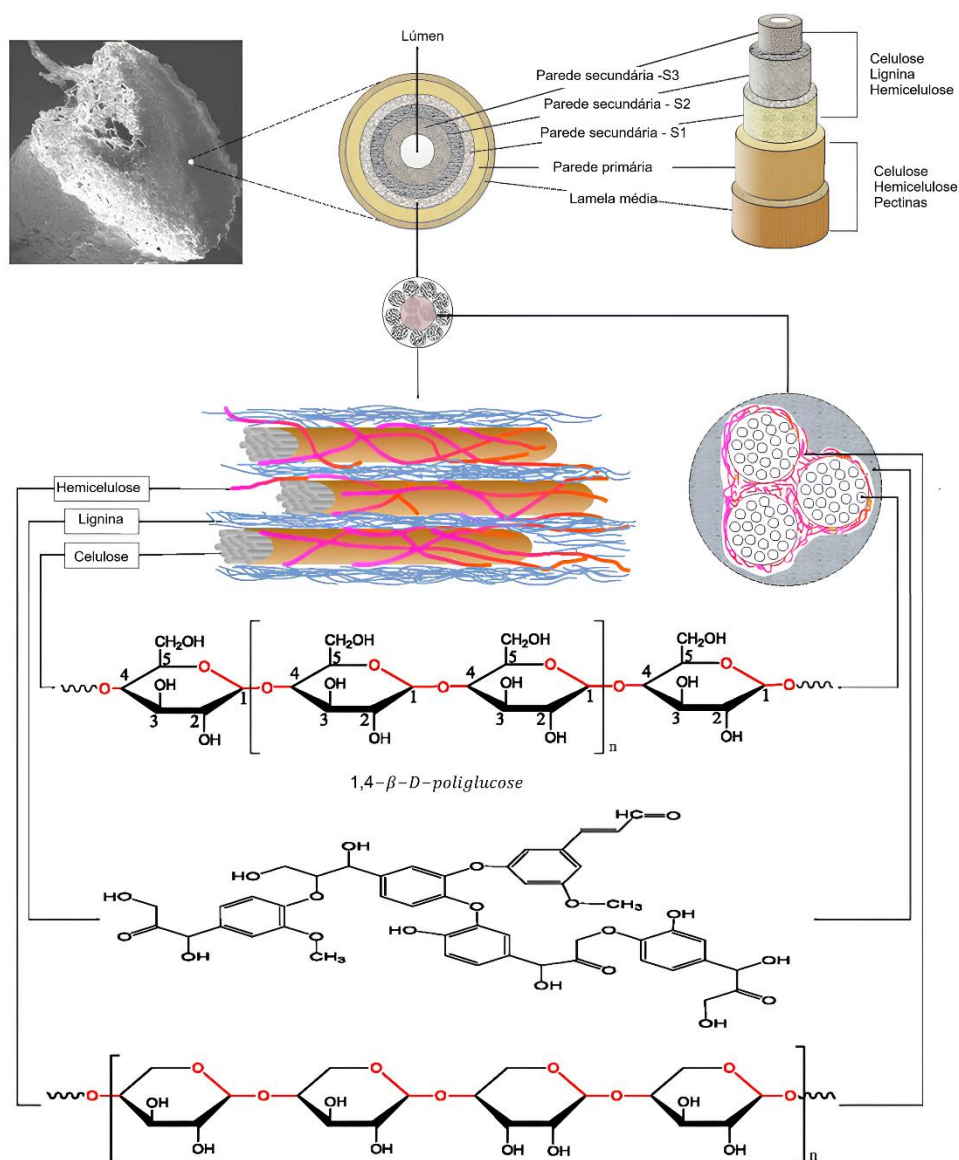
A fibra de curauá é principalmente composta por 73,6% de Celulose, 9,9% de Hemicelulose, 7,5% de Lignina, 0,9% de cinzas e 7,9% de umidade (SPINACÉ *et al.*, 2009), apresentando uma estrutura complexa conforme visto na Figura 2.5.

Cada feixe de fibra é composto por diversas células individuais, conectadas entre si por uma matriz de lignina. Essas células possuem uma estrutura bem definida, formada por uma parede primária, três camadas secundárias ricas em celulose e hemicelulose, além de uma cavidade central chamada lúmen, que desempenha um papel importante na leveza e na resistência estrutural das fibras (PINTO, 2019).

A celulose, um polissacarídeo semicristalino com grandes quantidades do grupo hidroxila (Fig. 2.5), representa a maior porção da fibra de curauá o que lhe confere uma natureza hidrofílica (WEBER, 2018). Já a hemicelulose é um polímero

ramificado de cadeia aberta, totalmente amorfo, fortemente ligado à celulose por pontes de hidrogênio, parcialmente solúvel em água e é higroscópica (TEXEIRA, 2019). Por sua vez, a lignina é um polímero majoritariamente aromático, extremamente complexo e amorfo, sendo o componente que apresenta a menor absorção de água desta fibra (LIBERA Jr, 2019b). Fibras vegetais que contenham lignina e celulose também são conhecidas na literatura como “lignocelulósicas”. Contudo, de acordo com Silva (2014), a concentração de cada componente pode variar em razão da espécie (variedade branca ou roxa) e fatores como plantio e tempo de colheita.

Figura 2.5 - Diagrama esquemático da microestrutura e estrutura molecular das paredes de uma fibra natural.



Fonte: Adaptado de Wei (2014).

2.3.1 Tratamento alcalino com NaOH (Merceirização)

A modificação superficial de fibras vegetais tem sido amplamente estudada como uma estratégia para melhorar a adesão matriz/carga e as propriedades térmica e mecânicas em compósitos poliméricos. Tais modificações visam mitigar as limitações naturais das fibras, como alta absorção de umidade e baixa compatibilidade com matrizes poliméricas, fatores que comprometem as propriedades mecânicas e a estabilidade dimensional dos compósitos (KABIR *et al.*, 2012; SAHU e GUPTA, 2020).

Uma das técnicas mais comuns para a modificação superficial de fibras vegetais é o tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH). Esse processo envolve uma reação química na qual o NaOH reage com os grupos hidroxila ($-OH$) presentes nas moléculas de celulose (semicristalina), hemicelulose e lignina da fibra vegetal. Essa reação resulta na formação de alcóxidos ($-O-Na^+$) e na liberação de água (H_2O), promovendo a ruptura de ligações de hidrogênio internas e a remoção de componentes amorfos, como hemicelulose, lignina, ceras e óleos, aumentando a rugosidade superficial, reduzindo a hidrofobicidade e melhorando a adesão entre a fibra e a matriz polimérica (KABIR *et al.*, 2012). O esquema da reação está representado abaixo pela Equação 2.1.



No caso específico da fibra de curauá, estudos indicam que concentrações de NaOH entre 2% e 10% são comumente utilizadas, dependendo do objetivo do tratamento e das características desejadas para a fibra. O tempo de imersão geralmente varia de 1 a 3 horas, em temperaturas ambiente ou levemente elevadas (SAHU e GUPTA, 2020).

É importante destacar que o controle das condições do tratamento, como a concentração do NaOH e o tempo de imersão, é fundamental para evitar a degradação excessiva da estrutura da fibra. Tratamentos severos podem levar à despolimerização da celulose e à redução da resistência mecânica, comprometendo o desempenho final do compósito. Dessa forma, é necessário um equilíbrio entre a intensidade do

tratamento e a preservação das propriedades estruturais da fibra (KABIR et al., 2012; SAHU e GUPTA, 2020).

2.3.2 Propriedades mecânicas da fibra de Curauá

As propriedades mecânicas da fibra de curauá já foram amplamente estudadas. Desde o vislumbre de sua aplicabilidade ainda na década de 90 (Séc. XX), a fibra tem se consolidado como uma das mais resistentes e promissoras como substituição às sintéticas, garantindo o interesse de pesquisadores até os dias atuais (GONÇALVES *et al*, 2018).

Segundo Sales (2015), há uma grande dispersão nos valores da resistência a tração (Tab. 2.1) da fibra de curauá, entretanto, isto é comum quando se trata de fibras naturais, pois fatores dimensionais e a geometria da seção transversal dos fios da fibra influenciam diretamente nas propriedades mecânicas.

A Tabela 2.1 apresenta algumas propriedades físicas e elásticas de uma pequena gama de fibras vegetais existentes no Brasil, adaptada dos trabalhos de revisão de Zwawi (2021) e Pickering et al. (2016). Nela é possível observar que, embora a fibra de curauá tenha densidade próxima às da juta e sisal (ambas fibras comercializadas no Estado do Amazonas) sua resistência à tração pode ser até 5,75 vezes maior que a da juta e até 2,25 vezes mais elevada que a de sisal. Contudo, a fibra de curauá tem relevância inexpressível na economia local.

Todas as fibras lignocelulósicas apresentam resistência a tração inferior à da fibra de vidro sintética, amplamente utilizada no mundo. Entretanto, a baixa densidade das fibras naturais pode permitir a fabricação de compósitos leves com boa resistência mecânica (BORGES, 2019).

Arpitha e Yogesha (2017) reuniram informações de diversas pesquisas acerca das propriedades de flexão para diversas fibras vegetais, incluindo a de curauá, apresentadas na Tabela 2.2. É possível averiguar que a fibra de curauá possui módulo e resistência à tração superiores a todas as fibras listadas. Em relação à juta, a resistência à flexão da fibra de curauá pode chegar a ser mais de 4 vezes maior, enquanto em relação ao sisal pode chegar a ser 8,5 mais elevada. Os autores ainda

afirmam que as propriedades mecânicas das fibras naturais oferecem uma boa oportunidade de reforço em compósitos cimentícios e em termoplásticos.

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e elásticas de diferentes fibras naturais selecionadas.

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Diâmetro (µm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento até ruptura (%)
Bambu ¹	0,6 - 1,11	240 - 330	140 - 800	17	1.4
Banana ¹	1.35	50 - 250	529 - 914	27 - 32	3
Coco ^{1,2}	1,2 - 1,5	100 - 450	175 - 180	6	30
Curauá ¹	0,57 - 1,43	170	500 - 1150	11.8	3,7 - 4,3
Juta ^{1,2}	1,3 - 1,5	20 - 200	200 - 773	26.5	1,5 - 1,8
Folha do abacaxi ¹	0,8 - 1,6	20 - 80	180 - 1627	53	1,6 - 14,5
Piaçava ¹	1.4	-	134 - 143	-	7,8 - 21,9
Casca do abacaxi ¹	0,8 - 1,6	8 - 41	170 - 1627	60 - 82	2.4
Sisal ^{1,2}	1.5	50 - 300	511 - 635	9 - 24	3 - 7
Vidro ²	2.5	-	2000 - 3500	70 - 72	-

Fonte: Adaptado de Zwawi (2021)¹ e Pickering *et al.* (2016)².

Tabela 2.2 - Propriedades de flexão de diferentes fibras naturais selecionadas.

Fibra	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de flexão (GPa)
Bambu	40 - 50	4 - 5
Sisal	29,28 - 62,50	1,29 - 3,16
Curauá	200 - 250	12 - 20
Juta	60 - 80	6 - 8
Coco	29,23	-
Banana	57,33	8,9
Abacaxi	80,20	1,3

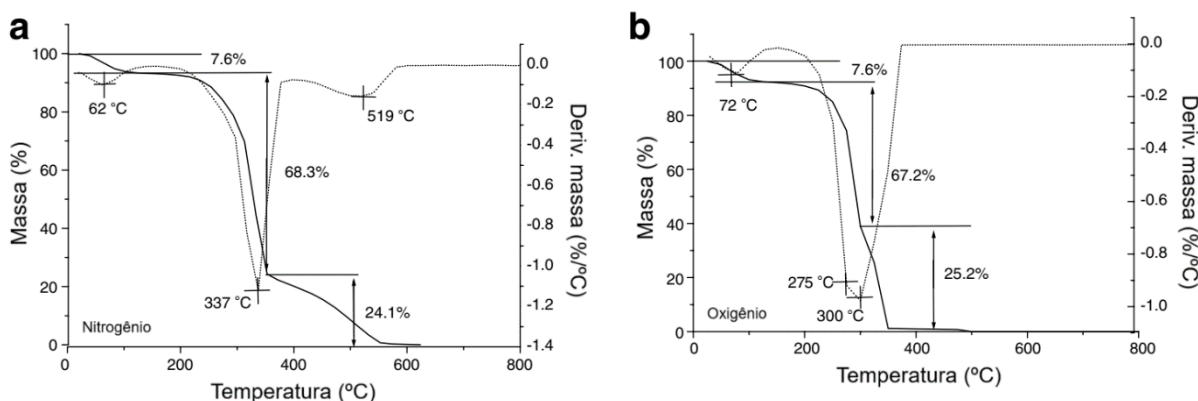
Fonte: Adaptado de Arpitha e Yogesha (2017).

2.3.3 Propriedades térmicas da fibra de curauá.

As propriedades térmicas da fibra de curauá foram detalhadamente estudadas por Tomczak *et al.* (2007). Neste trabalho, os autores realizaram uma análise termogravimétrica, em atmosfera de nitrogênio e de oxigênio, para avaliar a integridade da fibra sob a ação do calor, conforme apresentado nas Figuras 2.6a e 2.6b, respectivamente. Os mesmos observaram, em atmosfera de nitrogênio, que há

uma perda de massa de 7,6% referente à umidade contida na fibra até 150°C. Outras duas perdas de massa foram registradas, a primeira de 68,3% à 337°C e outra entre 337°C e 591°C. Foi sugerido que estas perdas se referem à degradação da celulose e da lignina. Já em atmosfera de oxigênio, a perda de água de 7,6% ocorreu à 72, seguida de uma perda de 67,2% à 275°C e 25,2% à 300°C. A degradação inicial da fibra de curauá se deu à 199°C em atmosfera de nitrogênio e à 203°C na presença de oxigênio.

Figura 2.6 - Análise térmica da fibra de curauá em atmosfera de nitrogênio (a) e em atmosfera de oxigênio (b).



Fonte: Adaptado de Tomczak *et al.* (2007).

Posteriormente, resultados similares foram observados por Sena Neto *et al.* (2014), onde fibras de diversas espécies de abacaxi foram caracterizadas. Contudo, notou-se que a fibra de curauá apresentou uma temperatura inicial de degradação de 256°C, 57°C a mais do que o visto por Tomczak *et al.* (2007), sendo esta a temperatura limite de trabalho da fibra. No mesmo artigo, os pesquisadores afirmam que a fibra de curauá possui boa estabilidade térmica.

Embora a estabilidade térmica da fibra de curauá tenha sido reconhecida, é importante considerar que esta propriedade pode ser influenciada por fatores ambientais e métodos de processamento. A variação na composição natural da fibra de curauá devido a fatores ambientais pode levar a inconsistências na sua estabilidade térmica, levantando preocupações sobre sua confiabilidade em aplicações que exigem resistência térmica consistente (CHERUNOVA *et al.*, 2020).

Por isso, convém realizar ensaios termogravimétricos nas fibras de curauá com o intuito de avaliar sua estabilidade térmica diante da sua aplicação como reforço em materiais compósitos.

Outra propriedade térmica relevante é a condutividade térmica (W/m-K), que consiste na habilidade que uma substância tem de transferir energia sob forma de calor, sendo uma propriedade essencial para análise do comportamento um material em relação à condução de calor (FERNANDES *et al.*, 2019). Os autores também citam que tal propriedade pode ser influenciada por diversos fatores, tais como a estrutura do material, sua composição química, a temperatura e a presença de impurezas ou defeitos.

Em vias gerais, materiais com alta condutividade térmica são frequentemente utilizados em aplicações onde a dissipação de calor é crucial, como é o caso em dispositivos eletrônicos. Por outro lado, materiais com baixa condutividade térmica são empregados em situações onde a redução da transferência de calor é desejada, como em isolamento térmico (SEGARRA *et al.*, 2018).

Çengel (2020) define o isolante térmico, como um material que transfere pouca energia na forma de calor, quando submetido a um gradiente de temperatura, ou seja, tem condutividade térmica baixa. Normalmente, materiais isolantes possuem valores para a condutividade térmica inferiores a 0,8 W/mK.

As informações relativas à condutividade térmica das fibras naturais são discutidas em diversas fontes. Mohamed *et al.*, (2023) destacam que a condutividade térmica de materiais compósitos é fortemente influenciada pelo tipo de fibra, onde algumas apresentam condutividade térmica mais baixa do que outras, o que pode torna-los adequados para aplicações de isolamento, auxiliando na redução na dissipação de calor.

No entanto, especificamente para a fibra de curauá, há pouca discussão sobre esta propriedade. O que normalmente se tem, é a determinação da condutividade térmica já para o compósito desenvolvido.

Neste sentido, alguns estudos mostram que a fibra de curauá tem potencial uso como material isolante. Silva Jr *et al.* (2017) citam que fibras lignocelulósicas

possuem baixa condutividade térmica. Dependendo da densidade, o valor pode variar entre 0,025 e 0,055 W/mK (SEKINO, 2016).

Até o presente momento, o único valor explícito para a condutividade térmica do curauá foi observado na dissertação de mestrado de Lopes (2011). Neste trabalho, a condutividade térmica foi calculada após a determinação da difusividade térmica através de uma técnica fotoacústica. O valor encontrado foi de $(1,92 \pm 0,6) \times 10^{-2}$ W/mK, sendo que o valor máximo deste intervalo está dentro da faixa citada por Sekino (2016).

2.3.4 Compósitos reforçados com fibra de curauá.

Nesta seção serão apresentados os resultados de várias pesquisas recentes, limitadas aos últimos 10 anos (2012 a 2022) em ordem cronológica, envolvendo materiais compósitos de matriz cerâmica ou polimérica reforçados com fibra de curauá. Também serão abordados trabalhos onde se discute a influência do tratamento químico da fibra nas propriedades do compósito estudado.

O interesse por estas fibras lignocelulósicas se deve pelo desempenho que as propriedades mecânicas e térmicas têm demonstrado (GONÇALVES *et al.*, 2018). Por esta razão, vários autores estudam sua aplicação em matrizes poliméricas. A exemplo disso, Borsoi *et al.* (2012), avaliaram as propriedades mecânicas, térmicas e reológicas de poliestireno expandido (EPS), virgem e reciclado, reforçado com 20% em massa de fibra de curauá. Foi observado que a adição da fibra levou a um aumento da resistência à tração, módulo de elasticidade, rigidez, estabilidade térmica e viscosidade de fusão dos compósitos. Os autores relataram que há duas temperaturas de degradação sendo a 1ª em 355°C, comum a ambos, a 2ª em 427°C e 416°C, respectivamente para compósitos com fibras de curauá e matrizes de EPS reciclado e virgem. Isso indica que os compósitos de EPS reciclados apresentaram estabilidade térmica melhores que os de matriz virgem. Entretanto, os compósitos apresentaram baixa adesão na interface matriz/carga, indicando a necessidade do uso de um agente de acoplamento.

Castro *et al.* (2012) estudaram um compósito de bio-polietileno de alta densidade (HDBPE) obtido da cana-de-açúcar, reforçado com fibra de curauá e

Polibutadieno Líquido com Terminação Hidroxílica (PBLH) como agente de compatibilização. Os compósitos foram fabricados com 5%p de PBLH e sem o agente. A concentração de fibra variou de 5 a 20%p. Os resultados indicaram que a presença de curauá deteriorou a resistência ao impacto tanto nos compósitos reforçados apenas com fibras naturais quanto naqueles com adição de agente de acoplamento. Já a resistência à flexão nos compósitos sem agente de acoplamento apresentou tendência redução enquanto aqueles com PBLH registraram melhora a partir de 15% de fibra e 5% de PBLH, indicando melhor adesão interfacial.

Almeida Jr *et al.* (2012) produziram um compósito intralaminado de fibras de vidro e curauá e resina de poliéster. As frações de fibra curauá e vidro variaram de 20 a 40% em volume. De maneira geral, as propriedades mecânicas, como dureza e resistência ao impacto foram melhoradas, com a incorporação da fibra de vidro. Notou-se que compósitos com 30%v de curauá apresentaram resultado similar aos compósitos reforçados apenas com fibra de vidro.

Monteiro *et al.* (2013) apresentaram um estudo sobre um compósito de poliéster reforçado com fibras contínuas e alinhadas de curauá com concentrações em volume variando de 0 a 40%. Os compósitos apresentaram propriedades de flexão superiores à da matriz e um aumento significativo na tenacidade do material em função do incremento da fibra de curauá.

Oliveira e Marques (2014), compararam o efeito do tratamento químico das fibras de coco e curauá em matriz de polipropileno (PP). Os tratamentos com ácido sulfúrico (H_2SO_4) e alcalino (NaOH) foram empregados para melhorar a adesão ao PP. Para a fibra de curauá foi observado um aumento na resistência térmica, no índice de cristalinidade (+20%) e na temperatura inicial de degradação que passou de 275°C para 314°C. O tratamento alcalino mostrou-se mais adequado ao compósito reforçado com curauá.

Gutiérrez *et al.* (2014), a produção em larga escala de um biocompósito de acetato de celulose, ftalato de dioctilo (plastificante) e fibras curtas de curauá. Dois tratamentos químicos foram abordados no estudo; o alcalino (NaOH) e de extração com acetona. Tais tratamentos mostraram-se relevantes às propriedades mecânicas e térmicas, aumentando o módulo de Young, a estabilidade térmica e a condutividade térmica. Entretanto, reduziu a resistência ao impacto em relação ao acetato de

celulose com plastificante. Os autores também afirmaram que tal compósito pode ser fabricado em processos convencionais de polímeros, tais como extrusão e moldagem por injeção.

Outra pesquisa avaliou a fibra de curauá como reforço em polibutileno succinato (PBS), um biopolímero (FROLLINI *et al.*, 2015). A análise das propriedades mecânicas considerou o comprimento das fibras e a quantidade em peso (10%, 20% e 30%p de curauá). Os resultados mostraram que resistência ao impacto dos compósitos aumentou com o incremento de fibras, onde a amostra com 30% apresentou a maior resistência (345 J/m). De modo similar, a resistência à flexão aumentou 64% em relação ao PBS. Foi constatado que o comprimento da fibra tem mais influência na resistência ao impacto, a qual é mais elevada quando as fibras são curtas. Por outro lado, houve pouca influência do comprimento das fibras sob a tensão à flexão. Já a absorção de água do compósito é mais sensível ao teor de fibra do que ao seu comprimento. Os autores afirmaram que o biocompósito proposto possui propriedades mecânicas superiores às do PBS e o recomendam para aplicações em embalagens rígidas e peças de acabamento no interior de automóveis.

Castro *et al.* (2017), onde as fibras de curauá (5%, 10%, 15% e 20% em massa) serviram como reforço de uma matriz de biopolietileno de alta densidade (HDBPE). Óleos de canola e castor foram utilizadas como agente compatibilizante e seus efeitos na mistura também foram avaliados (5%, 10%, 15% e 20% em massa). Uma comparação dos resultados foi realizada em termos de compósito curauá/HDBPE e curauá/óleo/HDBPE. A pesquisa mostrou que a resistência à flexão e ao impacto decrescem à medida que o teor do reforço aumenta, entretanto, podem ser melhoradas quando os compatibilizantes são utilizados. Testes de termogravimetria (TG/dTG) indicaram que os óleos, principalmente o de canola, minimizaram a degradação térmica da fibra, o que os evidencia seu potencial uso como agente compatibilizante.

Compósitos cimentícios também foram desenvolvidos. Soltan *et al.* (2017) estudaram as propriedades da mistura entre um compósito cimentício de endurecimento por compressão (SHCC), muitas vezes chamado de “concreto dobrável”, e fibras de curauá. Observou-se que tanto a resistência à tração quanto à compressão aumentou com o incremento do teor de fibras em massa. Também foi

verificado que o compósito curauá/SHCC possui baixa condutividade ($\sim 0,4$ W/mK) e difusividade térmica ($\sim 0,0025$ cm²/s), uma redução de aproximadamente 50% destas propriedades em comparação ao SHCC. Tais características apontam o compósito pode reduzir a condução térmica em edificações se utilizado como revestimento em fachadas.

Já Ferreira *et al.* (2017) avaliaram o efeito da hornificação, tratamento usado na indústria do papel para endurecer a estrutura de fibras poliméricas da celulose, nas propriedades de um compósito cimentício reforçado com fibras de juta, sisal e curauá. A hornificação em 5 e 10 ciclos de moagem e secagem para cada fibra. Foi reportado que a hornificação aumenta a resistência à tração das fibras, além de melhorar a ligação entre as fibras e a matriz. Os autores concluíram que o tratamento de hornificação é uma solução simples para incrementar o comportamento mecânico e a adesão na interface de compósitos cimentícios, podendo ser aplicado em diferentes fibras lignocelulósicas.

Voltando às matrizes poliméricas, Silva Jr *et al.* (2017) desenvolveram um compósito a partir de polietileno, amido termoplástico e fibra de curauá (10, 20 e 30%p). Amostras planas foram confeccionadas e expostas à luz solar. Análise termográfica foi utilizada para avaliar a variação da temperatura da superfície exposta de cada compósito. Pode-se verificar que o teor de fibras no compósito aumenta a diferença de temperatura nas placas. Para as placas com 10 e 20%p de curauá, observou-se uma diferença de temperatura próxima de 2°C, enquanto o reforço de 30%p atingiu uma diferença de 3,2°C. Portanto, evidenciou-se que o compósito produzido tem potencial uso como isolamento térmico.

Scalioni *et al.* (2017) avaliaram as propriedades térmicas e mecânicas do PHB (Poli-3-hidroxibutirato) reforçado com fibra de curauá. Os compósitos foram confeccionados com 30%p de plastificante e 10%p de curauá. A fibra foi tratada com acetona por 24h e com NaOH a 8% por 1h de imersão, em ambos os casos, foram secas a 100°C por 24h. A fabricação se deu por injeção plástica, onde as fibras foram inicialmente moídas para facilitar a extrusão. Averiguou-se que não houve alteração significativa nas propriedades mecânicas do PHB puro, entretanto, a condutividade térmica observada foi inferior ao PHB ($\sim 0,15$ W/mK) em todos os compósitos. Ainda

assim, a condutividade do material PHB/curauá é maior do que outros materiais isolantes comerciais.

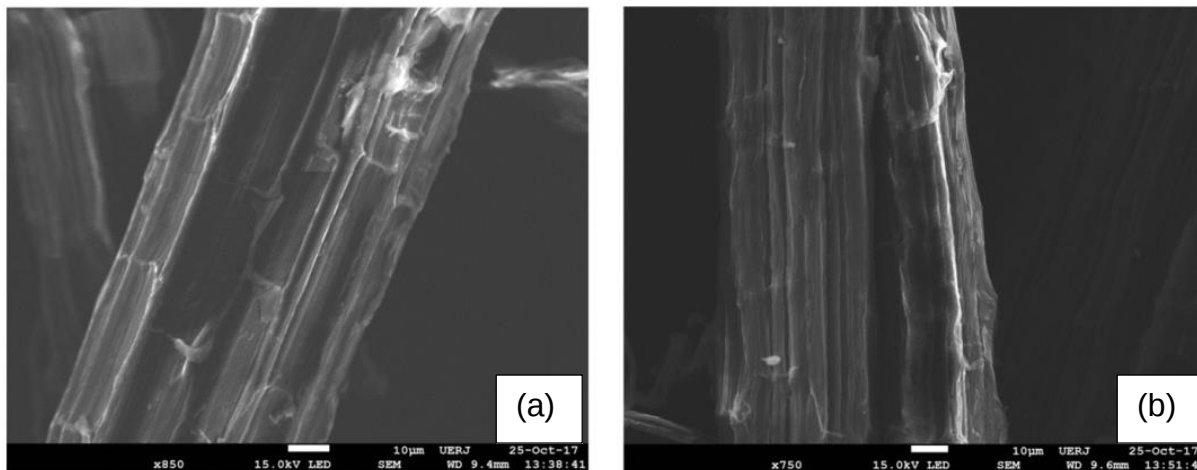
Devido a já conhecida similaridade das propriedades mecânicas entre a fibra de curauá e a fibra de vidro, uma pesquisa foi feita com o intuito de comparar os efeitos destas substâncias quando misturadas numa matriz de resina epóxi (MACIEL *et al.*, 2018). Amostras foram preparadas, sendo, de epóxi puro, outra com 30%p de curauá (FC) e mais outra com 30%p de fibra de vidro (FV). Após aos ensaios mecânicos, constatou-se que o compósito FV/Epóxi apresentou uma resistência à tração maior que a mistura FC/Epóxi, respectivamente, 71,92 MPa e 54,79 MPa. Entretanto, se considerada a resistência específica, conclui-se que o compósito FC/Epóxi é o mais resistente. A densidade reduzida do compósito FC/Epóxi sugere um custo de fabricação reduzido, se comparado a outra blenda, o que por sua vez promove a fibra de curauá a substituta da fibra de vidro em compósitos com matriz epóxi.

A resultância do tratamento químico em compósitos de resina epóxi e fibras naturais (30%v) foi avaliada por Silva Neto *et al.* (2018). Neste estudo, o tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH) e um tratamento composto (NaOH+Silano) foram utilizados para melhorar a adesão entre a matriz e as fibras de sisal, rami, juta e curauá. Foi observado que os tratamentos químicos melhoraram a estabilidade térmica de todos os compósitos e alterou a morfologia das fibras. O tratamento alcalino tende a deixar a superfície da fibra mais rugosa, por outro lado, quando seguido do tratamento com silano, forma-se uma camada de revestimento. Em particular, a fibra de curauá tratada apresentou vazios e rupturas, sugerindo uma possível fragilidade na fibra, observada em micrografia de varredura eletrônica - MEV (Fig. 2.7). Os autores concluíram que os tratamentos químicos trouxeram benefícios aos compósitos com sisal e rami, aumentando seus módulos de elasticidade, enquanto que os compósitos com fibras não tratadas de juta e curauá apresentaram melhores resultados quando não tratadas.

Diferentes tipos de tratamento já foram empregados na fibra de curauá. A exemplo disso, Sisti *et al.* (2018) analisaram os efeitos do tratamento enzimático com celulase e pectinase nas fibras de curauá (10%p) em compósitos biodegradáveis de PBS. Tais tratamentos não alteraram significativamente a estabilidade térmica, nem a cristalinidade das fibras. Entretanto, viu-se forte adesão entre PBS/fibras, levando a

um aumento expressivo nas propriedades elásticas e de flexão dos compósitos com fibras tratadas.

Figura 2.7 - MEV da fibra de curauá não-tratada (a) mercerizada (b).



Fonte: Silva Neto (2018).

Por sua vez, Libera Jr et al (2019a) avaliaram a influência das mercerizações com hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) das fibras de curauá (20%p) em matriz de epóxi com diferentes tempos de cura. Os resultados apontaram que ambos os tratamentos químicos melhoram a estabilidade térmica da fibra *in natura*, sendo que o tratamento com NaOH apresentou melhores resultados, estando em concordância com Silva Neto *et al.* (2018).

Delgado-Aguilar (2019) investigou a possibilidade de substituição da fibra de vidro em compósitos com matriz termoplástica por fibras naturais de curauá em peças da indústria automobilística. Amostras do compósito de fibra de curauá em matriz de polipropileno (PP) foram preparadas com teores de reforço variando de 20 a 50%p. A partir dos ensaios mecânicos, foi relatado que a densidade, a resistência à tração e o módulo de Young aumentam conforme o teor do reforço é incrementado, por outro lado, a tensão de ruptura decresce. Uma comparação com outro compósito de PP e fibra de vidro (a 20 e 30%p), frequentemente utilizado naquela indústria, também foi realizada. Assim, foi observado que apenas a amostra FC50%/PP50% mostrou resultados similares ao compósito FV20%/PP80%. Devido a isto, somado à baixa densidade e elevada resistência específica dos compósitos de FC/PP, os autores

propõem que a fibra de curauá pode substituir a fibra de vidro como reforço em matriz de PP.

Texeira e Silva (2020), discutiram o comportamento mecânico do concreto estrutural reforçado com fibra de curauá. As fibras foram apenas lavadas e secas para reduzir possíveis impurezas. Vigas com 5%v de fibra de curauá foram fabricadas com 250, 500 e 1000 mm. Os testes realizados indicaram que a resistência à flexão teve um aumento de 16%, mostrando a eficácia da fibra como reforço em estruturas de concreto.

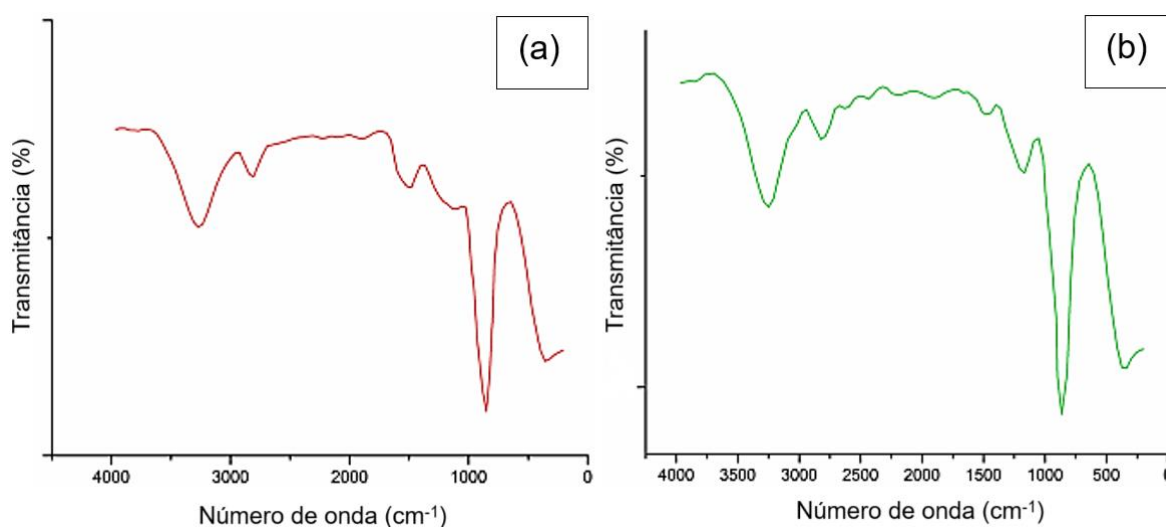
Borracha sintética já foi utilizada como tratamento superficial em fibras vegetais. As fibras de sisal, juta e curauá foram revestidas com estireno-butadieno carboxilado (XSBR), com o objetivo de melhorar o desempenho mecânico e a adesão das fibras em matrizes cimentícias (FERREIRA et al, 2020). O tratamento superficial se deu pela imersão das fibras em XSBR por 50 min, seguida de secagem à 36°C por 24 h, sendo posteriormente misturadas à argamassa (matriz). Os resultados deste estudo mostraram um aumento na resistência à tração de todas as fibras, entretanto, uma redução na rigidez da fibra de juta tratada foi observada. Os autores observaram que houve um aumento na adesão matriz/reforço promovido por uma boa interação entre a fibra e o polímero (XSBR).

Estudo similar foi elaborado por Manigandan *et al.* (2021), entretanto, utilizou-se poliuretano (PU) no lugar de XSBR. Compósitos de concreto reforçado com fibras de curauá (0,5 a 2%v) impregnadas de PU foram avaliados quanto às suas propriedades mecânicas. O tratamento alcalino das fibras com solução aquosa de NaOH foi realizado nas concentrações de 5, 10 e 15%. Foi reportado uma redução de 11% na resistência à compressão e de 5,2% na de tração, por outro lado, a resistência à flexão aumentou em 3,1% em relação ao concreto não reforçado. A espectroscopia do infravermelho (Fig. 2.8a e 2.8b) revelou uma redução dos níveis de concentração da lignina e hemicelulose devido a diminuição da intensidade dos picos das bandas 2.351 cm^{-1} e 2.419 cm^{-1} nos espectros das fibras tratadas com NaOH (Fig 2.8b). Os pesquisadores apontam que o tratamento com NaOH é mais efetivo na concentração de 5%.

Salgado e Silva (2021) analisaram o comportamento de flexão de um compósito laminado de fibras de curauá, argamassa e concreto. Três camadas

intercaladas de fibras alinhadas num total de 7,5%v e argamassa foram adicionadas nas partes superior e inferior de uma viga de concreto. Foi observado que as fibras alinhadas de curauá podem ajudar no controle de formação e propagação de rachaduras, melhorando a tenacidade e resistência à flexão em relação ao concreto não reforçado.

Figura 2.8 - Espectroscopia do infravermelho (FTIR) para fibras de curauá naturais (a) e com tratamento alcalino 5% de NaOH (b).



Fonte: Adaptado de Manigandan et al. (2021).

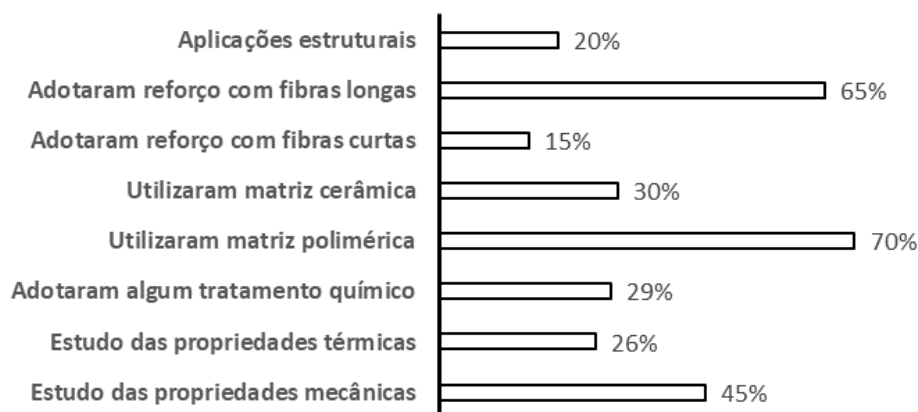
Pino *et al.* (2021), utilizaram o método de Taguchi para otimizar a resposta à tração num compósito de epóxi reforçado com fibra de curauá. Três parâmetros foram avaliados no planejamento experimental em 3 níveis; a concentração de NaOH (2,5%, 5% e 7,5%), o tempo de imersão (2, 4 e 6 h) e o teor de fibras (5, 15 e 25%*m*). Os autores verificaram que a quantidade fibras tem o maior efeito na resposta, já a concentração de NaOH possui a menor relevância. A maior resistência à tração foi observada no compósito com 25%*m* de fibra de curauá tratada com 5% de NaOH por 4h ($103,62 \pm 0,94$ MPa), simplesmente 3 vezes maior que o epóxi não reforçado. Nos compósitos com epóxi, com 7,5% de NaOH haverá uma redução na resistência à tração devida forte efeito do tratamento alcalino. Destaca-se também que quanto maior for a concentração de NaOH, menor deve ser o tempo de imersão, ou reciprocamente, para se obter melhor resposta à tração.

Celulose microfibrilada da curauá foi utilizada com reforço em matriz de ácido polilático (PLA) por Jesus *et al.* (2022). As fibras foram tratadas com NaOH (5%) por 2h, em seguida seca a 60° por 12 h. A fibra foi moída e adicionada ao PLA em 0,5 e 1,5%_m, sendo posteriormente extrusados e injetados para a fabricação das amostras. Conferiu-se que a adição de fibra incrementou as propriedades mecânicas do PLA, em contrapartida, todos os compósitos apresentaram baixa estabilidade térmica.

Como pode ser observado, diversos estudos apontam para fibra de curauá como promissor reforço para materiais poliméricos e cimentícios.

A figura 2.9, baseada nesta seção, demonstra o contínuo interesse em pesquisas relacionadas à fibra, sendo possível notar que é mais comum o emprego em compósitos de matriz poliméricas (70%). Isso se deve ao fato da fibra melhorar as propriedades mecânicas e térmicas dos polímeros na maioria dos casos, entretanto, tais atributos são influenciados tanto pelo teor de fibra na mistura quanto ao tratamento químico recebido por ela.

Figura 2.9 - Apontamentos sobre compósitos reforçados com fibra de curauá.



Fonte: Autor (2024).

Por esta razão, parte das pesquisas verificaram (29%) a influência do tratamento químico nas características dos compósitos. Por ser simples, o tratamento alcalino com NaOH é amplamente empregado como forma de minimizar a natureza hidrofílica material e melhorar a adesão na interface matriz/reforço. A concentração de 5% em massa de NaOH em solução aquosa, parece ser o mais recomendado ou

adotado, com tempo e temperatura de secagem variando de 1 a 2h e 60° a 90°C, respectivamente.

Em relação ao tipo de reforço, pesquisadores têm dado preferência ao reforço por fibras longas, alinhadas ou não, porém, o comprimento das fibras pode influenciar diretamente nos atributos mecânicos. Por isso, alguns autores (15%), adotam o reforço com fibras curtas, moendo as fibras vegetais, minimizando o efeito do comprimento e da orientação do reforço ou, assim o fazem apenas para facilitar o processo de fabricação, como visto nos compósitos produzidos por extrusão e injeção plástica.

Em suma, a Tabela 2.3 apresenta as principais vantagens e desvantagens do uso de fibras naturais com reforço em compósitos abordados na subseção 2.3.3.

Tabela 2.3 - Vantagens e desvantagens do uso da fibra de curauá com reforço em compósitos.

Vantagens	• A fibra de curauá é biodegradável e renovável, contribuindo para a sustentabilidade e reduzindo a dependência de fibras sintéticas. • Melhora a resistência à tração e o módulo de elasticidade dos compósitos, tornando-os mais robustos e duráveis. • Tratamentos químicos aumentam a cristalinidade da fibra, melhorando sua estabilidade térmica e permitindo que os compósitos suportem temperaturas mais altas sem degradação. • A densidade menor da fibra de curauá resulta em compósitos mais leves, beneficiando especialmente aplicações que requerem materiais leves, como na indústria automotiva. • A fibra de curauá pode ser processada usando equipamentos convencionais de polímeros, facilitando sua integração em processos de fabricação existentes. • Devido às suas propriedades mecânicas e térmicas, pesquisas apontam que a fibra de curauá é adequada para uma ampla gama de aplicações, incluindo embalagens rígidas, peças automotivas, revestimentos térmicos e isolamento em edificações.
Desvantagens	• A fibra de curauá possui uma incompatibilidade natural com a matrizes poliméricas, o que pode dificultar a adesão e a dispersão homogênea da fibra no compósito. • Para melhorar a adesão e a compatibilidade com a matriz polimérica, são necessários tratamentos químicos na fibra de curauá, ou outras modificações superficiais. Esses tratamentos podem aumentar os custos de produção e adicionar complexidade ao processo de fabricação. • A fibra de curauá, por ser natural, tende a absorver umidade, o que pode afetar negativamente as propriedades mecânicas e a durabilidade dos compósitos, especialmente em ambientes úmidos. • As fibras naturais, incluindo a fibra de curauá, podem apresentar variabilidade nas suas propriedades mecânicas e físicas devido a fatores como a origem, a colheita e as condições de processamento. Essa variabilidade pode impactar a consistência e a previsibilidade das propriedades dos compósitos. • A necessidade de adaptar ou modificar processos de produção para incorporar fibras naturais como a de curauá pode ser um desafio, exigindo ajustes nos equipamentos e nos métodos de processamento convencionais.

Fonte: Autor (2024)

2.4 BORRACHA NATURAL

A borracha natural é um composto polimérico natural obtido a partir do látex da seringueira (*Hevea brasiliensis*), uma árvore nativa das américas (Fig. 2.9). Mais de 2000 espécies são capazes de produzir látex, porém, poucas tem relevância industrial, sendo a seringueira a mais eficiente delas, sendo a única fonte deste recurso até o início do século XX, quando borrachas sintéticas começaram a ser produzidas (FRANTA et al, 1989).

Figura 2.9 – Extração de látex do tronco da Seringueira (*Hevea brasiliensis*).



Fonte: D'Agostini et al. (2013).

Os povos nativos americanos já conheciam e utilizavam a borracha antes da chegada dos europeus ao continente. Só em 1493, quando Cristóvão Colombo encontrou o Haiti, que o “velho continente” soube da existência da borracha. Em 1765, na França, foi publicada uma Enciclopédia com o primeiro artigo científico sobre as propriedades da borracha, atribuído a F. Fresneau (1703–1770) (KOHJIYA e IKEDA, 2014). A palavra “*rubber*” foi cunhada pelo químico inglês, Joseph Priestly, em 1770,

quando observou que o risco de lápis poderia ser apagado (*rubbed out*) pela borracha (DE *et al*, 2001; KOHJIYA e IKEDA, 2014).

Mais tarde, M. Faraday, ao analisar a estrutura química da borracha, determinou sua fórmula como C_5H_8 , em 1826. Porém, o crescimento da indústria moderna da borracha só se concretizou a partir do desenvolvimento do processo de vulcanização com enxofre, descoberto independentemente por Goodyear e Hancock em 1839, nos Estados Unidos, e em 1843, na Inglaterra, respectivamente (DE *et al*, 2001).

Até a década de 50 o Brasil foi o principal exportador mundial de borracha, num período conhecido como “Ciclo da borracha”, tendo seu auge entre 1879 e 1912 (1º ciclo), e uma sobrevida entre 1939-1945 (2º ciclo), durante a Segunda Guerra Mundial. Isto porque, em 1876, o britânico Henry Wickham levou 40 mil sementes de seringueira para a Malásia, constituindo um dos casos mais famosos de biopirataria. Dentro de 40 anos, a Inglaterra tomou o posto de maior produtor, dominando o mercado por um longo período (FRANTA *et al*, 1989).

Segundo dados publicados em 2022 da *Organização para Alimentação e Agricultura* (*Food and Agriculture Organization – FAO*) sobre a produção mundial de borracha natural em formas primárias de 2021, o Brasil produziu cerca de 239.851 toneladas/ano, sendo 11º produtor global naquele ano. Enquanto isso, a Tailândia sozinha gerou aproximadamente 4.643.720,71 toneladas/ano e atualmente é o maior exportador do mundo.

2.4.1 Látex natural e suas propriedades

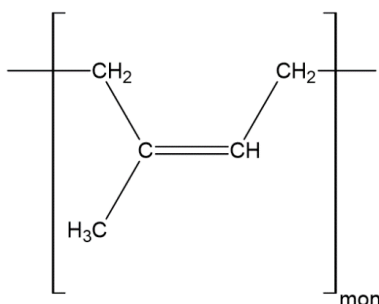
O látex natural é uma mistura coloidal, onde partículas de borracha ficam suspensas num meio aquoso, o chamado soro. Nele estão contidas várias substâncias tais como açúcares, proteínas, ácidos graxos, álcoois e uma pequena quantidade de minerais (Abarca *et al.*, 2019).

As partículas de borracha em suspensão variam de 0,1 a 4,0 μm , tendo em média 1,0 μm . São formadas por grandes cadeias de hidrocarbonetos de unidade estrutural *cis*-1,4-poliisopropeno (Fig. 2.9). Tanto o teor de borracha e dos demais constituintes pode variar em função do período de colheita, características do solo,

espécie e idade da de árvore (DE *et al*, 2001). Os compostos não-borracha conferem propriedades únicas à borracha natural e ao látex, como estabilidade e resistência a diversas condições ambientais. Proteínas e lipídios presentes no látex também podem afetar a resistência do material e são importantes para o processo de coagulação da borracha (SAKDAIPANICH, 2013).

A massa específica do látex não tratado varia entre 960 e 980 kg/m³ em função do total de partículas sólidas (TPS) presente no soro, decrescendo quando há mais partículas de borracha (FRANTA *et al*, 1989).

Figura 2.10 - Estrutura molecular do *cis*-1,4-poliisopreno.



Fonte: Autor (2024).

Para fins de ilustração, a Tabela 2.4 apresenta percentuais típicos de cada componente químico do látex da *Hevea brasiliensis*.

Tabela 2.4 - Composição química da borracha

Componente	Teor (%)
Borracha	30 – 40
Proteínas	1 – 1,5
Resinas ¹	1,5 – 3,0
Minerais	0,7 – 0,9
Carboidratos	0,8 – 1,0
Água	55 - 60

Fonte: DE *et al*. (2001).

¹ Inclui gorduras, ácidos graxos, outros lipídios, esterol e ésteres de esterol.

A coleta do látex é feita pelo processo de sangria, onde um corte de aproximadamente 1,0 mm de profundidade é feito no tronco da seringueira fazendo com que a substância escorra até pequenos recipientes. A produção e as características do látex também são influenciadas pelo procedimento e periodicidade de coleta (RIPPEL e BRAGANÇA, 2009).

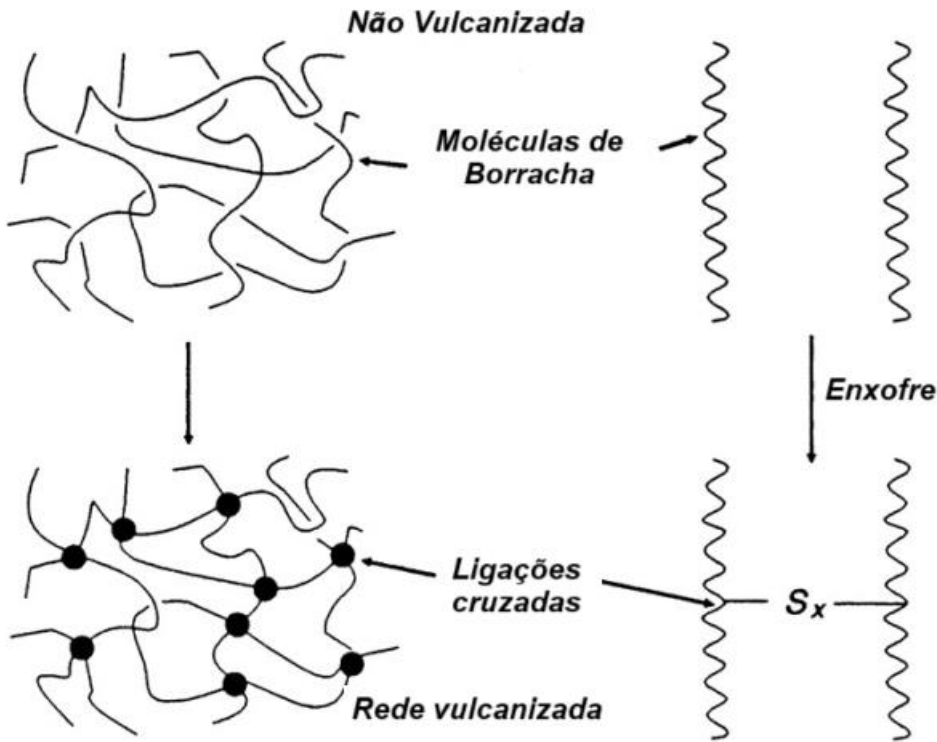
O látex pode coagular espontaneamente, entretanto, o processo pode ser evitado com a adição de conservantes. Em geral, adiciona-se ao soro anticoagulantes como formalina e amônia. Quando coagulado, mesmo sem processamento, a borracha resultante apresenta características essencialmente plásticas e com viscosidade em maior ou menor grau, contudo, para atender exigências de aplicações práticas é necessário incrementar ainda mais suas propriedades. Por isso, a borracha deve receber um tratamento para melhorar sua resistência mecânica, térmica, química, além de sua durabilidade.

O processamento capaz de realizar tais melhorias na borracha, e talvez o mais conhecido, é a vulcanização. Segundo De *et al.* (2001), a vulcanização consiste na adição de enxofre e aceleradores, sob temperaturas elevadas. Durante o processo ocorre uma reação química que modifica a estrutura da borracha de um polímero linear para uma macromolécula tridimensional com ligações cruzadas. Além disso, podem ser inseridas outras substâncias, tais como aditivos antidegradação, enchimentos (reforço) para aumentar resistência, durabilidade e reduzir custos da fabricação da borracha em escala industrial.

De acordo com Coran (2013), o processo de vulcanização da borracha natural envolve a formação de ligações químicas cruzadas entre as cadeias poliméricas do poli-isopreno. Estas ligações são formadas por meio da incorporação de átomos de enxofre, que funcionam como pontes entre as cadeias, conferindo maior rigidez e elasticidade ao material, conforme visto na Figura 2.11. O mecanismo se inicia com a abertura das ligações duplas das cadeias do poli-isopreno, facilitada por agentes aceleradores e ativadores, como óxido de zinco e ácidos graxos. Em seguida, o enxofre reage com as ligações abertas, criando estruturas polissulfídicas de diferentes comprimentos. Ainda segundo o autor, a presença de agentes aceleradores reduz o tempo de reação e aumenta a eficiência do processo e é crítico para transformar a

borracha natural, inicialmente pegajosa e com baixa resistência mecânica, em um material com propriedades ideais para aplicações industriais, como pneus e vedações.

Figura 2.11 - Ligações cruzadas no processo de vulcanização da borracha.



Fonte: Adaptado de Coran (2013).

A Tabela 2.5 apresenta um comparativo de algumas propriedades físicas da borracha natural não vulcanizada e vulcanizada.

Tabela 2.5 - Diferenças das propriedades da borracha vulcanizada e não-vulcanizada.

Propriedade	Não vulcanizada	Vulcanizada
Massa específica (kg/m³)	906 - 916	920 - 1000
Coef. de expansão volumétrica (1/°C)	0,00067	0,00066
Temperatura de transição vítrea (°C)	-74 a -69	-72 a -61
Calor específico (Cal/g-°C)	0,449	0,437
Condutividade térmica (W/m-K)	0,134	0,153
Calor de combustão (kJ/kg)	4520	4440
Índice de refração	1,5191	1,5264

Fonte: Adaptado de De et al. (2001).

Beilen e Poirier (2007) acreditam que a borracha de látex natural possui relevância estratégica, pois não pode ser totalmente substituída por materiais sintéticos na maioria das aplicações. Consequentemente, este material está presente em diversos produtos, incluído desde utensílio domésticos às aeronaves.

A partir de diversas publicações, foram elencadas algumas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, além de alguns apontamentos qualitativos sobre a borracha natural, conforme visto na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Diversas propriedades da borracha natural (poli isopreno) não vulcanizada.

Propriedades mecânicas		Referência
Módulo de elasticidade	0,98 - 5,88 MPa	Roff <i>at al.</i> (1971)
Módulo de compressividade	0,3 - 2,2 MPa	Cardarelli (2008)
Módulo de cisalhamento	0,29 - 1,76 MPa	Roff <i>at al.</i> (1971)
Coeficiente de Poisson	0,5	Cardarelli (2008)
Limite de resistência à tração	17,1 - 31,7 MPa	Cardarelli (2008), Shackelford (2022)
Tensão de ruptura	29 MPa	Cardarelli (2008)
Alongamento percentual na falha*	800 - 1000%	Cardarelli (2008), Shackelford (2022)
Dureza	25 Shore A - 45 Shore D	Souza Filho (2015)
	30 - 95 Shore A	Cardarelli (2008)
Propriedades térmicas		Referência
Temperatura de transição vítrea	-72°C	Gent (2012)
Condutividade térmica	0,14 - 0,15 W/m-K	Gent (2012), Cardarelli (2008)
Calor específico á pressão constante	1,9 kW/kg-°C	Gent (2012)
Coeficiente de expansão térmica linear	$220 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Gent (2012)
Propriedades elétricas		Referência
Resistividade elétrica	$5 \times 10^{15} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$	Gent (2012)
Constante dielétrica, 1,0 kHz	2,43	Gent (2012)
Fator de dissipação, 1,0 kHz	0,0015	Gent (2012)
Algumas características qualitativas		Referência
Alta resiliência	Acima de 70%	Souza Filho (2015)
Boas propriedades em baixas temperaturas	Até -10°C	Souza Filho (2015)
Boas propriedades em altas temperaturas	Até 70°C	Souza Filho (2015)
Baixa deformação permanente à compressão	15%	Souza Filho (2015)

2.4.2 Biocompósitos e eco-compósitos

Nos últimos anos, houve um aumento significativo no desenvolvimento de materiais sustentáveis na área da ciência dos materiais, devido a preocupações

ecológicas e de sustentabilidade. Nesse contexto, os biocompósitos e eco-compósitos surgem como alternativas promissoras.

De acordo Mohanty *et al.* (2005), os biocompósitos são materiais compostos por uma matriz polimérica e reforço de fibras naturais. Essas fibras podem ser derivadas de fontes renováveis, como plantas e materiais biodegradáveis (Faruk *et al.*, 2012). Por outro lado, compósitos ditos como “ecologicamente amigáveis”, ou eco-compósitos, são aqueles que causam pouco, ou nenhum, impacto ambiental ou ainda apresentam vantagens ecológicas, como a reciclagem ou biodegradabilidade, frente aos materiais convencionais (NAIR & JOSEPH, 2014).

Compósitos de borracha já são empregados em diversos seguimentos de produtos, tais como pneus, mangueiras e utensílios domésticos. Entretanto, devido a facilidade de processamento aliada ao baixo custo e alta resistência, os compósitos de borracha natural reforçada com fibras vegetais, têm sido alvo de pesquisas voltadas para materiais ecologicamente amigáveis nas últimas décadas (SANTOS, 2015).

Com base no exposto, um material pode ser classificado tanto como biocompósito quanto eco-compósito, pois o primeiro termo está associado à fonte dos materiais (natural ou sintética) e o último se refere ao seu impacto no meio ambiente. Por isso, a combinação da borracha natural e de fibras lignocelulósicas tem se mostrado interessante, pois combina os dois conceitos.

2.4.3 Compósitos de borracha natural reforçados com fibras vegetais

Nesta seção serão apresentadas, em ordem cronológica, pesquisas de materiais compósitos onde a borracha natural foi adotada como matriz e fibra vegetais foram utilizadas como fase dispersa.

Devido à natureza deste trabalho, optou-se por considerar apenas estudos nos quais há somente a presença de borracha natural e fibras, em compósitos binários. Também serão abordados artigos onde se discute a adesão das fibras à borracha, em razão dos tratamentos químicos adotados.

Nair e Joseph (2014) apontam que as fibras, quando empregadas como reforço, expandem o leque de propriedades úteis do polímero. Contudo, isso também

torna mais complexa a análise dos compósitos resultante, pois fatores como a natureza química tanto da matriz quanto das fibras, o comprimento das fibras, a proporção e distribuição das mesmas, a orientação, a textura da superfície, a fração volumétrica da fibra, a adesão interfacial, o método e as condições de moldagem, bem como a quantidade de vazios, podem influenciar significativamente suas propriedades. A adesão na interface entre a matriz e o reforço é altamente dependente da topologia da superfície da fibra. Assim, fatores que delimitam o desempenho destes materiais devem ser considerados, tais como a presença de umidade na superfície da fibra, a natureza hidrofílica e hidrofóbica da fibra e da matriz, complementam os autores.

Ismail *et al.* (2002) estudaram os efeitos da carga de fibra de bambu (10 a 50%*m*) em borracha natural e os efeitos da Hexametileno de tetramina e do Fenol-formaldeído como agente ligação, respectivamente, nas concentrações de 10% e 5%. Foi constatado que tanto as propriedades elásticas quanto a dureza podem ser melhoradas com o aumento no teor de fibras e a presença de agente de ligação. Além disso, o tempo de cura e adesão entre as fibras e a matriz apresentaram melhores resultados quando agentes de ligação foram utilizados.

Geethamma *et al.* (2005), avaliaram o comportamento de amortecimento de um compósito de fibra de coco e borracha natural. Amostras com diferentes tratamentos químicos foram preparadas e foi constatado que aquelas com fraca adesão interfacial tendem a dissipar mais energia do que outras com boa ligação interfacial.

Outro biocompósito de borracha natural foi estudado com reforços de fibras curtas de dendê (JOSEPH *et al.*, 2006). Foram avaliados os efeitos da carga de reforço, orientação das fibras, do comprimento e do tratamento alcalino com NaOH. Os autores observaram que a orientação longitudinal das fibras tem efeito positivo nas propriedades mecânicas, fibras com 6,0 mm representam o comprimento ótimo, a carga de reforço reduziu as resistências à tração e à ruptura, porém melhoram o módulo de elasticidade. Nestes compósitos a carga de fibra não afetou o tempo de cura e o tratamento químico (5% de NaOH) corrobora para um melhor desempenho mecânico.

Osabohien e Egboh (2007) produziram um compósito de fibras de cânhamo (hemp) e borracha natural. A pesquisa mostrou que a resistência à tração e as características de cura melhoram com incremento de carga de fibra até o limite de 40%*m*. Por outro lado, houve uma diminuição no alongamento de ruptura e resiliência, enquanto, o módulo de Young, resistência à abrasão e dureza aumentaram com a carga de fibra. Os autores salientam que o tamanho das partículas de fibra e teor de umidade deterioram o desempenho mecânico dos compósitos.

Fibra de algodão foi utilizada como reforço numa matriz de borracha natural, utilizando anidrido-maleico como agente de acoplamento. Zeng *et al.* (2010), verificaram que os compósitos mostraram propriedades mecânicas superiores à matriz. Tanto a resistência à tração quanto o alongamento final e o módulo de elasticidade apresentaram melhores resultados em compósitos com maiores cargas de fibra e elevadas concentrações de anidrido maleico. Isso demonstra que este agente de ligação proporciona resultados positivos na mistura.

Em outra pesquisa, Ismail *et al.* (2011) desenvolveram um compósito de borracha natural e fibra de ratã em pó (uma palmeira originária da Ásia). Os resultados mostraram que conforme a carga de reforço aumenta, a resistência à tração e a deformação de ruptura decrescem devido à baixa adesão entre a fibra de ratã e a borracha. Entretanto, a utilização de silano como agente de acoplamento, além de reduzir o tempo de cura, aprimorou as propriedades elásticas dos compósitos em relação à matriz sem enchimento.

Sareena *et al.* (2012a) sugeriram pela primeira vez a utilização de fibras de casca de nozes em pó como enchimento na borracha natural. Foram avaliados os efeitos da carga de fibra, tamanho das partículas e do tratamento químico com NaOH e tolueno. Foi observado que o tempo de cura reduz e a dureza aumenta quando o teor de fibra é incrementado. Todavia, a fibra de casca de nozes em pó só é um reforço efetivo em concentrações de até 10%*m*, acima disso as propriedades elásticas tendem a reduzir.

No mesmo ano, Rahman *et al.* (2012) investigaram as propriedades mecânicas e a resistência a degradação de um laminado de borracha natural e fibras de juta. Neste trabalho, radiação grama foi utilizada para melhorar a compatibilidade da interface fibra/matriz. Os autores sugerem que é uma das melhores técnicas de

tratamento de fibra. Todos os compósitos apresentaram comportamento mecânico superior à matriz sem enchimento, sendo mais suscetível à degradação em meio aquoso.

Novamente Sarrena *et al.* (2012b) produziram um compósito com matriz de borracha natural, porém, desta vez a fibra de casca de coco em pó foi utilizada como reforço. A pesquisa mostrou que o tempo de cura é reduzido e a estabilidade térmica é melhorada com o aumento da carga de fibra. A resistência à tração e a deformação de ruptura diminuem com o incremento do teor de reforço, enquanto a dureza se eleva. Devido ao baixo desempenho mecânico dos compósitos, a fibra de coco em pó pode ser considerada um reforço secundário, pois só tem impactos positivos com teores de até 10%*m* na mistura.

Pantamanatsopa *et al.* (2014), avaliou as propriedades mecânicas da borracha natural reforçada com fibra de juta, porém, distintamente de Rahman *et al.* (2012), optaram pelo tratamento químico com ácido sulfúrico e utilizaram borracha natural desproteínizada e látex com alto teor de amônia como agente de acoplamento. Foi reportado que a dureza e o módulo de elasticidade tendem se elevar com o incremento da carga de fibra, porém, a resistência a tração dos compósitos foi prejudicada. Um comportamento mecânico superior foi observado nas amostras tratadas com borracha desproteínizada em relação às tratadas com borracha de alta concentração de amônia.

Santos (2015), propôs o uso da fibra de carnaúba em pó como reforço em borracha natural. O objetivo era produzir um material isolante térmico satisfatório. Os resultados mostraram que a fibra acelera o processo de cura. Em teor de 15%*m* de fibra, o compósito apresentou melhor na condutividade térmica (0,1431 W/m-K) e dureza, apresentando boa estabilidade térmica até 200°C.

Souza Filho (2015), por sua vez, produziu um compósito laminado de borracha natural e fibra da bainha do coqueiro para aplicações termoacústicas. Foi observado que os compósitos reduziram a condutividade térmica em relação à matriz para até 0,15 W/m-K, podendo ser utilizado em aplicações de até 200°C. O material também se mostrou eficiente como isolante acústico.

Satish *et al.* (2020), utilizou a fibra da folha de abacaxi como reforço na borracha natural na tentativa de avaliar seu potencial uso no lugar do isolante papel-óleo em transformadores elétricos. Os compósitos gerados apresentaram condutividades térmicas mais baixas à medida que a carga de fibra aumentava, chegando a 0,33 W/m-K com 30%v de fibra, isso porque, segundo os autores, havia ar no interior das fibras. A resistência dielétrica também aumentou com carga de reforço, atingindo 14 kV/mm, o que sugere que tais materiais são bons isolantes elétricos.

Por fim, Ubi *et al.* (2022) utilizaram cinza de casca de arroz como enchimento na borracha natural. Constatou-se que sais de benzeno diazônio como modificador de superfície da fibra podem melhorar a adesão na interface matriz/reforço. A quantidade de fibra no compósito melhorou as características elásticas e a dureza do material. Os autores sugeriram a aplicação deste material como isolante vibracional.

Ao que parece, a borracha natural foi uma das primeiras opções de matrizes quando se começou a utilizar fibras vegetais como reforço, isto fica evidente quando se verifica que as publicações referentes a estes biocompósitos também remontam ao início dos anos 2000.

A Figura 2.12 exibe um pequeno levantamento sobre os interesses das pesquisas de biocompósitos de borracha natural e fibras lignocelulósicas (apenas em pares). Nele é possível observar que um foco maior é sempre dado às propriedades mecânicas (62%) dos compósitos.

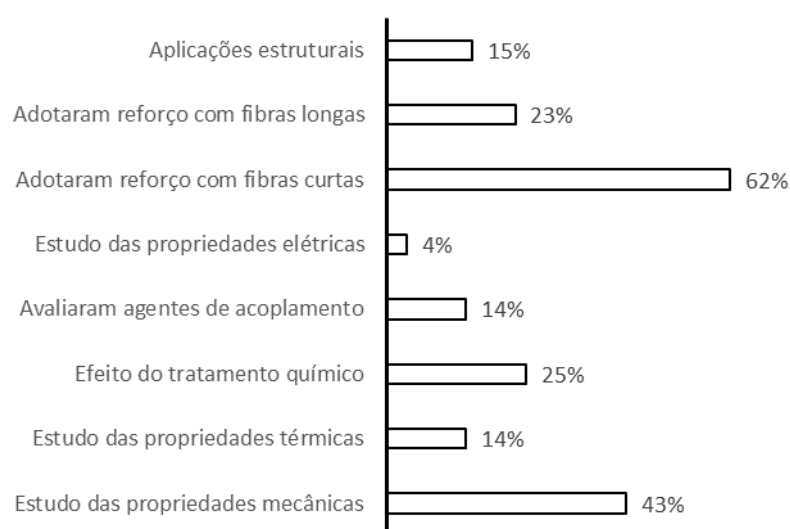
Além disso, o tratamento químico da fibra (14%) também é frequentemente abordado. Isto porque as fibras lignocelulósicas têm característica hidrofílica, enquanto a borracha normalmente é hidrofóbica. Por isso, o tratamento alcalino, ou qualquer outra modificação superficial, tem se mostrado muito útil para melhorar a adesão entre a fibra e a matriz em maior ou menor grau. Contudo, dependendo da fibra, a mercerização pode fragiliza-la e prejudicar o desempenho mecânico do material (PANTAMANATSOPA *et al.* 2014).

Agentes de acoplamento também são abordados (14%), pois também podem contribuir com uma melhor adesão na interface. Esta técnica também pode ser

aplicada concomitante ao tratamento químico. Todavia, nem sempre esta combinação é sinérgica (PANTAMANATSOPA *et al.* 2014).

Embora alguns trabalhos abordem as propriedades elétricas (4%) e térmicas (14%), estas são as menos avaliadas, mesmo quando são evidenciadas boas respostas para tais características (SANTOS, 2015; SOUZA FILHO; 2015; SATISH *et al.*, 2020). Por isso, a condutividade térmica (entre outras) da fibra de curauá e seus compósitos deve ser determinada.

Figura 2.12 - Apontamentos sobre a borracha natural reforçada com fibra vegetal.



Fonte: Autor (2024).

Diferentes classes de reforço já foram testadas com a borracha natural, porém, a maior parte das pesquisas tende a adotar o reforço por partículas (62%). Além de mais fácil de processar, evita-se (propositalmente ou não) a influência do comprimento da fibra no comportamento mecânico do material.

Atualmente, pesquisas nesta linha seguem utilizando reforços híbridos, combinando diferentes fibras naturais e/ou sintéticas, materiais cerâmicos e nanopartículas ou buscando otimizar alguma propriedade das combinações anteriores.

Tabela 2.7 - Relação de fibras naturais selecionadas e abordadas em estudos anteriores.

Fibra de	Referências
Bambu	Ismail et al., (2002)
Coco	Geethamma et al., (2005)
Dendê	Joseph et al., (2006)
Cânhamo	Osabohien e Egbogh., (2007)
Algodão	Zeng et al., (2010)
Ratã	Ismail et al., (2011)
Casca noz	Sareena, (2012a)
Juta	RAHMAN, (2012); Pantamanatsopa (2014)
Casca coco	Sareena, (2012b)
Piaçava	Santos (2015)
Bainha do coqueiro	Souza Filho (2015)
Casca de arroz	Satish, (2020)

Conforme visto, diversos trabalhos apontam para resultados satisfatórios quando se utiliza fibra vegetal como reforço na borracha natural, por isso, uma ampla gama de fibras já foi testada (Tab. 2.7). Entretanto, até a presente data não foi observado qualquer estudo referente à interação entre a fibra de curauá e a borracha natural. Assim, devido à já reconhecida nobreza desta fibra, torna-se pertinente investigar as propriedades de um material composto por estes constituintes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os insumos e métodos utilizados na fabricação dos compósitos com diferentes composições de borracha natural e fibra de curauá, assim como as técnicas empregadas na caracterização destes materiais.

3.1 AQUISIÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA

A fibra de curauá foi obtida no município de Novo Airão, no Estado do Amazonas, a 190 km de Manaus. Além do turismo, este município é reconhecido pela sua vocação ao artesanato, produzindo peças de madeira e de fibras vegetais, tais como a de tucumã, piaçava e curauá.

A fibra foi fornecida em rolos de linha próprios para a produção de malhas e cordas. A fabricação dos rolos é feita de maneira artesanal, em comunidades ribeirinhas próximas a Novo Airão, consistindo no desfibramento das folhas de curauá, secagem ao sol e fiação de fibras, sem o uso de tratamento químico. Após a fabricação, os rolos são comercializados nos centros de artesanato localizados na sede do município.

Uma vez adquiridos os rolos, estes foram cortados em pedaços variando de 3,0 a 4,0 cm, procedendo-se conforme Santos (2015). Uma parte da fibra cortada foi separada para caracterizações da fibra natural e a outra para o tratamento químico. Para a fabricação dos compósitos, tanto as fibras tratadas quanto não-tratadas foram moídas no moinho de facas (modelo MA048 de fabricação Marconi, mesh 32) do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LaMAC), da UFAM (Universidade Federal do Amazonas). As fibras moídas foram armazenadas em sacos plásticos com lacre para minimizar ganhos de umidade e possíveis deteriorações biológicas.

A Figura 3.1 mostra as diferentes formas da fibra de curauá empregada como reforço neste estudo.

Figura 3.1 - (a) Fibra de curauá em rolo, (b) fibra cortada e (c) moída.



Fonte: Autor (2024).

Para a matriz, foi utilizado o látex pré-vulcanizado fabricado pela empresa Bassan Indústria e Comércio de Látex Ltda, localizada em São Paulo - SP. Segundo o fabricante, seu produto consiste numa mistura de látex natural centrifugado a 60% com dispersões aquosas, ativadores, aceleradores de vulcanização, antioxidante e estabilizada com amônia, conforme disposto na Tabela 3.1. Este possui alta fluidez e pode vulcanizar à temperatura ambiente. O fabricante também alerta que seu produto possui baixa toxicidade, pois exala vapores de amoníaco durante o processo de vulcanização, devendo-se evitar a inalação. Após a cura, a borracha resultante é atóxica. O látex foi utilizado tal qual adquirido, sem qualquer alteração.

Tabela 3.1 - Composição química do látex pré-vulcanizado.

Componente	Concentração (phr)²
Borracha natural	100
Enxofre	3
Dibenzilditiocarbamato de zinco (ZBDC)	1,2
Óxido de zinco (ZnO)	1,8
Antioxidante (SKF)	1,2
Solução aquosa de KOH a 10%	1,5
Laurato de potássio (C ₁₂ H ₂₃ KO ₂)	1

Fonte: Bassan Indústria e Comércio de Látex Ltda.

² phr - “parts per hundred of rubber”, é uma unidade de concentração utilizada na indústria de polímeros, especialmente em compostos de borracha, traduzido livremente como “partes por cem de borracha”.

3.2 TRATAMENTO QUÍMICO DA FIBRA DE CURAUÁ

Conforme observado em diversos estudos, é comum realizar o tratamento alcalino de fibras vegetais para melhorar a ligação da interface matriz/carga. Por isso, o processo de mercerização em solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) foi empregado nas fibras de curauá. Entretanto, cabe ressaltar que o resultado do tratamento químico depende do tipo da fibra e da matriz, podendo ser benéfico ou não às propriedades do compósito estudado, conforme observado nos trabalhos de Sareena *et al.* (2012b) e Pantamanatsopa *et al.* (2014).

Com as fibras já cortadas em tamanhos de 3,0 a 4,0 cm (Fig. 3.2a), as mesmas foram imersas numa solução de água destilada e 5% de NaOH por duas horas (JESUS *et al.*, 2022; HASSAN *et al.*, 2022), conforme mostrado na Figura 3.2b. Passado o período de imersão, as fibras foram lavadas com água destilada para remover as impurezas resultantes do processo até a total neutralização do PH (Fig. 3.2c).

Figura 3.2 - Tratamento alcalino. (a) fibras cortadas, (b) imersão em solução aquosa de 5% de NaOH, (c) lavagem com água destilada, (d) fibras tratadas e secas.



Fonte: Autor (2024)

Seguindo o recomendado por Rokbi *et al.* (2011), as fibras tratadas permaneceram em repouso por 48 horas em temperatura ambiente. Em seguida, foram secas por 24 horas numa estufa à vácuo do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento Multiuso da UEA (Universidade do Estado do Amazonas), conforme visto na Figura 3.2d.

Após a secagem, as fibras tratadas foram armazenadas em sacos plásticos com lacre para posterior moagem (Fig. 3.1c).

3.3 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS

A produção das amostras consistiu na mistura manual do látex pré-vulcanizado com diferentes quantidades de fibra de curauá moída, tratadas e não-tratadas.

Inicialmente, os compósitos seriam produzidos com teores de 5%, 10%, 15% e 20% em massa de fibra de curauá, tal qual observado no trabalho de Santos (2015). No entanto, verificou-se que a mistura foi bem sucedida (totalmente diluída) até o teor de 15%. Por isso, optou-se por introduzir os teores intermediários de 2,5%, 7,5% e 12,5% de fibra em massa. As quantidades de cada componentes e os respectivos códigos das amostras estão exibidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição dos compósitos em percentual em massa.

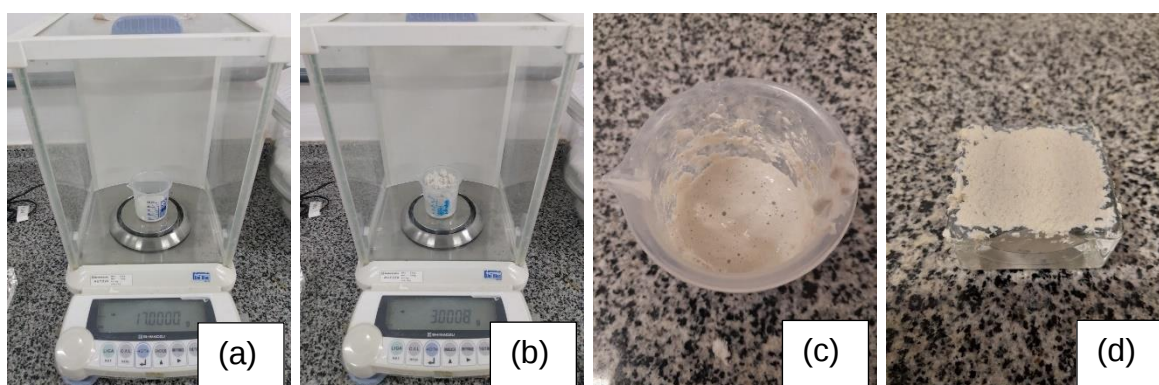
Compósitos	Borracha natural (%)	Fibra de curauá (%)	Tramento alcalino
C2,5%-FNT	97,5	2,5	Fibra não tratada
C2,5%-FT	97,5	2,5	Fibra tratada
C5%-FNT	95	5,0	Fibra não tratada
C5%-FT	95	5,0	Fibra tratada
C7,5%-FNT	92,5	7,5	Fibra não tratada
C7,5%-FT	92,5	7,5	Fibra tratada
C10%-FNT	90	10,0	Fibra não tratada
C10%-FT	90	10,0	Fibra tratada
C12,5%-FNT	87,5	12,5	Fibra não tratada
C12,5%-FT	87,5	12,5	Fibra tratada
C15%-FNT	85	15,0	Fibra não tratada
C15%-FT	85	15,0	Fibra tratada

Fonte: Autor (2024).

Primeiramente, os componentes foram pesados numa balança analítica (modelo AUY220 com precisão de 0,1 mg, fabricada pela Shimadzu) e adicionados num copo becker de plástico (Fig. 3.2a e 3.2b), onde foram agitados manualmente com um bastão de vidro até que a mistura fosse homogeneizada (Fig. 3.2c).

Em seguida, a mistura foi acondicionada em molde de vidro e posta em cura (Fig. 3.2d). Para acelerar o processo, foi utilizado um forno de circulação de ar, o qual teve a temperatura ajustada em 70°C (PRASANNA *et al.*, 2021). Santos (2015) observou que, em compósitos de borracha natural e carnaúba, o tempo de cura varia de acordo com o teor de fibras na mistura. De modo geral, quanto maior a quantidade de fibra, menor o tempo de cura, podendo variar de 24 a 72 h. Por padrão, adotou-se o tempo de secagem de 72 h com o intuito de garantir que todas as amostras estivessem totalmente solidificadas ao fim do processo.

Figura 3.3 - (a) Látex pré-vulcanizado, (b) fibra de curauá, (c) mistura homogeneizada, (d) compósito em molde de vidro.



Fonte: Autor (2024).

As amostras foram preparadas em geometria cilíndrica com 35 mm de diâmetro e espessuras variando de 10 a 15 mm. Esta variação foi devida ao processo de cura e foi observada em compósitos com menores teores de reforço. Tais amostras foram especificamente utilizadas nos ensaios não destrutivos, como o de dureza e condutividade térmica.

Adicionalmente, também foram fabricadas amostras na forma de placas, com dimensões de 12cm x 8cm e espessura média de 4 mm, para a produção de corpos-

de-prova para os ensaios de resistência à tração e demais ensaios destrutivos, seguindo os mesmos critérios já descritos.

3.4 ENSAIOS REALIZADOS

3.4.1 Determinação da massa específica

A determinação da massa específica da fibra de curauá foi obtida através do princípio de Arquimedes utilizando uma proveta (Fig. 3.4). Para tal, 10 g de fibras cortadas em comprimentos variando entre 10 e 20 mm foram secas em forno de circulação de ar a 80°C, sendo pesadas a cada 2 h até a constância de massa, ou seja, até que a variação de massa atingisse valores inferiores a 0,1% (LEÃO, 2008; SALES, 2015).

Após a secagem, as fibras foram inseridas numa proveta de 100 ml contendo 60 ml de água destilada e mantidas imersas por 24 h para que o aumento de volume fosse observado, garantindo que espaços vazios na fibra fossem totalmente ocupados pela água.

O ensaio foi realizado em três amostras de fibra e o valor da massa específica foi obtido pela Equação 3.1. Onde ρ_f representa a massa específica da fibra, em g/cm³, m_f é a massa da fibra, em g, V_a e V_{af} são respectivamente o volume inicial da proveta contendo apenas água destilada e o volume final contendo água e fibra, em cm³. O mesmo procedimento foi realizado para as fibras mercerizadas.

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_{af} - V_a} \quad (3.1)$$

Já para a borracha natural e os compósitos, o ensaio foi realizado com um picnômetro de 50 ml (modelo com termômetro fabricado pela Vidrolabor), pois, conforme observado na literatura, a borracha tem densidade volumétrica abaixo ou muito próxima à da água, o que dificultaria o processo usando a proveta, uma vez que as amostras não ficariam submersas.

Figura 3.4 - Ensaio de determinação da massa específica da fibra de curauá.



Fonte: Autor (2024).

A determinação da densidade aparente da borracha natural e dos compósitos se deu em concordância com o procedimento estabelecido pela norma ASTM D297-21 (*Standard Test Methods for Rubber Products - Chemical Analysis*), considerando a temperatura da sala em 25°C e realizando as devidas correções no caso de pequenas variações.

Após a constância de massa das amostras, pedaços menores foram separados para o ensaio, os quais foram pesados em balança analítica. O picnômetro foi preenchido com álcool etílico (0,78 g/cm³, a 25°C) e, em seguida, também foi pesado. Na sequência, a amostra sólida foi inserida no picnômetro preenchido com etanol e, posteriormente, pesado. Por fim, a temperatura do etanol no picnômetro foi aferida para uma determinação mais precisa da massa específica, caso fosse diferente de 25°C.

Tais medidas possibilitam determinar a massa específica das amostras por meio da Equação 3.2. Onde ρ_a é a densidade aparente das amostras de borracha ou compósito (em g), A é a massa da amostra (em g), B é a massa do conjunto picnômetro com etanol e a amostra inserida (em g), C é a massa do picnômetro preenchido com etanol (em g), e D é massa específica do etanol na temperatura da sala (em g/cm³).

$$\rho_a = \frac{0,9971A}{A-(B-C)} \cdot D \quad (3.2)$$

3.4.2 Determinação do Teor de umidade

O teor de umidade dos insumos e dos compósitos foi determinado com o uso de um analisador halógeno de umidade (Modelo OHAUS MB-35 de fabricação Ohaus) com capacidade para analisar amostras de até de 35 g, com incremento de 0,01%, ou 0,001 g, e operação em faixa de temperaturas entre 50°C e 160°C com erro de $\pm 5^\circ\text{C}$, disponível no Laboratório de Materiais Amazônicos e Compósitos (LaMAC) da UFAM.

3.4.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os grupos funcionais presentes nas superfícies das fibras tratadas e não tratadas, na borracha natural e nos compósitos, foram analisados através da espectroscopia no infravermelho com reflectância total atenuada (FTIR-ATR) utilizando um Espectrômetro Shimadzu, modelo “IRAffinity-1S and IV”, do Laboratório de Processos Químicos da UEA (Fig. 3.6).

Figura 3.5 - Ensaio de FTIR-ATR das fibras de curauá tratadas e não-tratadas.



Fonte: Autor (2024).

3.4.4 Microscopia de eletrônica de varredura (MEV)

A fibra de curauá e os compósitos foram analisados microscopicamente afim de avaliar morfologia das superfícies e adesão entre a matriz e o reforço. Além disso, serviu para avaliar a modificação superficial da fibra de curauá devido ao tratamento alcalino com NaOH.

Para isso, foi utilizado um microscópio de varredura eletrônica (MEV) de alta resolução da marca Jeol, modelo JSM IT500 HR, localizado no Centro Multiusuário para Análise em Fenômenos Biomédicos (CMABio) da UEA (Fig.3.7).

Figura 3.6 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV), Jeol JSM IT500 HR.



Fonte: CMABio-UEA (2024)

3.4.5 Difractometria de Raios X (DRX)

A análise de raios x foi empregada nas amostras para avaliar seus índices de cristalinidade. Um Difratorômetro de raios-X da marca Shimadzu (Fig. 3.8), modelo Maxima XRD 7000, com comprimento de onda de Cu-K α (1,541874 Å), tensão de 40,0 kV e corrente de 30,0 mA, localizado na Central da Analítica (CMC) do Instituto Federal do Amazonas (IFAM), foi empregado nesta análise. A faixa de varredura foi de 5° a 100° (2 θ), com velocidade do goniômetro de 0,02°/passo.

Os dados obtidos foram normalizados e plotados, gerando padrões de difratometria. Para o cálculo do índice de cristalinidade (IC) das fibras lignocelulósicas, adotou-se o método de Segal (SEGAL *et al.*, 1959), conforme a Equação 3.3, onde I_{FC} é a intensidade do pico de difração mais elevado, representando a fase cristalina, e I_{AM} é a altura da intensidade mínima entre os picos principais, representando a fase amorfa.

$$IC(\%) = \left(\frac{I_{FC} - I_{AM}}{I_{FC}} \right) \cdot 100 \quad (3.3)$$

Figura 3.7 - Difratômetro de raio x (DRX), Shimadzu Maxima XRD 7000.



Fonte: Central analítica CMC/IFAM (2024)

3.4.6 Análise termogravimétrica.

As análises térmicas foram realizadas utilizando o analisador SDT Q600 da TA Instruments, localizado no laboratório de Ensaios Físico-Químicos dos Materiais/FT/UFAM. As amostras foram aferidas a aproximadamente 10 mg, a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min até a temperatura final de 800°C, com fluxo de gás N 5.0 de 30 ml/min. O cadinho utilizado nos testes foi o de alumina de 90 microlitros sem tampa.

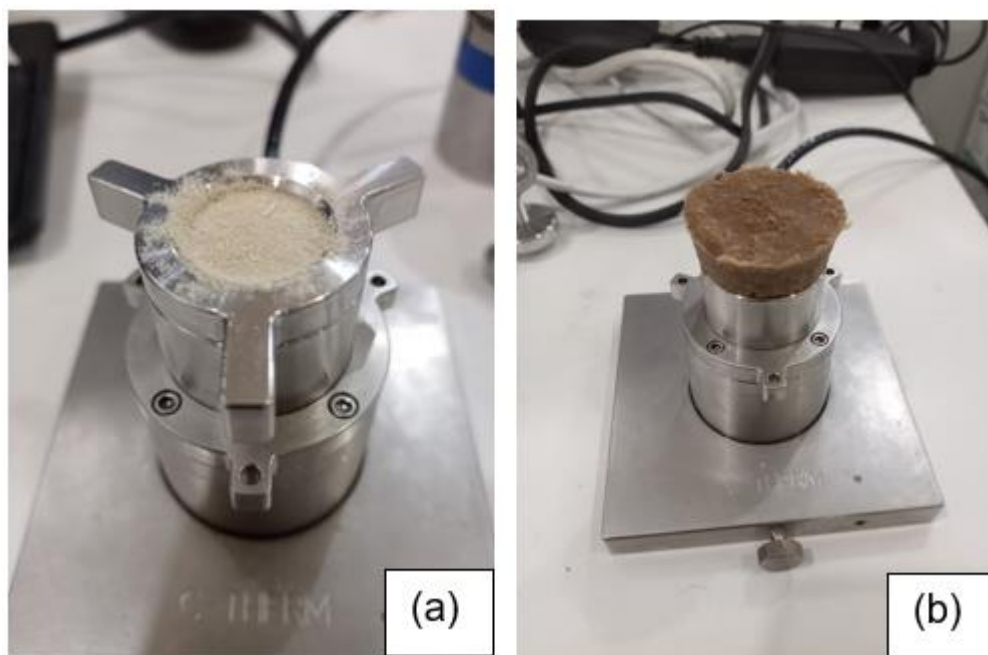
3.4.7 Condutividade, capacidade e difusividade térmica

As propriedades térmicas da fibra de curauá, da borracha natural e dos compósitos foram determinadas por meio do método da Fonte de Plano Transiente Modificado (*Modified Transient Plane Source* - MTPS) utilizando o sensor do equipamento TCi da C-Therm, disponível no Laboratório de Materiais (LabMAT) da UFAM.

Este equipamento permite medir, de forma direta, a condutividade térmica e calcula a difusividade e capacidade térmica de materiais sólidos, líquidos e pós, com a vantagem de ser não-destrutivo, ter precisão superior a 99%, e estar em concordância com a norma ASTM D7984-21 (*Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument*).

O ensaio foi realizado com a fibra de curauá na forma de pó (Fig. 3.4a) e em forma de sólido para a borracha natural e compósitos, como visto na Figura 3.4b, respectivamente. Foram realizadas 5 medições em cada amostra afim de garantir significância estatística.

Figura 3.8 - (a) Uso do C-Therm para (a) fibra de curauá e (c) compósito C12,5%-FNT.



Fonte: Autor (2024).

3.4.8 Dureza Shore A

A dureza Shore A, indicada para materiais macios tais como borrachas e esponjas, foi medida tanto nas amostras de borracha quanto nos compósitos com o auxílio de um durômetro digital, modelo FE-0063, da Kaptron (Fig. 3.9), disponível no Laboratório de metrologia da UEA. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D2240-05 (*Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*).

Figura 3.9 - Durômetro Kaptron, modelo FE-0063.



Fonte: Autor (2024).

3.4.9 Ensaio de resistência à tração

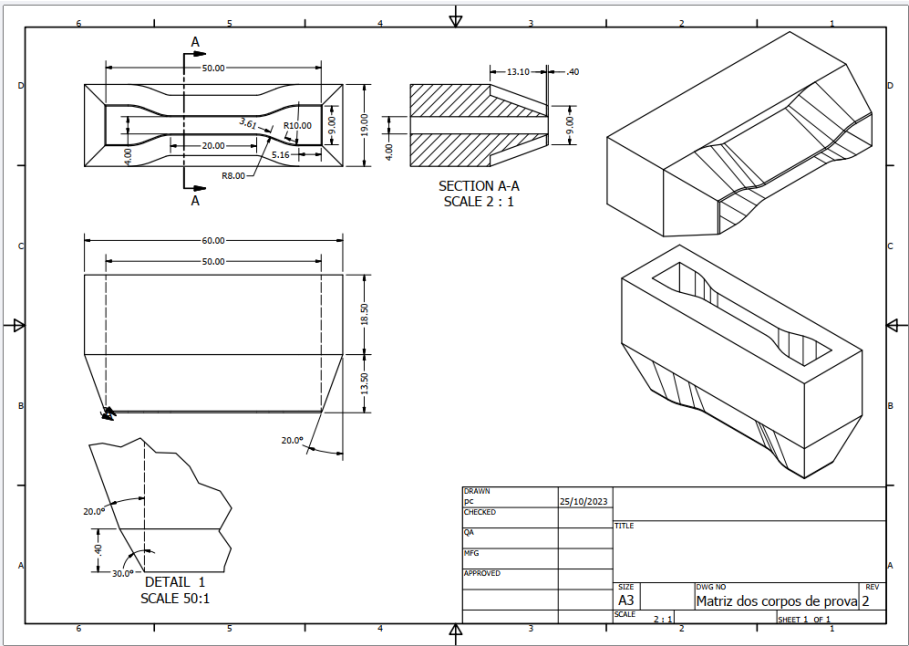
Os ensaios de resistência à tração foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ISO 37 (*Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of tensile stress-strain Properties*), possibilitando a fabricação de corpos de prova de comprimento total de 50 mm (Tipo 3), o que foi vantajoso, pois não se dispunha de grandes quantidades de fibra de curauá para a produção de corpos de provas maiores.

Os testes foram realizados numa máquina universal de ensaio, modelo INSTRON 5984 com o software integrado BLUEHILL 3 com célula de carga de 15,0 kN, temperatura ambiente de 24°C e velocidade de avanço de 200 mm/min.

Um molde de corte com a geometria dos corpos de prova do tipo 3 foi desenvolvido com o auxílio do software AUTODESK INVENTOR® e fabricado em aço SAE 1040, conforme projeto exposto na Figura 3.10.

Os corpos de prova foram produzidos a partir do corte das placas de compósitos com o auxílio de uma prensa hidráulica manual, tal qual apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.10 - Projeto de molde de corte dos corpos de prova, conforme ISO 37:2017.



Fonte: Autor (2024)

Figura 3.11 - Corpos de prova produzidos para ensaio de tração.



Fonte: Autor (2024)

3.4.10 Teste de Tukey

Como auxílio à análise dos efeitos da variação da carga de fibra e do tratamento químico, utilizou-se o teste de Tukey para comparar as diferentes médias das propriedades dos materiais em análise.

Segundo Field (2018), em estudos múltiplas comparações de médias, o Teste de Tukey é reconhecidamente uma das ferramentas estatísticas mais eficientes e utilizadas. Essa técnica permite a realização de comparações entre todos os pares de médias possíveis, mantendo o nível de significância geral controlado, sendo essencial para evitar falsos positivos em análises com muitas variáveis e é frequentemente escolhido em pesquisas nas áreas de ciências biológicas e engenharia, onde a identificação de diferenças significativas entre grupos é fundamental (Field, 2018; Howell, 2012; Maxwell & Delaney, 2004).

O teste de Tukey pode ser aplicado comparando a diferença entre duas médias com a diferença mínima significativa (Δ) encontrada para o modelo. Caso a diferença entre médias for maior do que Δ , assume-se que as médias são estatisticamente distintas a um determinado nível de significância (α). Já o oposto implica dizer que não diferença significativa entre as médias, sugerindo que os resultados podem ser atribuídos ao acaso. Em trabalhos de engenharia é comum adotar $\alpha=5\%$, podendo ser ainda menor dependendo do tipo de pesquisa (Field, 2018). A diferença mínima significativa pode ser calculada através da Equação 3.4.

$$\Delta = q_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{(MQR)}{r}} \quad (3.4)$$

Onde Δ é a diferença mínima significativa, MQR é a média quadrática dos resíduos, r é número de repetições e q_{α} é o valor da estatística q tabelada para o teste de Tukey.

Neste trabalho, utilizou-se o *software* Minitab® para aplicar o teste de Tukey e avaliar os seus resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MASSA ESPECÍFICA

4.1.1 Massa específica da fibra

A massa específica, ou densidade aparente, encontrada para a fibra de curauá foi de $1,2507 \pm 0,0006 \text{ g/cm}^3$, estando dentro da faixa de estabelecida em trabalhos anteriores, conforme visto na Tabela 2.1.

A Tabela 4.1 apresenta a massa específica determinada por outros autores em termos médios. Nela é possível observar que há uma grande variação da densidade na literatura, onde a diferença pode chegar quase ao triplo ($1,43 \text{ g/cm}^3$) do menor valor encontrado ($0,48 \text{ g/cm}^3$). Esta discrepância provavelmente ocorre devido aos diferentes métodos de ensaios utilizados, a origem e cultivo da planta (WEBER, 2018). Como a densidade aparente da fibra influencia diretamente no desempenho térmico e mecânico, torna-se indispensável determiná-la em cada pesquisa.

Tabela 4.1 - Comparativo da densidade aparente média da fibra de curauá disponível na literatura, em g/cm^3 .

Fonte	Densidade (g/cm^3)
Não tratada (AUTOR, 2024)	1,2507
Tratada (AUTOR, 2024)	1,43
LEÃO <i>et al.</i> (1998)	0,77
SILVA (2010)	1,38
SANTOS (2013)	1,43
SALES (2015)	1,34
WEBER (2018)	0,48
PINTO (2019)	1,33

Após a merceirização, a densidade aparente das fibras tratadas aumentou para $1,43 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$, correspondendo a um incremento de 14,2% em relação às fibras sem tratamento alcalino.

Uma possível explicação para este efeito é que, de acordo com os apontamentos de Tenazoa *et al.* (2021), como o tratamento alcalino geralmente

remove as partes amorfas de uma fibra vegetal (hemicelulose e lignina), seu volume tende a diminuir, o que melhora o empacotamento das fibras e acarreta no aumento da densidade. O mesmo efeito foi observado nos trabalhos de Aziz e Ansell (2004), Das e Chakraborty (2008), Hashim *et al.* (2017), os quais avaliaram os efeitos do tratamento alcalino das fibras de cânhamo, bambu e kenaf, respectivamente.

Devido a diferença observada na densidade aparente da fibra, optou-se por avaliar se existe diferença estatística entre as médias encontradas através do método de Tukey ao nível de 5% de significância. Segundo (PAGOTTO *et al.* 2021), este é um dos testes mais utilizados em estatística experimental e foi realizado com o auxílio do software MINITAB®.

A Tabela 4.2 mostra o resultado do teste Tukey, comparando as médias de fibras não tratada (FNT) e tratadas (FT), as quais estão em agrupamentos distintos, indicando diferenças estatísticas significativas. Este resultado implica em dizer que o tratamento alcalino afetou a densidade aparente da fibra de curauá.

Tabela 4.2 - Agrupamento das médias de densidade aparente das amostras de fibra de curauá usando o método de Tukey no intervalo de 95% de confiança.

Amostras	Média	DesvPad	Agrupamento	
FNT	1,2507	0,0006	A	
FT	1,43	0,04		B

Fonte: Autor (2024).

Ainda assim, em média, a fibra de curauá é mais leve que diversas fibras naturais tais como as de sisal, piaçava, juta, coco, podendo corresponder aproximadamente à metade da densidade da fibra de vidro (vide Tab. 2.1). Tal característica pode possibilitar a produção de compósitos poliméricos mais leves, o que pode ser uma vantagem, dependendo da aplicação.

4.1.2 Massa específica da matriz e dos compósitos

O resultado encontrado para massa específica da borracha natural foi de $1,03 \pm 0,09 \text{ g/cm}^3$.

A densidade aparente da borracha natural, conforme outros autores, apresenta pouca variação (cerca de 17%) se comparado com a fibra de curauá. Até mesmo outras borrachas sintéticas, à exemplo das borrachas butílica (IIR) e nitrílica (NBR), respectivamente com 0,92 e 1,037 g/cm³ (CARDARELLI, 2008), encontram-se na mesma faixa observada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Comparativo da densidade aparente média da borracha natural (NR) disponível na literatura, em g/cm³.

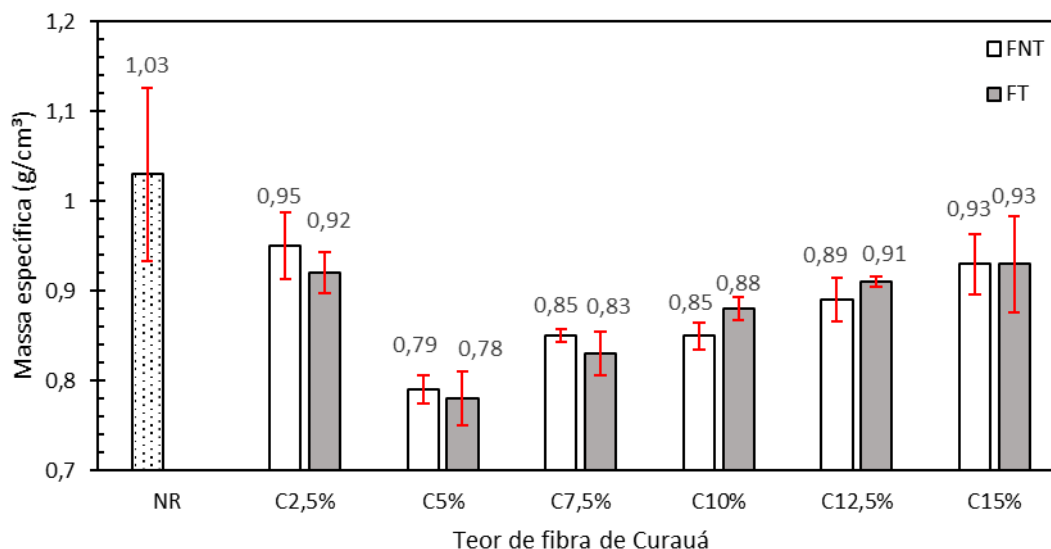
Fonte	Densidade (g/cm³)
AUTOR (2024)	1,027
FRANTA (1989)	0,92
DE <i>et al.</i> (2001)	0,92 - 1,0
CARDARELLI (2008)	0,92 - 1,037
GENT (2012)	0,97
SAREENA (2012a)	0,916 - 1,076
DATTA e WLOCH (2017)	0,9594 - 0,9616
RYBIŃSKI <i>et al.</i> (2018)	0,93 - 0,988

Portanto, pode-se afirmar que o valor determinado neste trabalho converge para o resultado disponível na literatura.

A massa específica dos compósitos com fibras de curauá, tratadas (FT) e não tratadas (FNT), também foi determinada com o intuito de avaliar o efeito do carregamento de reforço na matriz. A Figura 4.1 mostra a variação da massa específica dos compósitos em função do teor de fibras de curauá. Nela é possível observar uma tendência não-linear, onde se observa uma propensão inicial à redução, seguida de uma elevação da densidade aparente dos compósitos, em termos médios.

Este comportamento é similar ao observado nas pesquisas de Santos (2015), em compósito de borracha natural e fibra de carnaúba, e de Cui *et al.* (2019), em compósito de amido termoplástico e fibra de sisal. O incremento visto na massa específica dos compósitos de 7,5 a 15%p de fibra (C7,5% à C15%) em relação ao compósito com 5% de reforço (C5%) pode estar associado à baixo grau de dispersão das fibras, acarretando em descontinuidades na matriz de borracha natural (NR), elevando a densidade aparente, conforme Ganjyal *et al.* (2004).

Figura 4.1 - Massa específica dos compósitos de borracha natural e fibra de curauá.



Fonte: Autor (2024).

De maneira geral todas as amostras apresentaram massas específicas médias inferiores à da borracha natural. No entanto, o compósito C5-FT apresentou uma densidade aparente de 0,78 g/cm³, sendo a menor encontrada, exibindo uma redução de 24,4% em relação à matriz. Por outro lado, a amostra C2,5-FNT mostrou o maior valor (0,95 g/cm³), com redução de apenas 7,8% da massa específica. Ainda na Figura 4.1, nota-se proximidade entre as médias de densidade das amostras C2,5-FT (0,92 g/cm³), C15-FNT e C15-FT (ambas 0,93 g/cm³). Por isso, adicionalmente, utilizou-se do teste de Tukey para avaliar se há diferenças estatísticas significativas entre as médias de densidade encontradas.

Foram realizadas comparações entre as médias de densidade dos compósitos e da borracha natural, utilizando o método de Tukey, com um nível de significância de 5%. A Tabela 4.4 apresenta o resultado obtido com os devidos agrupamentos de média. Amostras que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes, ou seja, os contrastes das médias foram superiores à diferença mínima significativa do método (PIMENTEL-GOMES, 2023).

Com o auxílio da Tabela 4.4 é possível inferir que apenas os compósitos de C5-FNT à C12,5-FNT possuem densidades médias estatisticamente diferentes na matriz, ou seja, o teor de fibra afetou a massa específica.

Tabela 4.4 - Agrupamento das médias de densidade aparente das amostras de compósitos usando o método de Tukey no intervalo de 95% de confiança.

Amostras	Média	DesvPad	Agrupamento				
NR	1,03	0,09	A				
2,5-FNT	0,95	0,04	A	B			
15-FT	0,93	0,05	A	B	C		
15-FNT	0,93	0,03	A	B	C		
2,5-FT	0,92	0,02	A	B	C		
12,5-FT	0,91	0,01		B	C		
12,5-FNT	0,89	0,02		B	C	D	
10-FT	0,88	0,01		B	C	D	E
7,5-FNT	0,85	0,01		B	C	D	E
10-FNT	0,85	0,02		B	C	D	E
7,5-FT	0,83	0,02			C	D	E
5-FNT	0,79	0,02				D	E
5-FT	0,78	0,03					E

Fonte: Autor (2024).

Já os compósitos com fibras tratadas por solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH), apenas as amostras de C5-FT à C10-FT têm densidades estatisticamente diferentes da borracha natural. Assim, a partir de 10%p de fibras tratadas não se observa efeito na massa específica da matriz, que tende a aumentar. Também não se observa diferença estatística entre os pares de compósitos com e sem tratamento alcalino (Ex.: 2,5-FNT e 2,5-FT), ou seja, a merceirização não exerce forte influência nos compósitos, conforme visto nos agrupamentos da Tabela 4.4.

4.2 TEOR DE UMIDADE

O teste de umidade foi realizado em amostras de fibras de curauá, não-tratadas (FNT) e tratadas (FT), de borracha natural e nos compósitos com várias concentrações de reforço.

O teor de umidade obtido para a fibra de curauá não-tratada foi de $10,17 \pm 0,03\%$ e para a fibra tratada com NaOH foi de $8,68 \pm 0,15\%$, estando em concordância com Mohammed *et al.* (2021) e Subash e Muthiah (2022), os quais afirmam que a quantidade de água presente nas fibras lignocelulósicas pode variar de

5% a 22%. Além disso, na Tabela 4.5 é possível comparar e constatar a proximidade entre os presentes valores com os obtidos em diferentes pesquisas, tanto para fibras não tratadas e tratadas com NaOH.

Tabela 4.5 - Teor de umidade das fibras de curauá.

Fonte	Não tratada	Tratada
AUTOR (2024)	10,17±0,03%	8,68±0,15%
SANTOS (2013)	8,3±0,3%	-
SALES (2015)	11,47%	-
WEBER (2018)	9,14±0,31%	-
TEXEIRA (2019)	12,41%	11,92%
BORGES (2019)	8,89±0,34%	8,01±0,49%

Ainda na Tabela 4.5, nota-se que após o tratamento alcalino houve uma redução no teor de umidade da fibra. O mesmo também pode ser visto nos trabalhos de Teixeira (2019), onde a umidade reduziu de 12,41% para 11,92%, e Borges (2019), que passou de 8,89% para 8,01%. Ambos os autores também realizaram o tratamento alcalino em solução aquosa com concentração 5% de NaOH e 2 h de imersão.

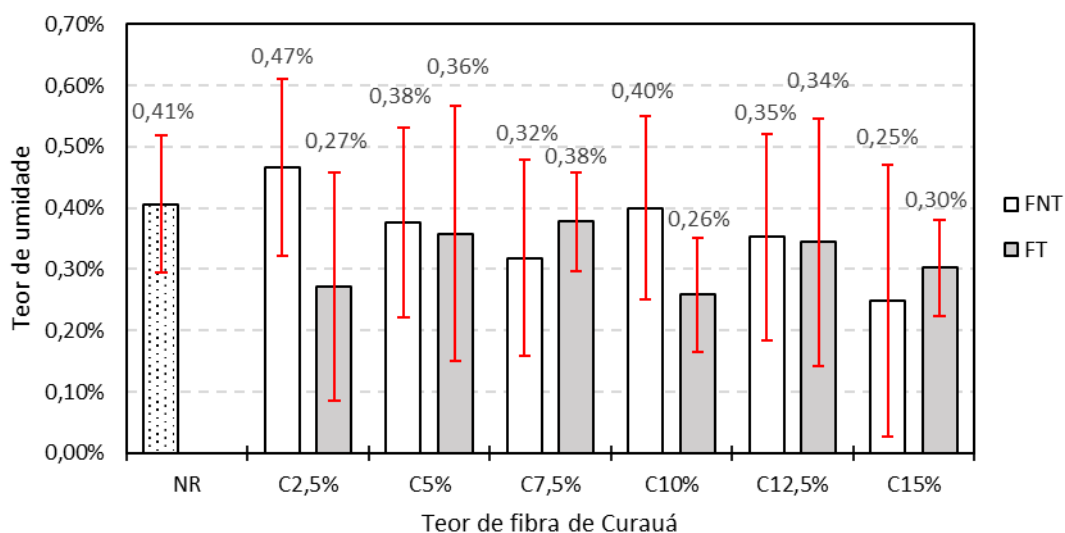
Segundo Pinto (2019), a fibra de curauá apresenta umidade relativamente baixa quando comparada com outras fibras lignocelulósicas. Tal característica pode ser vantajosa, pois a umidade pode prejudicar a adesão na interface matriz/reforço.

Conforme observado na Figura 4.2, a borracha natural, em média, apresentou um teor de umidade de 0,41%, divergindo do obtido por SOUZA FILHO (2015) e SANTOS (2015), respectivamente, 0,22% e 0,8%. Tal discrepância pode ser devida ao método de cura adotado por cada trabalho e pelos componentes presentes em cada látex pré-vulcanizado, que pode variar conforme o fabricante. De qualquer modo, a umidade encontrada nas amostras de borracha (matriz) deste trabalho e dos supracitados converge para o proposto por Tagliari (2012), que afirma que ao final do processo de fabricação de borrachas, a umidade deve estar próxima a 0,5%.

Em termos médios, todos compósitos de borracha natural e fibra de curauá exibiram teores de umidade inferiores a 0,5%, independentemente do tratamento químico. Tal resultado pode ser considerado positivo, pois valores elevados para a

umidade contida nos compósitos podem aumentar a condutividade térmica, inviabilizando seu potencial uso como isolante térmico, e prejudicar na adesão dos componentes, deteriorando a resistência mecânica.

Figura 4.2 - Teor de umidade em amostras de compósitos com fibras tratadas e não tratadas.



Fonte: Autor (2024).

A umidade contida nos compósitos variou de 0,25% à 0,47% nas amostras C15-FNT e C2,5-FNT, respectivamente, ambas com fibras sem tratamento alcalino. Estes cálculos mostram que o teor de umidade de alguns compósitos pode ser tão baixo quanto o observado no poliuretano (PU), considerado um bom isolante térmico. No entanto, devido aos desvios do teor de umidade observados nas amostras, aplicou-se o teste Tukey para avaliar as médias desta propriedade.

A Tabela 4.6 apresenta um quadro de agrupamento de médias elaborado através do método de Tukey, considerando uma significância de 5%.

A partir do teste de significância, nota-se que as médias de teor de umidade das amostras são estatisticamente semelhantes. O que implica dizer que a concentração de fibra de curauá e tratamento alcalino não exercem influência no teor de umidade dos compósitos (compartilham a mesma letra de agrupamento).

Tabela 4.6 - Agrupamento das médias do teor de umidade das amostras usando o método de Tukey no intervalo de 95% de confiança.

Amostras	Média	DesvPad	Agrupamento
Borracha	0,41%	0,11%	A
2,5%-FNT	0,47%	0,14%	A
2,5%-FT	0,27%	0,19%	A
5,0%-FNT	0,38%	0,15%	A
5,0%-FT	0,36%	0,21%	A
7,5%-FNT	0,32%	0,16%	A
7,5%-FT	0,38%	0,08%	A
10%-FNT	0,40%	0,15%	A
10%-FT	0,26%	0,09%	A
12,5%-FNT	0,35%	0,17%	A
12,5%-FT	0,34%	0,20%	A
15%-FNT	0,25%	0,22%	A
15%-FT	0,30%	0,08%	A

Fonte: Autor (2024).

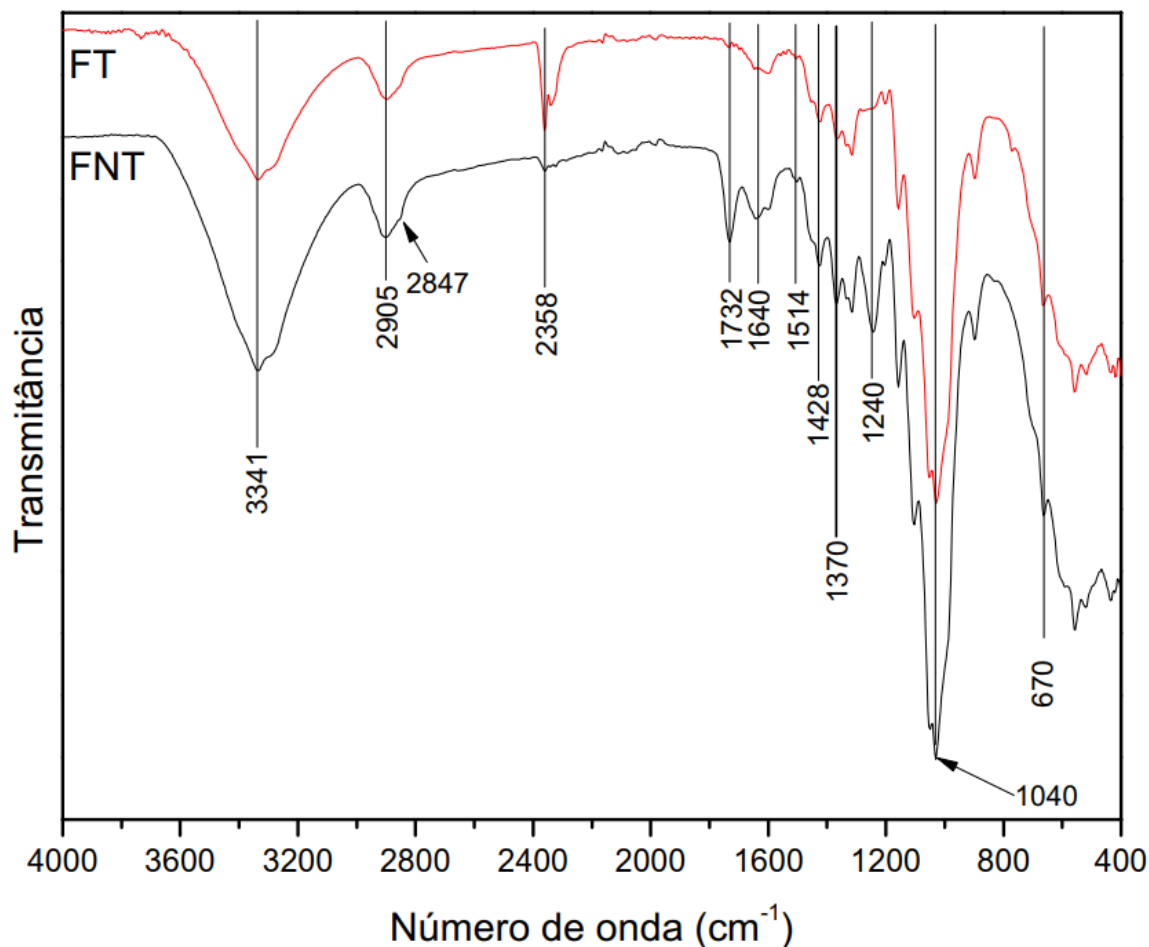
4.3 ESPECTOMETRIA DO INFRAVERMELHO

O tratamento alcalino com NaOH é uma técnica amplamente aplicada para limpar a superfície da fibra, reduzir os teores de hemicelulose e lignina, desprendendo as unidades celulares afim de melhorar a adesão entre uma fibra vegetal e uma matriz polimérica (SENA NETO *et al.*, 2014). Em especial, como parte dos compósitos foram produzidos com fibras curauá tratadas e não tratadas, a análise do infravermelho, aliada com outras técnicas, pode contribuir para a confirmação de uma efetiva modificação superficial esperada da merceirização.

Os espectros do infravermelho (FTIR) das fibras de curauá são apresentados pela Figura 4.3 e são similares ao observado na literatura (LIBERA JR, 2019b; SISTI *et al.*, 2018; TOMCZAK *et al.*, 2007).

As principais bandas de absorção da celulose, hemicelulose e lignina (componentes da fibra de curauá) se encontram listadas na Tabela 4.7 e compreendem os picos mais intensos entre 3700 cm⁻¹ e 2700 cm⁻¹ e outros de menor intensidade entre 1800 cm⁻¹ e 860 cm⁻¹.

Figura 4.3 - FTIR das fibras de curauá não tratadas e tratadas com NaOH.



Fonte: Autor (2024).

O pico largo e intenso em 3341 cm^{-1} normalmente está associado aos estiramentos de ligações O–H presentes na celulose e na água, demonstrando a natureza hidrofílica da fibra (BELTRAMI, *et al.*, 2014; LIBERA JR, 2019b). Segundo Maslowski *et al.* (2018), a redução de intensidade deste pico no espectro da fibra tratada indica que o tratamento alcalino diminuiu as quantidades de ligações de hidrogênio devido a remoção de grupos hidroxílicos pela reação com o hidróxido de sódio (NaOH).

A redução da celulose e da hemicelulose nas fibras tratadas, devido ao tratamento alcalino, pode ser evidenciada pela diminuição do pico em 2905 cm^{-1} correspondente ao estiramento da ligação C–H de grupos $-\text{CH}_2$ e pela inexistência do pico relacionado ao estiramento C=O do grupo éter, em 1732 cm^{-1} no espectro da fibra

tratada (LOPATTANANON *et al.*, 2006; SISTI *et al.* 2018; LAZARINI e MARCONCINI, 2019).

Tabela 4.7 - Principais bandas e atribuições dos espectros das fibras de curauá.

Número de onda (1/cm)	Atribuição das bandas
~3341	Estiramento dos grupos hidroxílicos (–OH) das moléculas de celulose.
~2905	Estiramento da ligação C–H dos grupos alquila nas ligações alifáticas de lignina, hemicelulose e celulose.
~2847	Banda referente à presença de ceras e graxas.
~2358	Banda referente à presença de CO ₂ da fase gasosa.
~1732	Estiramento dos grupos carbonílicos (C=O) dos grupos éster arílico, carboxílico alifático e acetil no componente xilano da hemicelulose.
~1640	Estiramento dos grupos carbonílicos (C=O) presentes na lignina.
~1514	Estiramento das ligações C–C nos anéis aromáticos (guaiacil e siringil) presentes na lignina.
~1428	Deformação assimétrica do grupo metila da celulose.
~1370	Estiramento da ligação C-H da celulose.
~1240	Deformação do anel guaiacil associado ao trecho C–O na lignina e deformação axial da ligação C=O aromática.
~1040	Estiramento das ligações C–O–C presentes na celulose, hemicelulose e lignina.
~670	Estiramento das ligações C–O–H fora do plano da celulose.

Fonte: LOPATTANANON *et al.*, 2006; BELTRAMI, *et al.*, 2014; SISTI *et al.* 2018; LIBERA JR ,2019b; FREITAS, (2019) e ARAÚJO (2022).

A presença de ceras e graxas na superfície das fibras não tratadas e tratadas foi confirmada pelo pico em 2847 cm⁻¹ (SISTI *et al.* 2018), apresentando uma discreta redução após o tratamento químico. O dióxido de carbono do ar também foi detectado no ensaio da fibra tratada com o aumento da banda característica do estiramento assimétrico CO₂ em 2358 cm⁻¹ (FREITAS, 2019). Uma possível explicação é o acúmulo de CO₂ devido à respiração humana próximo ao equipamento. O mesmo pico também foi visto no trabalho de Freitas *et al.* (2023).

O espectro da fibra tratada aponta para a dissolução da lignina, pois não apresenta as bandas de 1514 cm⁻¹ e 1240 cm⁻¹ as quais, respectivamente,

correspondem aos estiramentos C–C nos anéis aromáticos da lignina e a deformação axial da ligação C=O aromática. Também foi observada uma diminuição na intensidade do pico de 1040 cm^{-1} , relacionado ao estiramento C–O–C da celulose, hemicelulose e lignina (LIBERA JR, 2019b).

Segundo Araújo (2022), o aumento da intensidade da banda de 1370 cm^{-1} , observado no espectro da fibra tratada (FT), refere-se ao estiramento da ligação C-H da celulose, indicando que esta estrutura ficou mais exposta após o tratamento alcalino.

A partir destas análises, sugere-se que o tratamento químico com hidróxido de sódio foi capaz modificar os principais grupos funcionais presentes na fibra de curauá.

A espectroscopia do infravermelho também foi realizada nos compósitos com o intuito de avaliar possíveis alterações na estrutura química da matriz devido ao surgimento ou desaparecimento de grupos funcionais em função do teor de fibra de curauá.

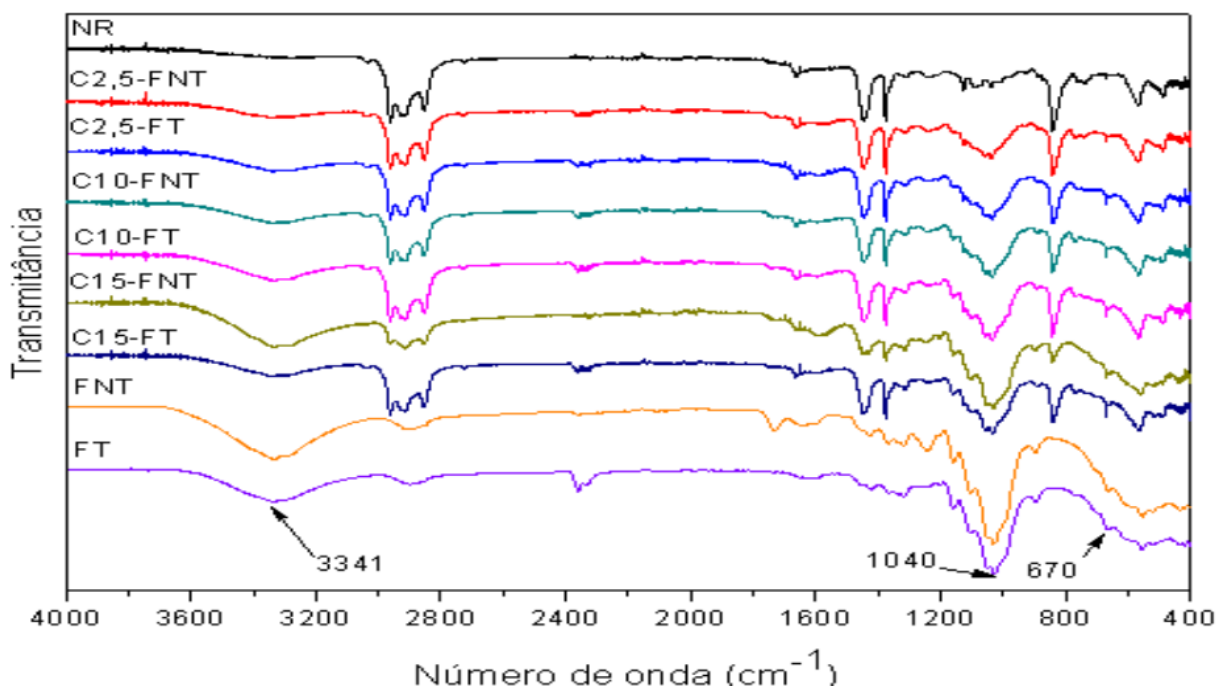
A Figura 4.4 apresenta os espectros do infravermelho dos compósitos com teores de 2,5%, 10% e 15% (em massa) de fibra de curauá com e sem tratamento, onde é possível compará-los com os espectros da borracha natural e das fibras naturais, tratadas e não tratadas.

Os resultados mostram que o espectro da borracha natural (NR) está compatível com o observado na literatura disponível e apresenta as bandas típicas do poli(cis-1,4-isopreno) (SILVA, 2017; BARASOUL, 2021; MIRANDA, 2022; VACCIOLI, 2022). A borracha natural apresentou picos de transmitância nas bandas 3034 cm^{-1} , referente ao estiramento da ligação =CH, as bandas 2963 cm^{-1} , 2912 cm^{-1} e 2854 cm^{-1} , ao estiramento da ligação C-H nos grupos CH₂ e CH₃, 1667 cm^{-1} , ao estiramento da ligação dupla C=C, 1441 cm^{-1} e 1374 cm^{-1} , respectivamente, deformações em CH₂ e CH₃, 1040 cm^{-1} , 764 cm^{-1} e 737 cm^{-1} , ao dobramento assimétrico no plano de CH₂ e CH₃. Estes e demais picos com suas atribuições de banda estão elencadas na Tabela 4.8.

Além disso, foi detectada a presença de grupos sulfonados (SO₂), pela presença do pico na banda 1310 cm^{-1} , o que, de acordo com Vacciolli (2022), sugere

a existência de ligações cruzadas de enxofre, evidenciando o processo de vulcanização da borracha.

Figura 4.4 - Comparação dos espectros do infravermelho da fibra de curauá, da borracha natural e dos compósitos com 2,5%, 10% e 15% de reforço.



Fonte: Autor (2024).

Através da Figura 4.4, os espectros dos compósitos se mostraram similares ao da borracha natural, contando com todas bandas dispostas na Tabela 4.8. Entretanto, notam-se algumas diferenças em relação à borracha natural especificamente nas bandas 3341 cm⁻¹, 1040 cm⁻¹ e 670 cm⁻¹ (Fig. 4.4).

Segundo Silva (2017), a banda 3341 cm⁻¹ se refere ao estiramento de grupos hidroxílicos (OH) que podem estar associados à conservantes do látex à base de amônia (NH₄OH, e.g.), presente em baixo teor na borracha natural. Por outro lado, é possível observar uma intensificação neste pico em função do teor de fibra vegetal. Tal amplificação provavelmente se deve à presença de grupos OH oriundos da molécula de celulose proveniente da fibra de curauá.

Tabela 4.8 - Bandas Principais bandas e atribuições dos espectros da borracha natural e dos compósitos.

Número de onda (1/cm)	Atribuição das bandas
~3341	Estiramento dos grupos hidroxílicos (-OH)
~3034	Estiramento =CH
~2963	Estiramento assimétrico -CH ₃
~2912	Estiramento assimétrico -CH ₂
~2854	Estiramento simétrico -CH ₂
~1667	Estiramento da ligação C=C
~1441	Deformação -CH ₂
~1374	Deformação -CH ₃
~1310	SO ₂ (Sulfona)
~1125	Ligação C-H dobra no plano ou vibração (C-C) cis
~1084	Estiramento C-CH ₂
~1040	Ligação -CH ₃ balanço
~840	Vibração de flexão fora do plano C=C-H, referente a cis-1,4
~764 e 737	Ligação -CH ₂ balanço
~567	(R) ₂ -C=CH ₂ torção
~488 e 435	Ligação =C-C ₂ balanço

Fonte: Barasoul (2021) e Miranda (2022).

Já o pico visto em 1040 cm⁻¹ no espectro da borracha natural, de acordo com Barasoul (2021), está associado à deformação angular assimétrica no plano (balanço) de CH₃ da molécula de poli(isopreno). No entanto, também se observa um aumento de intensidade neste pico conforme a concentração de fibra é incrementada nos compósitos. Esta banda é igualmente percebida no espectro da fibra de curauá (com ou sem tratamento), sugerindo que tal intensificação de banda se deve a uma presença majoritária de celulose, hemicelulose e lignina nos compósitos de borracha natural.

Por fim, foi registrado o surgimento de um pico pouco proeminente nos compósitos em 670 cm⁻¹, não observado no espectro da borracha natural. É possível que este pico tenha relação com a detecção de ligações C-O-H presentes na celulose, devido ao aumento da carga de fibra nos compósitos.

A partir destas inferências, pode-se afirmar que os espectros dos compósitos caracterizam uma conjunção das principais bandas de transmitância de seus constituintes, predominando o espectro da borracha natural sobre a fibra de curauá. Adicionalmente, não foram observados deslocamentos de pico nos espectros dos

compósitos em relação aos componentes puros. Esta última observação vai de encontro ao proposto por Ñahuis (2021) que, segundo o autor, indica a ausência de reações químicas entre a matriz e a fase dispersa, existindo apenas interação física.

4.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

O ensaio de difração de raios X (DRX) foi realizado para avaliar o grau de cristalinidade das fibras de curauá antes e depois da merceirização. Tal índice indica a quantidade de celulose (semicristalina) presente nas amostras, a qual confere flexibilidade e rigidez à fibra vegetal e está diretamente relacionada às propriedades mecânicas e estabilidade térmica do material (TEXEIRA, 2019; FREITAS et al, 2023). A Figura 4.5 apresenta o padrão de raios X das fibras de curauá, da borracha natural e dos compósitos teores de 2,5, 10 e 15% de fibra natural.

Observando os espectros de DRX das fibras, é possível inferir que as amostras possuem padrão de difração similares, com a visualização dos picos característicos da celulose nos ângulos de Bragg (2θ) aproximadamente iguais a 18° , no vale amorfo, e $22,6^\circ$, no pico correspondente ao índice de Miller (200) (FERREIRA et al., 2020).

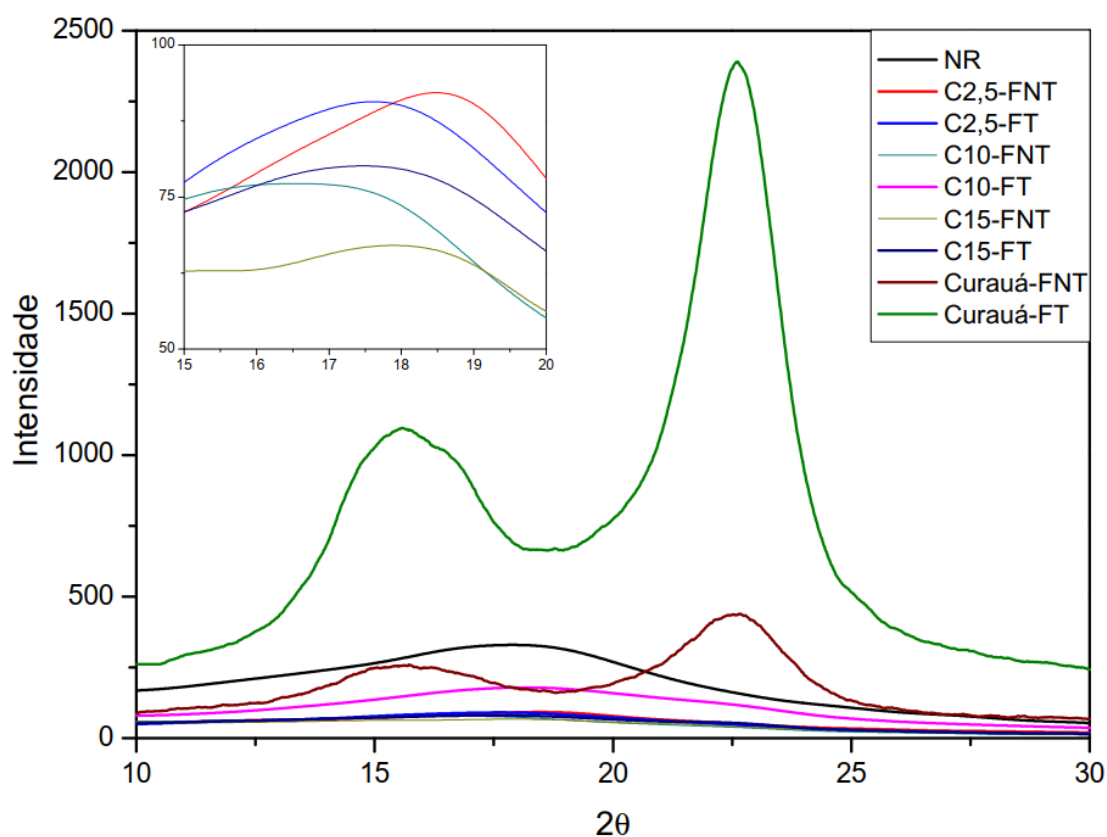
Assim, usando o método de Segal et al. (1959), foi possível determinar o índice de cristalinidade antes e após o tratamento alcalino, conforme apontado na Tabela 4.9. As fibras não tratadas apresentaram um índice de cristalinidade de 59,9%, valor próximo ao observado nos trabalhos de Tomczak et al. (2007), 66,3%, Sena Neto et al. (2013), 58,8%, Oliveira e Marques (2013), 61%, Souza (2016), 58,14% e Manigandan et al. (2021), 61%. Após o tratamento alcalino, o índice de cristalinidade aumentou para 71,3%, ou seja, houve um incremento de 19,2% em relação à fibra não tratada, semelhante ao observado em outras fibras lignocelulósicas como a juta (KUNDU et al., 2012), por exemplo. Este resultado está em consonância com Oliveira e Marques (2013), Souza (2016) e Texeira (2019) também reportaram aumentos na cristalinidade da fibra, respectivamente, nos valores de 61% para 81%, de 58,14% para 70,07% e de 55,96% para 62,18%.

Tabela 4.9 - Índices de cristalinidade da fibra de curauá tratada e não tratada.

Amostra	$2\theta=22,6^\circ$	$2\theta=18^\circ$	IC (%)
Não tratada	1196	480	59,9
Tratada	2456	704	71,3

Fonte: Autor (2024).

Figura 4.5 - Difratomogramas de raios-x das fibras de curauá, da borracha natural e dos compósitos.



Fonte: Autor (2024).

Segundo Texeira (2019), este aumento do índice de cristalinidade das fibras tratadas em relação às não tratadas se deve à remoção das fases amorfas da fibra de curauá composta pela lignina, hemicelulose e partes da celulose (semicristalina). Este resultado corrobora com a explicação de Tenazoa *et al.* (2021) para a densificação da da fibra de curauá após a merceirização, conforme citado anteriormente.

Dessa forma, a partir da análise de DRX, é possível assumir que, de fato, houve uma modificação superficial da fibra de curauá, com um aumento relevante de sua fase cristalina.

A Figura 4.5 também exibe o difratograma de raios X da borracha natural (NR) no qual se apresenta uma banda de espalhamento centrado em torno de $2\theta=18^\circ$, típico de materiais amorfos, estando em concordância com o observado por Xiong *et al.* (2023). Os compósitos com teores de 2,5%, 10% e 15% de fibra também apresentaram um padrão de espalhamento amorfo, semelhante ao da NR. Este resultado indica que a introdução de fibras de curauá não modificou a estrutura da matriz, independentemente da concentração e do tratamento alcalino. Resultado semelhante também foi obtido por Gavari (2012), que estudou compósitos de resina epóxi e pó de serra (material lignocelulósico), onde o reforço vegetal não alterou o padrão amorfo da matriz.

4.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

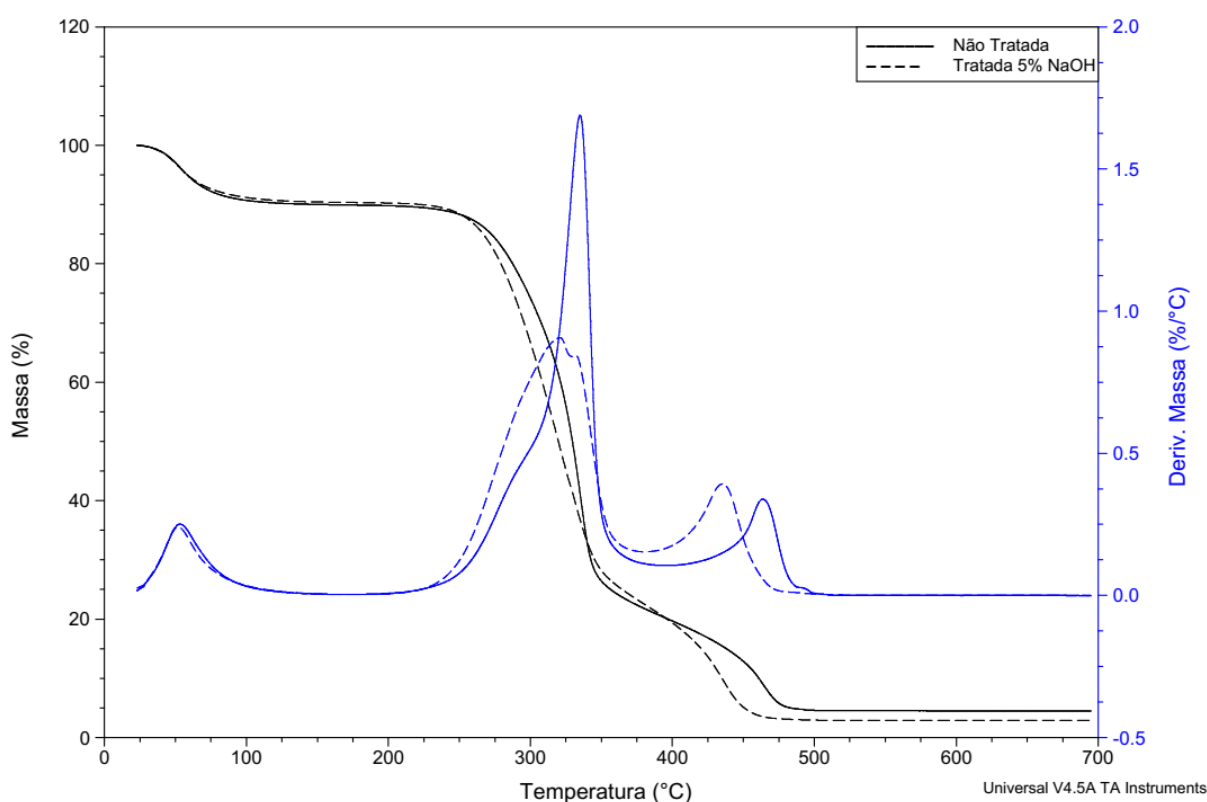
4.5.1 TG/DTG das fibras de curauá

A análise termogravimétrica foi realizada nas fibras de curauá tratadas e não tratadas com o objetivo de avaliar suas temperaturas de degradação e estabilidade térmica. As curvas de TG e DTG da fibra de curauá antes e após o tratamento alcalino são apresentadas na Figura 4.6. Nela, é possível notar um comportamento similar entre as curvas de TG das amostras com e sem tratamento. Porém, a partir das curvas DTG, nota-se a presença de 4 eventos.

O primeiro evento está relacionado à perda de umidade contida na fibra, cerca de 10%, e ocorre até aproximadamente 150°C , tanto para as fibras sem tratamento (FREITAS *et al.* 2023) quanto naquelas tratadas com NaOH (FERREIRA *et al.* 2020). A temperatura inicial de degradação (T_{onset}) ocorre à $271,55^\circ\text{C}$ na fibra sem tratamento alcalino, enquanto na fibra tratada se dá à $261,76^\circ\text{C}$, demonstrando uma discreta redução (3,61%) na estabilidade térmica da fibra tratada. A fraca influência da merceirização com NaOH sob a estabilidade térmica da fibra também foi relatada por Spinacé *et al.* (2009), cuja a temperatura inicial estava por volta de 260°C . Texeira (2019) também evidenciou uma pequena redução na temperatura inicial de

degradação após tratamento alcalino com NaOH na fibra de curauá, indo de 317,29°C para 303,64°C (-4,3%). Estas variações provavelmente estão relacionadas à composição das fibras e ao ataque causado pelo hidróxido de sódio nas ligações lignina-hemicelulose e celulose-hemicelulose. Quanto maior for a concentração da solução alcalina, maior será a intensidade do ataque químico à superfície da fibra e mais sensível esta será à ação da temperatura (SOUSA, 2016).

Figura 4.6 - Curvas de TG e DTG das fibras de curauá tratadas e não tratadas.



Fonte: Autor (2024).

O segundo e o terceiro evento ocorrem de forma concomitante a partir de 200°C e até aproximadamente 375°C e correspondem ao processo de degradação da hemicelulose e da celulose (SISTI *et al.* 2019), respectivamente. A análise termogravimétrica também confirma a diminuição dos teores dessas substâncias na fibra tratada, alinhando-se com os resultados do DRX e FTIR. Notavelmente, durante o tratamento alcalino, as mudanças nos picos de DTG indicam reduções significativas: um decréscimo acentuado no ombro associado à hemicelulose (amorfa), em torno de 300°C, e uma diminuição no pico da celulose (semicristalina), em 340°C.

Já o quarto, e último, evento está relacionado à decomposição da lignina e ocorre no intervalo de 400°C à 500°C, mostrando-se similar tanto nas fibras tratadas e quanto nas não tratadas. Como a fibra tratada é menos estável termicamente, a lignina tem seu pico de decomposição antecipado para 436°C, enquanto na fibra sem tratamento ocorre em 464°C. Esse comportamento também foi observado nos trabalhos de Sisti *et al.* (2019).

Tal fato corrobora com a hipótese de que o tratamento alcalino degrada as partes amorfas da fibra de curauá compostas, principalmente, pela hemicelulose e lignina, expandindo a proporção de celulose que, devido a um rearranjo de superfície, tende a proporcionar maior cristalinidade e, conseqüentemente, resistência mecânica à fibra (BORGES, 2019).

A Tabela 4.10 resume os principais dados obtidos da análise termogravimétrica, tais como a temperatura inicial de degradação (T_{onset}), a temperatura na qual ocorre 50% de perda de massa ($T_{-50\%}$), a temperatura máxima de degradação ($T_{máx}$), a temperatura final do processo (T_{endset}) e o teor residual de massa da amostra.

Tabela 4.10 - Resumo da análise termogravimétrica da fibra de curauá.

Amostras	T_{onset} (°C)	$T_{-50\%}$ (°C)	$T_{máx}$ (°C)	T_{endset} (°C)	Massa residual (%)
Fibra não tratada	271,55	329,7	334,98	500,54	4,54
Fibra tratada	261,76	319,7	321,34	492,08	2,89

Fonte: Autor (2024).

4.5.2 TGA/DTG dos compósitos

A análise termogravimétrica também foi realizada na borracha natural e nos seus compósitos com fibra de curauá para avaliar mudanças na estabilidade térmica em relação à matriz.

As Figuras 4.7a e 4.7b apresentam, respectivamente, as curvas TG e DTG dos compósitos de borracha natural com diferentes cargas de fibra de curauá, tratadas (FT) e não tratadas (FNT).

É possível notar três eventos, o primeiro é uma sutil perda de massa a partir de 60° até 150°C devido à presença de voláteis na superfície do material e de umidade presente nas cargas de fibra vegetal, de natureza hidrofílica (SANTOS, 2015). O segundo ocorre entre 300°C e 450°C, onde se vê um declínio acentuado de massa, provavelmente devido à degradação da holocelulose (hemicelulose e celulose) e hidrocarbonetos. Enquanto o terceiro é uma perda de massa mais suave observada entre 480°C e 550°C, decorrente da decomposição da lignina e de hidrocarbonetos contidos na matriz (SOUZA FILHO, 2015).

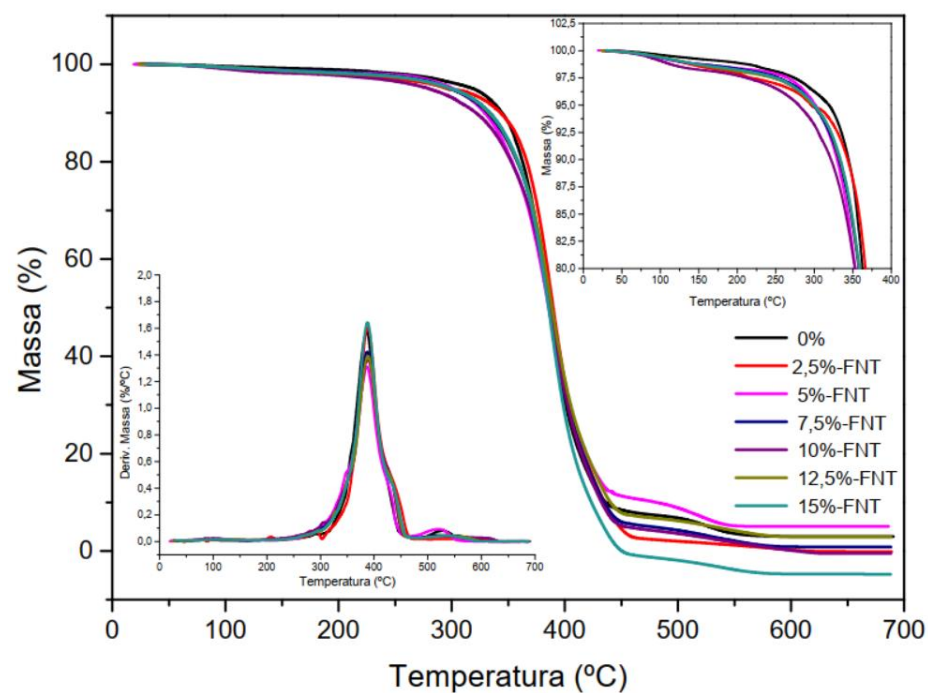
De modo geral, o comportamento termogravimétrico observado nas curvas de TG e DTG se mostrou semelhante entre os compósitos e a borracha natural. Apesar disso, pesquisas anteriores indicaram pequenas reduções na estabilidade térmica de compósitos de borracha reforçados com fibras naturais, principalmente, decorrente do início precoce da degradação da fase dispersa nestes materiais (AZWA *et al.* 2013; MIEDZIANOWSKA *et al.* 2020).

Não obstante, foi possível notar pequenos aumentos na temperatura inicial de degradação (onset) nos compósitos de 2,5%-FNT e 2,5%-FT em relação a borracha natural (0%), de 347,88°C para 354,15°C e 347,08°C que, em ambos os casos, foi menor que 2%. Os demais compósitos (5 a 15%*m*) apresentaram redução moderada na estabilidade térmica, sendo a amostra 5%-FNT a mais desfavorecida, com T_{onset} igual a 325,81°C (<6,3%).

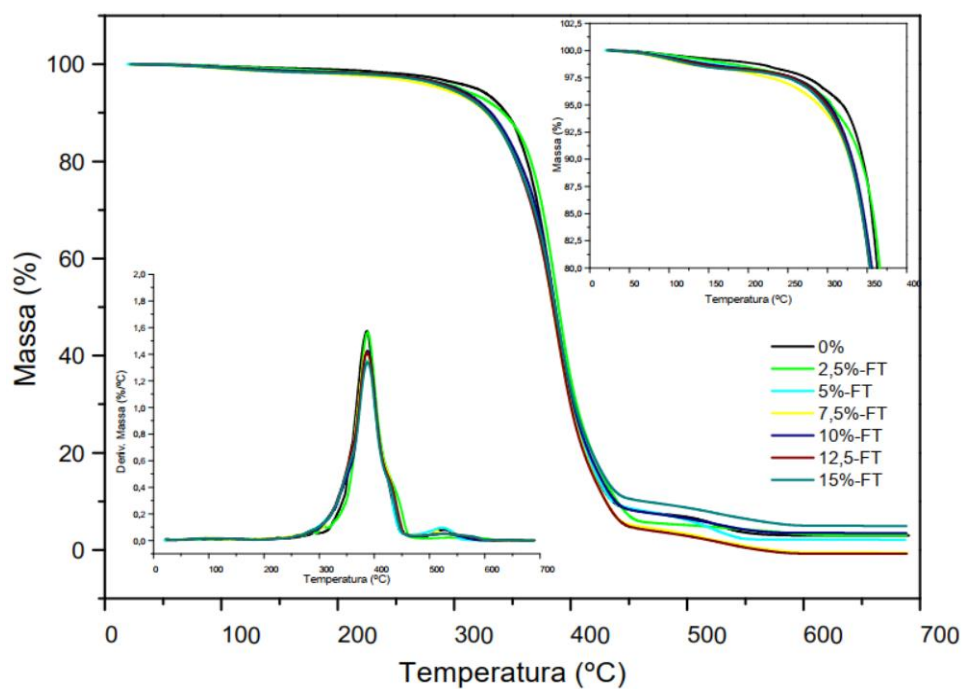
Autores como Menon *et al.* (1996) e Martins *et al.* (2008) acreditam que a temperatura à 50% de decomposição ($T_{-50\%}$) é um outro índice de estabilidade térmica a ser considerado. Neste sentido, $T_{-50\%}$ se concentrou em aproximadamente 388°C para todas as amostras. Por outro lado, considerando-se a temperatura inicial de degradação, pode-se inferir que os compósitos são termicamente estáveis até 300°C, similar ao encontrado por Maslowski *et al.* (2021) para compósitos de borracha natural reforçados com fibra de urtiga (*Urtica dioica* L.).

A redução na estabilidade térmica em eco-compósitos de borracha natural também foi reportada por Karim *et al.* (2016), onde o reforço foi a fibra de kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.). Segundo os autores, a diminuição da estabilidade térmica se deve à baixa temperatura de degradação dos materiais lignocelulósicos, que tipicamente iniciam sua degradação a partir de 200°C.

Figura 4.7 - Curvas de TGA e DTG dos compósitos com (a) fibra não tratada – FNT e com (b) fibras tratadas – FT.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2024).

Já a temperatura final de degradação (endset) mostrou variações mais significativas em relação à borracha, onde se pode observar um aumento de 566,11°C para 646°C (14,3%), para a amostra 7,5%-FNT. A pouca divergência entre as curvas termogravimétricas indicam que o incremento da carga de fibra de curauá exerce pouca influência no comportamento térmico dos compósitos, se comparadas à matriz. Além disso, também não foram observadas discrepâncias expressivas entre os pares de amostras com fibras tratadas (FT) e não tratadas (FNT). Moonart e Urata (2019) igualmente relataram indiferença na estabilidade térmica quanto ao tratamento químico da fibra de cânhamo como reforço na borracha natural. Cabe ressaltar que o trabalho citado avaliou três tratamentos diferentes: pré-tratamento alcalino (NaOH), com permanganato (KMnO₄) e com silano (SiH₄).

Um resumo sobre o comportamento térmico da borracha natural e dos compósitos em função da carga de fibra e do tratamento superficial estão disponíveis para leitura na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Resumo da análise termogravimétrica da borracha natural e dos compósitos.

Amostras	Tonset (°C)	T-50% (°C)	Tmáx (°C)	Tendset (°C)	Massa residual (%)
0% (NR)	347,88	386,31	386,25	566,11	3,06
2,5%-FNT	354,15	389,72	388,37	614,50	0,00
2,5%-FT	348,07	389,76	388,18	614,50	3,09
5,0%-FNT	325,81	386,19	386,56	550,95	5,16
5,0%-FT	328,50	385,01	388,98	550,95	2,27
7,5%-FNT	340,52	387,95	387,04	646,86	0,83
7,5%-FT	340,05	384,86	384,75	583,00	0,00
10%-FNT	327,25	386,78	388,45	603,90	0,00
10%-FT	338,05	387,15	387,51	577,39	3,58
12,5%-FNT	334,46	389,13	388,45	578,10	3,19
12,5%-FT	336,63	385,06	387,28	590,79	0,00
15%-FNT	345,51	385,70	387,69	558,36	0,00
15%-FT	328,43	386,71	387,43	584,44	5,23

Fonte: Autor (2024).

4.6 CONDUTIVIDADE TÉRMICA, CALOR ESPECÍFICO E DIFUSIVIDADE TÉRMICA

4.6.1 Fibra de curauá

Para a fibra de curauá não tratada, foi observada uma condutividade térmica (k) de $0,0559 \pm 0,0001$ W/m-K, calor específico (c) de $331,45 \pm 1,31$ J/kg-K e difusividade térmica (α) de $1,69 \times 10^{-7} \pm 0,45 \times 10^{-9}$ m²/s. O valor de condutividade térmica encontrado no presente trabalho é superior ao determinado por Lopes (2011), que estabeleceu k entre 0,0132 e 0,0252 W/m-K.

Tal discrepância pode ter ocorrido devido a fatores como a origem (Estado do Pará), cultivo, variedade da espécie e massa específica da fibra, sendo os três últimos não conhecidos no trabalho de Lopes (2011). Além disso, o autor utilizou técnicas fotoacústica e fototérmica para determinar a difusividade térmica (α) e a capacidade calorífica específica (ρc_p). Com o produto destas grandezas foi calculada a condutividade térmica. Como visto na Tabela 4.1, a massa específica da fibra de curauá pode variar de 0,48 a 1,43 g/cm³ (quase 3 vezes) e, como consequência, a condutividade térmica. Portanto, a densidade pode ser a causa raiz desta divergência, contudo, não é possível ratificar esta hipótese uma vez que tal propriedade não foi investigada no trabalho de Lopes (2011).

Ainda há poucas referências para comparar estes resultados, no entanto, a Tabela 4.12 traz um apanhado geral sobre a condutividade térmica de diversos materiais lignocelulósicos e alguns materiais isolantes comerciais. Nela é possível observar que a condutividade térmica encontrada para a fibra de curauá no presente trabalho é próxima dos valores estabelecidos para diversos materiais vegetais, os quais variam entre 0,035 e 0,091 W/m-K. Este resultado também converge para o valor típico de condutividade térmica (0,055 W/m-K) encontrado para fibras lignocelulósicas, conforme já citado por Sekino (2016), apresentando coerência com a literatura.

Embora a condutividade térmica aferida da fibra de curauá seja superior aos valores apresentados na Tabela 4.12, em comparação aos materiais isolantes comerciais, está relativamente próxima da lã de vidro e da lã de rocha, ambas muito empregadas em aplicações termoacústicas.

Tabela 4.12 - Condutividade térmica da fibra de curauá e de outros materiais.

Materiais	Condutividade térmica (W/m-K)
de origem vegetal	
Fibra de Curauá (Autor, 2024)	0,0559
Fibra de Curauá Tratada (Autor, 2024)	0,0595
Palha de trigo	0,041 - 0,067
Casca de arroz	0,046 - 0,057
Fibra de coco	0,05
Bagaço de cana de açúcar	0,046 - 0,068
Fibra de tamareira	0,041
Talo de algodão	0,0585 - 0,0815
Palha de dendê	0,055 - 0,091
Fibra de abacaxi	0,035 - 0,042
Isolantes convencionais	
Poliestireno expansível (EPS)	0,03 - 0,033
Poliestireno extrudado (XPS)	0,029 - 0,039
Espuma plástica ou polimérica	0,03
Lã de vidro	0,04
Lã de rocha	0,045

Fonte: Dikmen e Azkan (2016) e Asdrubali et al. (2015).

Asdrubali et al. (2015) classificam os materiais isolantes de acordo com a condutividade térmica (k), em três faixas: de baixo desempenho, quando $k > 0,08$ W/mK; intermediário, quando $0,05 \leq k \leq 0,08$; e de alto desempenho, quando $k < 0,05$ W/mK. Neste sentido, a fibra de curauá estaria oscilando entre materiais isolantes “intermediários” e de “alto desempenho”. Porém, uma “manta térmica” fabricada exclusivamente com fibras de curauá seria tecnicamente inviável, uma vez que a produção e o cultivo deste vegetal são atualmente inexpressivos nos estados do Amazonas e Pará. Por esta razão, pode ser mais interessante empregar a fibra como reforço em conjunto com outros materiais mais abundantes ou como complemento de carga de outras fibras sintéticas.

Após o tratamento alcalino com hidróxido de sódio, a fibra de curauá apresentou valores diferentes para k , c e α , respectivamente, $0,0595 \pm 0,0002$ W/m-K, 376 ± 3 J/kg-K e $1,58 \times 10^{-7} \pm 0,63 \times 10^{-9}$ m²/s, conforme disposto na tabela 4.12.

É possível notar um aumento na condutividade térmica e calor específico, respectivamente, de 6,3% e 10,1%, nas fibras tratadas em relação às não tratadas. A

variação vista na condutividade térmica provavelmente se deve ao aumento do grau de cristalinidade (19,2%) observado na fibra de curauá posteriormente à merceirização, pois uma porção maior de fase cristalina, que é mais organizada e conduz calor com mais eficiência do que a fase amorfa, pode induzir um incremento na condutividade de um material (GUTIÉRREZ *et al.* 2014). O aumento do calor específico da fibra tratada está relacionado à variação da condutividade térmica, pois são diretamente proporcionais. Por outro lado, percebeu-se uma redução de aproximadamente 6,5% na difusividade térmica. Tal diminuição pode estar associada à densificação da fibra de curauá após o tratamento alcalino, pois condutividade térmica e densidade são inversamente proporcionais.

Adicionalmente, utilizou-se do teste Tukey, ao nível de 5% probabilidade, para verificar se as médias obtidas para k , c e α diferem estatisticamente entre os pares de fibras tratadas e não tratadas. A Tabela 4.13 exibe os agrupamentos das médias, onde letras diferentes indicam que são estatisticamente distintas. A análise aponta que, embora com variações mínimas, o tratamento alcalino promoveu alterações significativas nas propriedades térmicas da fibra de curauá.

Tabela 4.13- Propriedades térmicas da fibra de curauá com agrupamentos do teste Tukey.

Fibra	k (W/m-K)		c (J/kg-K)		α (m ² /s)	
	Média	DesvPad	Média	DesvPad	Média	DesvPad
Não tratada	0,0559 (A)	0,0001	341,45 (A)	1,31	$1,69 \times 10^{-7}$ (A)	$0,45 \times 10^{-7}$
Tratada	0,0595 (B)	0,0002	376 (B)	3	$1,58 \times 10^{-7}$ (B)	$0,63 \times 10^{-7}$
Dif. Relativa	6,3%	-	10,1%		-6,5%	-

Fonte: Autor (2024).

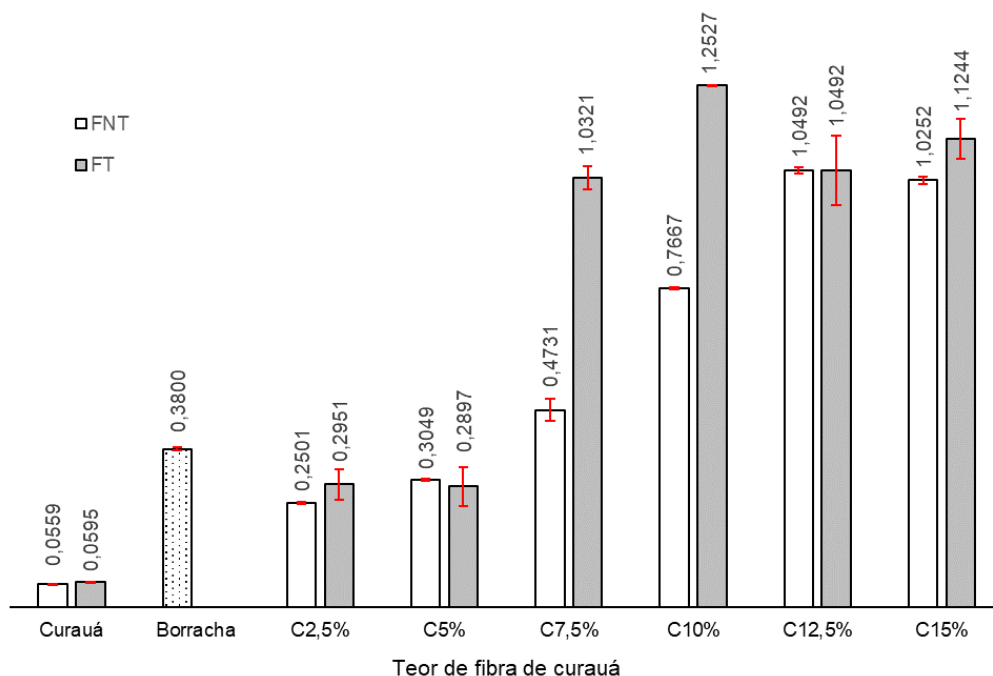
4.6.2 Compósitos

As condutividades térmicas dos compósitos reforçados com teores em massa de fibras de curauá não tratadas (FNT) variaram de $0,2501 \pm 0,0017$ W/m-K a $1,0492 \pm 0,0072$ W/m-K, enquanto os reforçados com fibra tratada variaram de $0,2951 \pm 0,037$ W/m-K a $1,2527 \pm 0,0027$ W/m-K, conforme mostrado na Figura 4.8. Para efeito de comparação a condutividade térmica da borracha natural (NR) também foi determinada e seu valor é $0,380 \pm 0,004$ W/m-K.

Tanto nos compósitos com fibras tratadas e não tratadas foi observada uma discreta redução em relação na condutividade térmica da matriz com o incremento do teor de fibra, representando decréscimos de 34,18%, 22,34%, 19,77% e 23,76%, respectivamente, para os compósitos e C2,5-FNT, C2,5-FT, C5-FNT e C5-FT. O compósito de borracha natural reforçada com 2,5% de massa de fibra de curauá não tratada (C2,5-FNT) apresentou a menor condutividade térmica dentre as misturas.

Nas amostras com fibras não tratadas, observa-se um incremento não-linear acentuado a partir de 5% de teor de fibra, atingindo seu valor máximo em C12,5-FNT (1,0492 W/m-K), o que corresponde a 2,76 vezes o valor encontrado para a matriz. A partir daí, o gráfico da Figura 4.8 mostra estabilidade na condutividade térmica dos demais compósitos. Um comportamento similar é visto na condutividade térmica dos compósitos de fibras tratadas, no entanto, os valores mínimo e máximo corresponderam às amostras C5-FT e C10-FT, respectivamente, 0,2897 W/m-K e 1,2527 W/m-K. Este último equivale a 3,29 vezes a condutividade térmica da borracha natural.

Figura 4.8 - Condutividade térmica (W/m-K) das amostras de curauá, borracha e compósitos com fibras tratadas (FT) e não tratadas (FNT).



Fonte: Autor (2024).

Como a variação da densidade aparente dos compósitos devido à carga de fibra se mostrou pouco significativa (Fig. 4.1), pode-se inferir que há pouca ou nenhuma influência daquela propriedade na condutividade térmica dos compósitos. Em contrapartida, a fase cristalina da fibra de curauá pode ter um papel importante nesta condutividade térmica, pois tais estruturas podem facilitar a condução e difusão térmica nos compósitos (SAFFIAN *et al.*, 2020). Isso pode ser evidenciado pelo fato de que a maioria dos compósitos com fibra tratada de curauá exibem condutividade térmica superior aos de não tratadas. Uma consequência do tratamento alcalino, prevista na literatura, é a melhora da adesão da fibra à matriz, o que implica no aumento de área de contato, que por sua vez, pode maximizar a condutividade térmica (INDICULA *et al.*, 2006; SURYAWAN *et al.*, 2020).

Outro fator a ser levado em consideração, mas que não foi abordado na presente pesquisa, é a possível anisotropicidade da fibra de curauá. Segundo Behzad e Sain (2007), algumas fibras vegetais que exibem esta característica podem ter valores muito distintos para condutividade térmica, os quais na direção do comprimento da fibra (longitudinal) costumam ser muito maiores do que na direção radial (transversal), pois o sentido do arranjo cristalino destas fibras vegetais se dá longitudinalmente.

O presente comportamento da condutividade térmica dos compósitos de fibra de curauá e borracha natural é análogo ao observado por Liu *et al.* (2014), os quais avaliaram esta propriedade em compósitos de fibra de abacá (*Musa textilis*) e resina epóxi. Os autores relataram que a condutividade térmica longitudinal da fibra de abacá pode chegar a 4,2 vezes a transversal. Isso significa que o alinhamento das fibras pode ser determinante para a sua aplicação. Naquele estudo, compósitos com fibras abacá alinhadas perpendicularmente ao fluxo de calor (transversal) apresentaram redução na condutividade térmica em função da carga de reforço, enquanto aqueles com fibras paralelas ao fluxo (longitudinal) exibiram aumento na condutividade térmica. A constatação desta pesquisa é que materiais com fibras orientadas transversalmente (baixo K) tendem a ser aplicados como “compostos isolantes” enquanto aqueles com orientação longitudinal (alto K) tendem a “compostos condutores”. Mesmo materiais como fibras orientadas aleatoriamente podem apresentar um alinhamento preferencial do reforço que pode levar à minimização ou

maximização da condutividade térmica em função da quantidade de fibras (BEHZAD e SAIN, 2007).

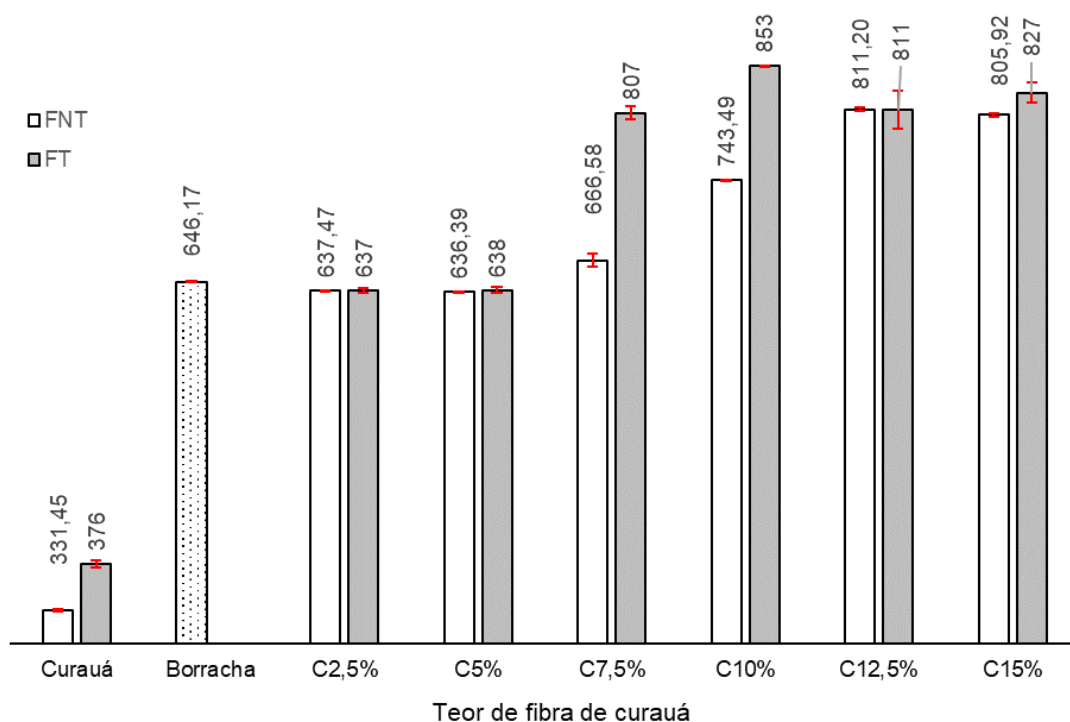
Sob esta perspectiva, é possível que tenha ocorrido o mesmo fenômeno nos compósitos aqui estudados, considerando-se a grande discrepância na condutividade térmica entre as amostras com menos carga de fibra (2,5% e 5%) e as demais, podendo atingir uma razão $K_{\max}/K_{\min}$ de 4,2 e 4,3, respectivamente, para os compósitos com fibras não tratadas (FNT) e tratadas (FT), merecendo maiores estudos.

O teste Tukey também foi aplicado às médias de condutividade para verificar distinções estatísticas entre si ao nível de 5% de probabilidade, conforme visto na Tabela 4.13. A partir dela é possível inferir que todas as médias relativas aos compósitos com fibra sem tratamento alcalino apresentam diferenças estatísticas, o que significa que de fato o teor de fibra tem forte influência na condutividade térmica destes materiais. Não obstante, os compósitos com fibras mercerizadas apresentam alguns pares estatisticamente semelhantes (NR/C2,5-FT; C2,5-FT/C5-FT; C7,5-FT/C12,5-FT e C12,5-FT/C15-FT). Isso sugere que condutividade térmica é fortemente influenciada pela carga de reforço a partir de 7,5% de teor de fibra.

A comparação entre os pares de compósitos com fibras tratadas e não tratadas sugere que o tratamento alcalino é mais influente nos compósitos com teores mais elevados de fibra (>5%), com exceção do teor de 12,5% de carga, que possui diferença significativa entre os pares FT/FNT. Especificamente a amostra C12,5-FT apresentou uma variação acentuada em comparação aos demais compósitos implicando neste resultado.

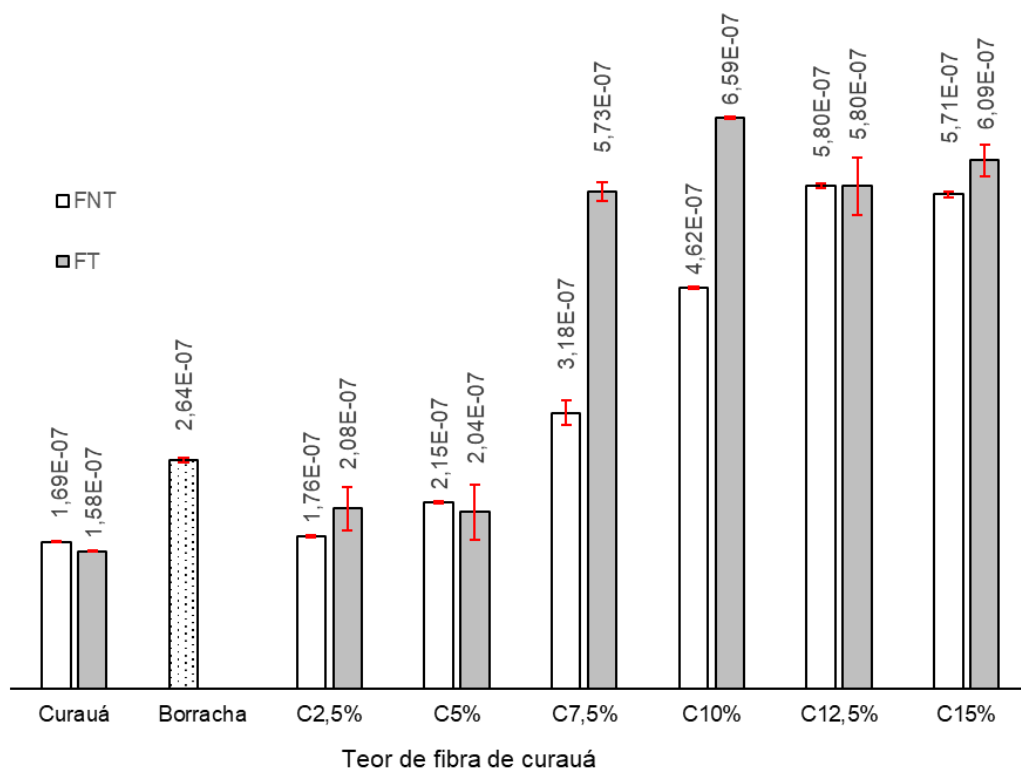
A Figura 4.9 exibe os valores encontrados para os calores específicos dos compósitos com diversos teores de fibra de curauá não tratada (FNT), variando de 637,47 J/kg-K a 811,2 J/kg-K, enquanto que nos compósitos com fibra tratada (FT) variações entre 637 J/kg-K e 853 J/kg-K. Já as difusividades térmicas, podem ser vistas na Figura 4.10, as quais nos compósitos com fibras não tratadas e tratadas variaram, respectivamente, de $1,76 \times 10^{-7}$ m²/s a $5,8 \times 10^{-7}$ m²/s e de $2,04 \times 10^{-7}$ m²/s a $6,59 \times 10^{-7}$ m²/s.

Figura 4.9 - Calor específico (J/kg-K) das amostras de curauá, borracha e compósitos com fibras tratadas (FT) e não tratadas (FNT).



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.10 - Difusividade térmica (m^2/s) das amostras de curauá, borracha e compósitos com fibras tratadas (FT) e não tratadas (FNT).



Fonte: Autor (2024).

Tanto o calor específico quanto a difusividade térmica acompanharam a tendência apresentada pela condutividade térmica dos compósitos de borracha natural e fibra de curauá, ou seja, valores menores em relação à matriz para concentrações de 2,5% e 5%, conforme visto nas Figuras 4.9 e 4.10. Isso se deve a relação diretamente proporcional destas propriedades.

A partir do teste Tukey para as médias de calor específico apresentadas na Tabela 4.14, é possível inferir que esta propriedade só tem influência significativa a partir de 7,5% de teor de fibra, mostrando estabilidade a partir de 12,5%, tanto nos compósitos com tratamento como nos sem tratamento. No que tange aos pares tratados e não tratados, observa-se uma influência significativa da merceirização nos compósitos com cargas de fibra superiores à 5%, excetuando o par com 12,5%, semelhante ao ocorrido na condutividade térmica.

Já difusividade térmica mostra influência significativa do teor de fibra em todos os compósitos com fibra não tratadas, com médias estatisticamente distintas até 10% de carga, atuando com menor relevância nos compósitos com 12,5% e 15% (semelhantes). Referente ao peso do tratamento químico, repete-se o observado na condutividade térmica e calor específico.

Tabela 4.14 - Propriedades térmicas dos compósitos com agrupamentos do teste Tukey.

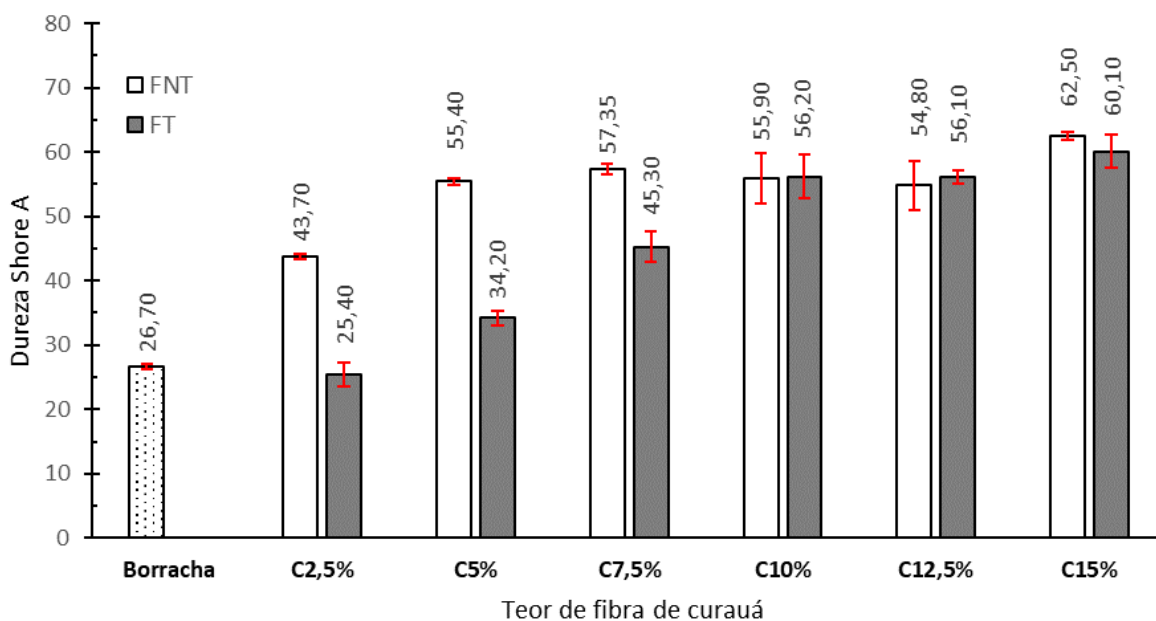
Amostras	Condutividade térmica (W/m-K)				Calor específico (J/kg-K)				Difusividade térmica (m²/s)			
	Média	DesvPad	Agrupamento		Média	DesvPad	Agrupamento		Média	DesvPad	Agrupamento	
10-FT	1,2527	0,0024	A		852,55	0,45	A		6,60E-07	9,00E-10	A	
15-FT	1,1244	0,0476	B		827,08	9,82	B		6,10E-07	1,85E-08	B	
12,5-FNT	1,0492	0,0072		C	811,20	1,57		C	5,80E-07	2,80E-09	B C	
12,5-FT	1,0492	0,0830		C	810,80	18,27		C	5,80E-07	3,30E-08	B C	
7,5-FT	1,0321	0,0279		C	807,40	6,23		C	5,70E-07	1,12E-08		C
15-FNT	1,0252	0,0081		C	805,92	1,79		C	5,70E-07	3,20E-09		C
10-FNT	0,7667	0,0022		D	743,49	0,57		D	4,60E-07	9,00E-10		D
7,5-FNT	0,4731	0,0262		E	666,58	6,53		E	3,20E-07	1,44E-08		E
NR	0,3800	0,0043		F	646,17	0,78		F	2,60E-07	2,60E-09		F
5-FNT	0,3049	0,0021		G	636,39	0,13		F	2,10E-07	1,30E-09		G
2,5-FT	0,2951	0,0370		G	637,28	2,29		F	2,10E-07	2,53E-08		G H
5-FT	0,2897	0,0462		G	637,97	3,02		F	2,00E-07	3,16E-08		G H
2,5-FNT	0,2501	0,0017		G	637,47	0,22		F	1,80E-07	1,10E-09		H

Fonte: Autor (2024).

4.7 DUREZA SHORE A

Ensaio de dureza foram realizados nas amostras de borracha natural e nos seus compósitos com fibra de curauá, conforme visto na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Dureza média dos compósitos com fibra de curauá tratada e não tratada em escala Shore A.



Fonte: Autor (2024).

Com base na Figura 4.11, observa-se que a dureza da matriz foi avaliada em 26,7 ShA e está compreendida na faixa de 25 a 90 ShA, típica da borracha natural, conforme indicado por Souza Filho (2015).

Os compósitos produzidos com fibras sem tratamento alcalino apresentaram durezas médias variando entre 43,7 ShA e 62,5 ShA, enquanto os fabricados a partir de fibras tratadas variaram de 25,4 ShA até 60,1 ShA. As maiores durezas foram registradas nos compósitos C15%-FNT e C15%-FT, respectivamente, 62,5 ShA e 60,1 ShA, correspondendo a um aumento de 134% e 125% em relação à dureza da borracha pura.

Ainda sob a ótica da Figura 4.11, é possível notar que todos os compósitos apresentaram dureza mais elevada que a matriz (exceto C2,5%-FT, -4,87%) e que

esta propriedade possui uma tendência de aumento à medida que a carga de fibra natural é incrementada, tanto em amostras com fibras tratadas quanto sem tratamento.

Tal comportamento também foi observado por outros pesquisadores (BEMERW *et al.*, 2021; SIVASUBRAMANIAN *et al.*, 2020). Segundo Ubi *et al.* (2022), as fibras naturais restringem a mobilidade da matriz, o que explica o aumento da dureza dos compósitos, conforme a carga de fibra é incrementada.

Embora o carregamento de fibra aumente a dureza, tanto com fibras tratadas quanto não tratadas, percebe-se que a taxa de incremento é mais suave nos compósitos com fibras mercerizadas. Além disso, as amostras com teores de 2,5% a 7,5% de fibras tratadas apresentam valores de dureza inferiores às aquelas com fibras sem tratamento alcalino. O tratamento alcalino pode ter diminuído a rigidez e resistência mecânica da fibra (GOMES *et al.* 2004), devido à redução de estruturas como lignina e hemicelulose, conforme visto no ensaio de FTIR (Fig. 4.3), impactando na dureza dos compósitos, similar ao reportado por Pantamanatsopa *et al.* (2014).

A Tabela 4.15 expõe o resultado do teste de Tukey considerando 5% de probabilidade, onde médias de dureza que não compartilham uma letra (agrupamento) são estatisticamente diferentes. Tendo em vista os compósitos com fibra não tratada, é possível inferir que o carregamento de fibra produz efeitos significativos na dureza a partir do teor de 2,5%. Entretanto, de 5% em diante a dureza aparenta estabilização, indicando pouca influência do teor de fibra. Já nos compósitos com fibras tratadas, os resultados sugerem que o carregamento de fibra só começa a afetar a dureza a partir do teor 5%, pois C2,5%-FT e NR são estatisticamente semelhantes. Diferentemente dos compósitos FNT, a estabilização da dureza é observada a partir do teor de 10%.

Referente ao tratamento alcalino, o teste de Tukey sugere que a merceirização tem maior efeito na dureza nos compósitos com menos teor de fibra, pois os pares tratado e não tratado (FT/FNT) são distintos de 2,5% a 7,5%, enquanto os demais pares (10% a 15%) são estatisticamente semelhantes, indicando pouca influência do tratamento químico.

Tabela 4.15 - Agrupamento das médias de dureza Shore A das amostras usando o método de Tukey no intervalo de 95% de confiança.

Amostras	Média	Desvpad	Agrupamento				
15-FNT	62,5	0,71	A				
15-FT	60,1	2,63	A	B			
7,5-FNT	58,8	0,84	A	B	C		
10-FT	56,2	3,42		B	C		
12,5-FT	56,1	1,08		B	C		
10-FNT	55,9	3,93		B	C		
5-FNT	55,4	0,55		B	C		
12,5-FNT	54,8	3,75			C		
7,5-FT	45,3	2,36				D	
2,5-FNT	43,7	0,45				D	
5-FT	34,2	1,15					E
NR	26,7	0,45					F
2,5-FT	25,4	1,85					F

Fonte: Autor (2024).

4.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio de resistência à tração foi realizado na borracha natural e seus compósitos, com diferentes teores de fibras de curauá tratadas e não tratadas, com o objetivo de estabelecer as tensões e deformações máximas que os materiais podem suportar.

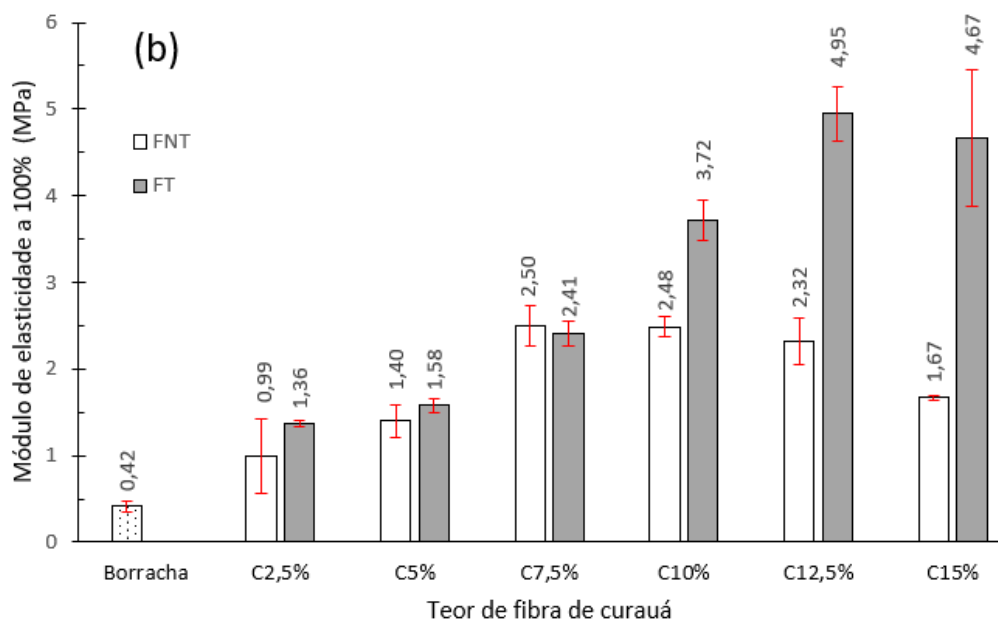
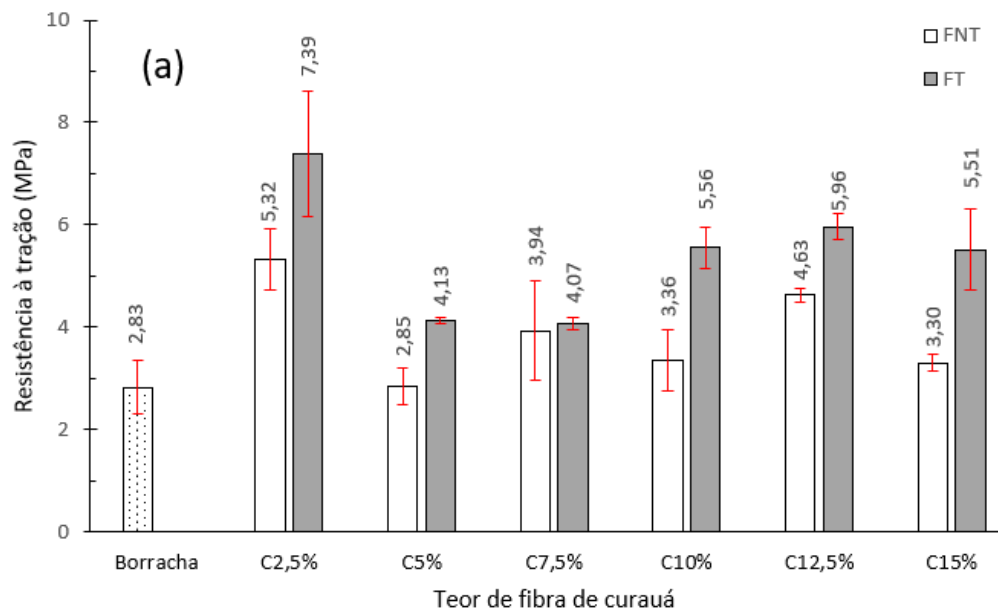
As Figuras 4.12a, b e c mostram, respectivamente, o limite de resistência à tração, módulo de elasticidade em 100% de alongamento e alongamento na ruptura dos compósitos, onde se é possível observar o comportamento destas propriedades em função do carregamento de fibra e do tratamento químico.

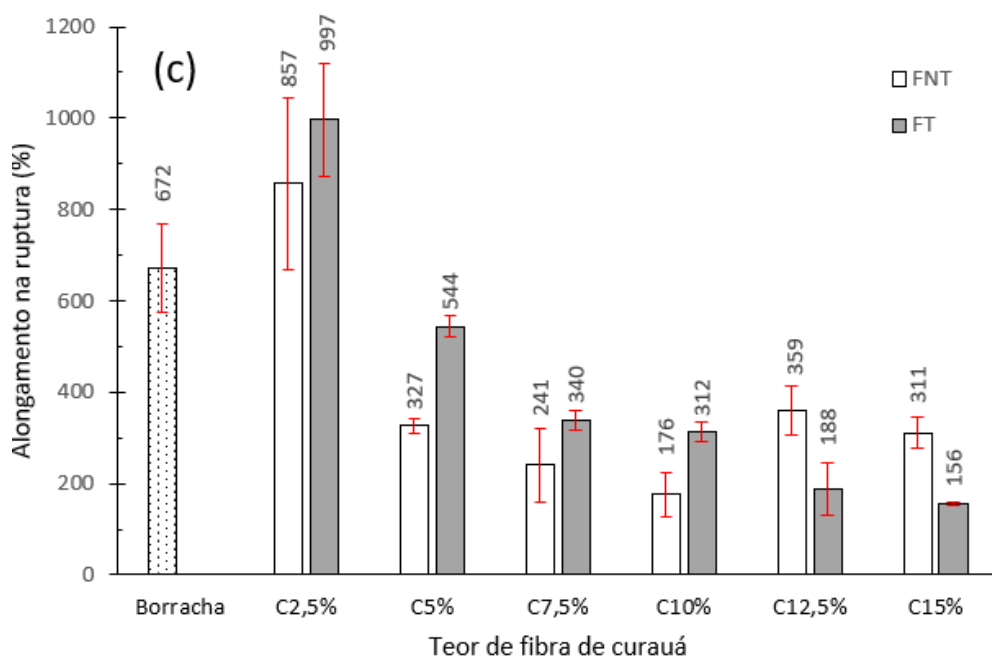
Os ensaios indicam que a borracha natural, utilizada na presente pesquisa, possui um limite de resistência à tração de 2,83 MPa, em termos médios (Fig. 4.12a). A resistência máxima à tração dos compósitos com fibras não tratadas variou entre 2,85 MPa e 5,32 MPa, enquanto os produzidos com fibras mercerizadas variou entre 4,07 MPa e 7,39 MPa.

Os valores mais elevados de resistência à tração foram observados nos compósitos com 2,5% de fibra não tratada (C2,5%-FNT) e tratada (C2,5%-FT), respectivamente, 5,32 MPa e 7,39 MPa. Tais índices correspondem a aumentos

aproximados de 88% e 161% referentes à borracha pura. O incremento acentuado da resistência à tração nos compósitos com teores de 2,5% de fibra seguido de redução brusca (C5%) é atípico ao comportamento observado por outros pesquisadores, mas provavelmente se deve a uma melhor dispersão das fibras de reforço na matriz.

Figura 4.12 - (a) Limite de resistência à tração, (b) módulo de elasticidade a 100% de alongamento e (c) alongamento na ruptura dos compósitos de borracha natural e fibra de curauá tratada e não tratada.





Fonte: Autor (2024).

A partir de 5% de carga, observa-se uma queda na resistência a tração, onde os compósitos C5%-FNT e C5%-FT atingiram 2,85 MPa e 4,13 MPa, respectivamente. Na sequência há uma tendência de aumento na resistência com incremento de fibra até os compósitos C12,5%, onde novamente se registra redução. Isso indica que há um limite de carga de fibra capaz de produzir efeitos positivos na resistência à tração, correspondente à 12,5% de fibra de curauá em massa. Comportamento idêntico foi observado por Ubi *et al.* (2022), que em sua pesquisa com compósitos de borracha natural e casca de arroz em pó, obteve um limite de carga de reforço de 40,6%.

É evidente que o do tratamento alcalino sob a fibra de curauá surtiu efeito nas propriedades mecânicas dos compósitos, pois tanto a resistência a tração quanto o módulo de Young aumentam com o teor de fibra, em contraste ao alongamento, devido principalmente a uma melhor aderência superficial entre a matriz e as fibras mercerizadas (PAIVA, *et al.*, 2019).

A tendência de aumento na rigidez dos compósitos devido ao reforço também foi evidenciada, conforme a figura 4.12b. Tal aumento se deve à elevada rigidez da fibra de curauá (11 GPa, Tab. 2.1). O módulo de elasticidade dos compósitos de borracha tende a aumentar desde que a rigidez do reforço seja superior à da matriz

polimérica. À medida que reforço é introduzido na matriz, a elasticidade das cadeias de borracha decresce, resultando em materiais mais rígidos (SAREENA *et al.*, 2012b).

O módulo de elasticidade em 100% de alongamento registrou valores máximos de 2,5 MPa (C7,5%-FNT) e 4,95 MPa (C12,5%-FT). Incrementos adicionais na carga de fibra levam à deterioração da rigidez, tal qual ocorrido na resistência à tração, demonstrando menor interação entre as fibras e a matriz. Isso pode estar relacionado às aglomerações da fase reforço, aumentando a interação carga-carga e gerando concentrações de tensões (SAREENA *et al.*, 2012b; MASŁOWSKI *et al.*, 2018).

Era de se esperar que o alongamento na ruptura tendesse a diminuir com incremento do teor de fibras (Fig. 4.12c), pois o aumento de carga reduz a fase deformável da borracha, acarretando no enrijecimento (aumento do módulo) e endurecimento dos compósitos. De acordo com Sareena *et al.*, (2012a), isso deteriora a resiliência e resistência, culminando na redução do alongamento na ruptura.

Na Figura 4.12c, percebe-se que os compósitos C12,5%-FNT e C15%-FNT apresentam alongamentos maiores (359% e 311%, respectivamente) que a amostra C7,5%-FNT (176%), isso contradiz a tendência de redução observada nos compósitos com fibra tratada. Essa disparidade provavelmente decorre da diminuição da rigidez desses compósitos, conforme discutido anteriormente.

Adicionalmente, realizou-se o teste de Tukey com 5% de significância nas propriedades mecânicas exibidas na Tabela 4.16, novamente, considerando-se que amostras com mesma letra de agrupamento são estatisticamente semelhantes. Os resultados do teste sugerem que as propriedades mecânicas são significativamente afetadas tanto pelo teor de reforço quanto pelo tratamento alcalino das fibras, uma vez que a maioria dos compósitos apresentam médias distintas estatisticamente da borracha natural. Por outro lado, o tratamento com hidróxido de sódio tem influência maior nos compósitos com alto teor de fibra (de 10 a 15%), pois os pares de amostras com fibras tratadas e não tratadas de baixa carga (de 2,5 a 7,5%) tendem a não apresentar diferença estatística entre si.

Tabela 4.16 - Agrupamento das médias resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura das amostras usando o método de Tukey no intervalo de 95% de confiança.

Resistência à tração (MPa)				Módulo de elasticidade a 100% (MPa)				Alongamento na ruptura (%)			
Fator	Média	DesvPad	Agrupamento	Fator	Média	DesvPad	Agrupamento	Fator	Média	DesvPad	Agrupamento
2,5-FT	7,39	1,23	A	12,5-FT	4,95	0,31	A	2,5-FT	997	124	A
12,5-FT	5,96	0,26	A B	15-FT	4,67	0,79	A	2,5-FNT	857	188	A B
10-FT	5,56	0,40	B C	10-FT	3,72	0,23	B	NR	672	96	B C
15-FT	5,51	0,79	B C	7,5-FNT	2,50	0,24	C	5-FT	544	23	C D
2,5-FNT	5,32	0,60	B C	10-FNT	2,48	0,12	C	12,5-FNT	359	54	D E
12,5-FNT	4,63	0,13	B C D	7,5-FT	2,41	0,15	C D	7,5-FT	340	22	D E
5-FT	4,13	0,05	C D E	12,5-FNT	2,32	0,27	C D	5-FNT	327	17	D E
7,5-FT	4,07	0,12	C D E	15-FNT	1,67	0,03	C D E	10-FT	312	21	E
7,5-FNT	3,94	0,96	C D E	5-FT	1,58	0,08	D E	15-FNT	311	33	E
10-FNT	3,36	0,59	D E	5-FNT	1,41	0,19	E	7,5-FNT	241	81	E
15-FNT	3,30	0,16	D E	2,5-FT	1,36	0,04	E	12,5-FT	188	57	E
5-FNT	2,85	0,37	E	2,5-FNT	0,99	0,43	E F	10-FNT	176	49	E
NR	2,83	0,53	E	NR	0,42	0,06	F	15-FT	156	3	E

Fonte: Autor (2024).

4.9 MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA

4.9.1 Morfologia das fibras de curauá

A microscopia de varredura eletrônica (MEV) foi utilizada para estudar a morfologia das fibras de curauá, tratadas e não tratadas, com o objetivo de verificar possíveis modificações na superfície da fibra promovida pelo tratamento químico com NaOH.

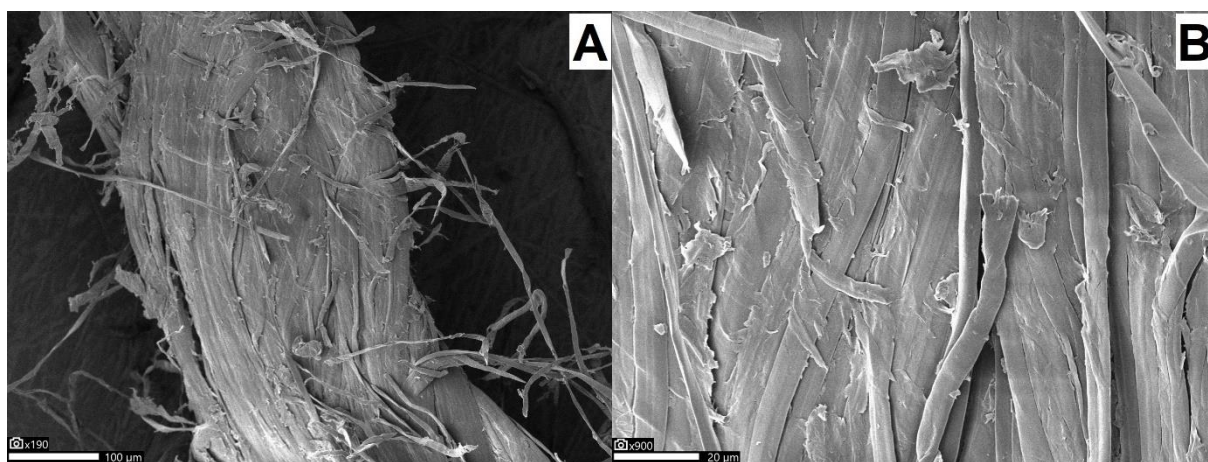
As Figuras 4.13a e 4.13b mostram a superfície da fibra de curauá aumentada em 190x e 900x, respectivamente. Pôde-se observar que a superfície da fibra de curauá não-tratada se mostra relativamente limpa e lisa. Há evidência do desfibramento, ocasionado pelo processo de moagem, pois algumas microfibrilas estão expostas (PINTO, 2019). Comparando a Figura 4.13b com a microscopia das fibras *in natura* do trabalho de Libera Jr (2019b), também é possível notar a presença de ceras e graxas, detectadas no FTIR, cuja função é proteger e coibir a absorção de água do meio externo à fibra.

Por sua vez, as Figuras 4.14a e 4.14b apresentam a superfície da fibra de curauá após o tratamento alcalino ampliada em 200x e 900x, respectivamente.

Aplicação do tratamento químico à base de solução aquosa de hidróxido de sódio reduziu os teores de hemicelulose e lignina, responsáveis pela coesão das

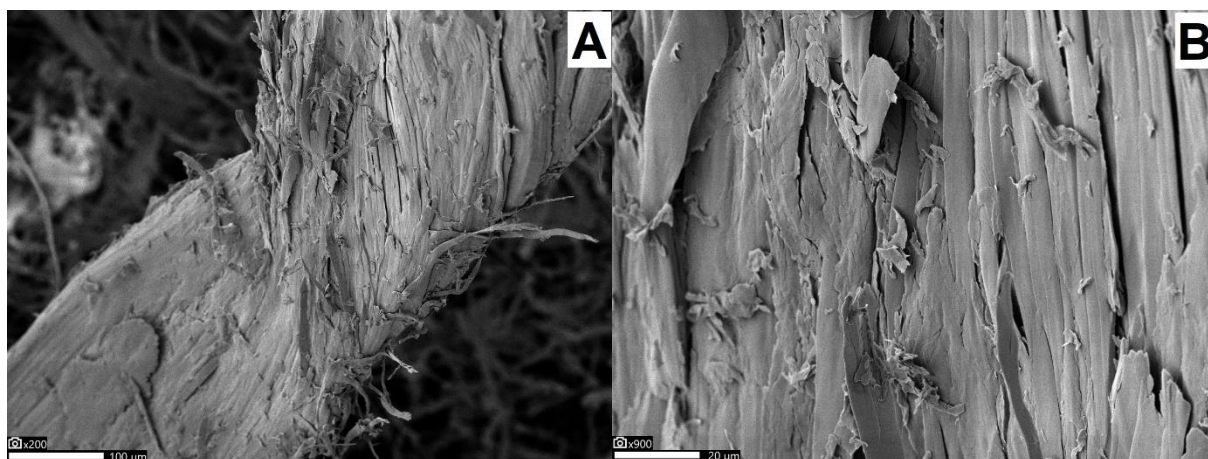
microfibrilas na macrofibra, promovendo uma maior desfibrilação, além da remoção de graxas e ceras, estando de acordo com os espectros do infravermelho da fibra tratada. Ao se comparar as Figuras 4.13b e 4.14b, nota-se que o ataque químico do NaOH não foi expressivo, pois ainda há muitas regiões da fibra com paredes íntegras. Isso se deve à baixa concentração de NaOH utilizada no tratamento alcalino (5%*m*) e ao tempo de imersão (2 h). Todavia, cabe ressaltar que ataques químicos com altas concentrações de NaOH e intervalos de banho prolongados podem degradar demasiadamente a fibra, precarizando as suas propriedades mecânicas e de seus compósitos (SENA NETO *et al.*, 2014).

Figura 4.13 - MEV das fibras de curauá não tratadas ampliadas em 190x (a) e 900x (b).



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.14 - MEV das fibras de curauá tratadas com NaOH ampliadas em 200x (a) e 900x (b).

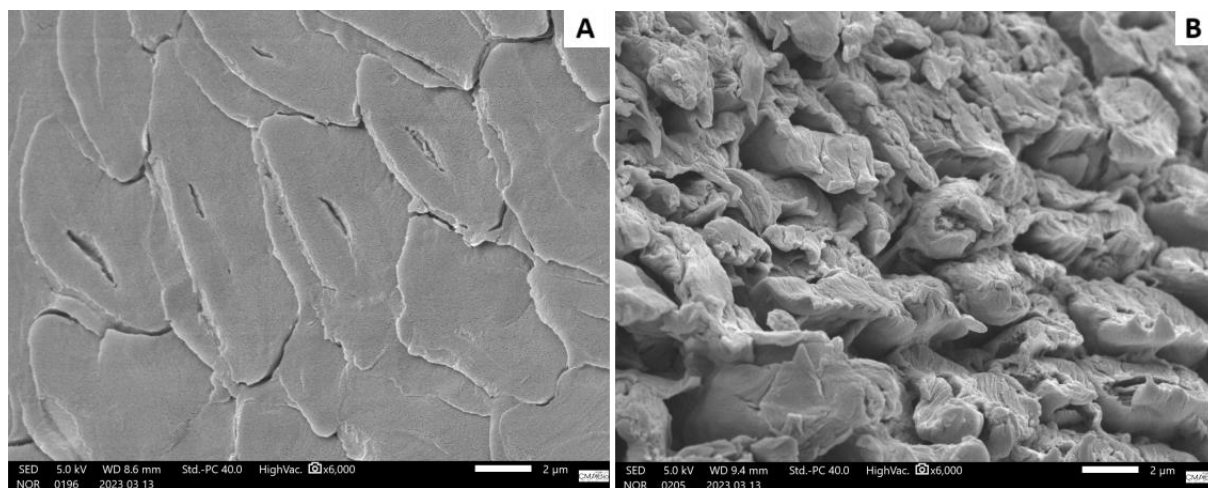


Fonte: Autor (2024).

A evidência de desfibrilação, por sua vez, proporciona o aumento da rugosidade superficial e da área de contato da fibra, conforme observado por Lopattananon *et al.* (2006) e Beltrami (2014). Este aumento da área de contato é responsável pela melhor adesão do reforço à matriz, levando a uma resposta positiva nas propriedades mecânicas, conforme visto nas Figuras 4.12a, 4.12b e 4.12c.

As Figuras 4.15a e 4.15b mostram a disposição dos lumens da fibra de curauá tratada e não tratada. Nela é possível observar, que independentemente do tratamento alcalino, as fibras de curauá utilizadas neste estudo possuem lumens praticamente fechados, ou seja, a razão entre os diâmetros dos lumens e das fibras tende a nulidade. A relação entre a razão de diâmetros e a condutividade térmica de fibras naturais já foi discutida por diversos autores (BEHZAD e SAIN, 2007; Liu *et al.*, 2014). Quanto menor for a razão de diâmetros, maior será a tendência da fibra ser condutiva termicamente (TAKAGI *et al.*, 2014). Isso pode ser uma explicação plausível para o aumento da condutividade térmica dos compósitos em função do aumento da carga de fibra.

Figura 4.15 - Aspecto dos lumens das fibras de curauá (a) não tratadas e (b) tratadas.



Fonte: Autor (2024).

4.9.2 Fratografia dos compósitos

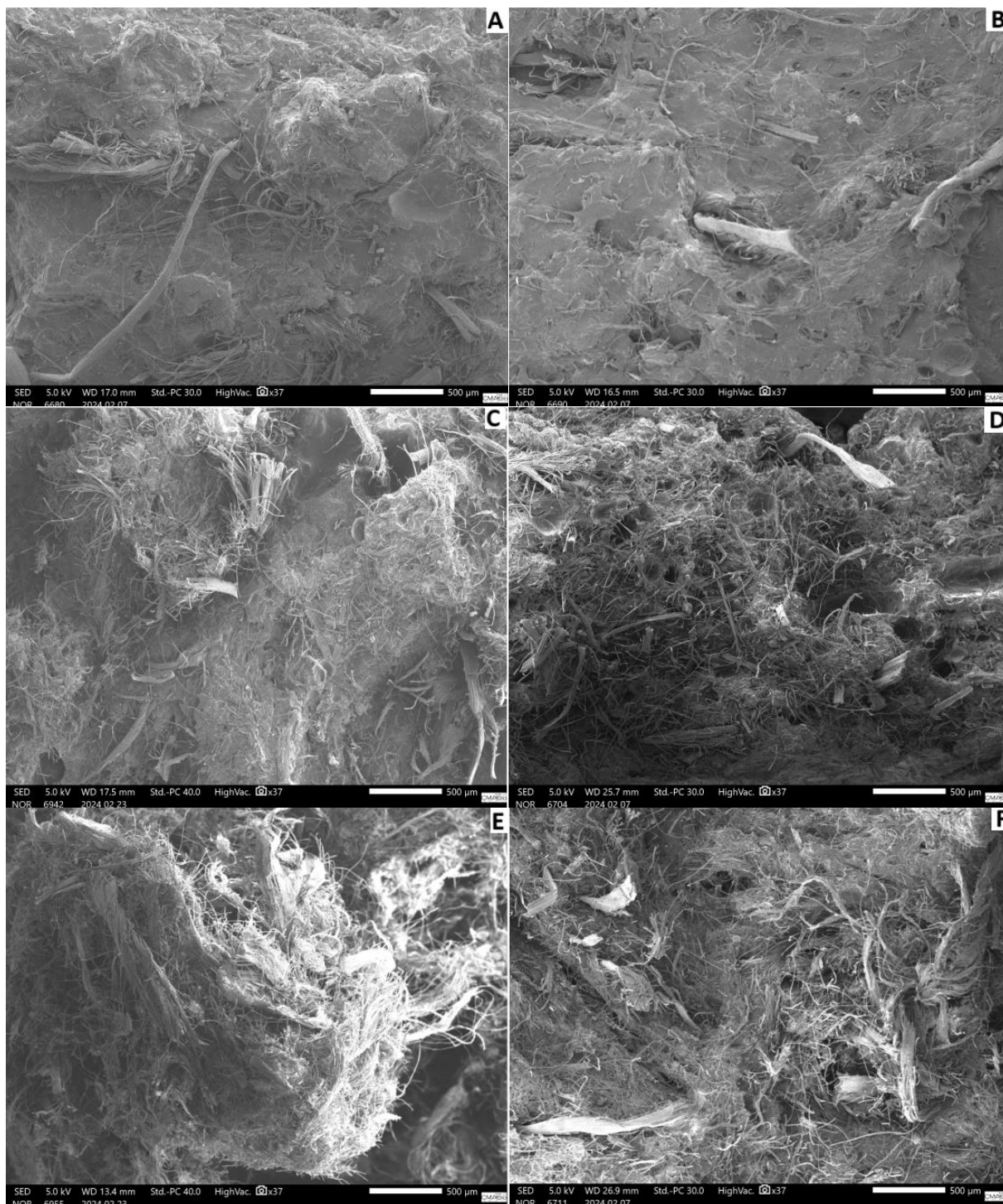
A microscopia de varredura eletrônica foi realizada nos compósitos C2,5%-FT; C2,5%-FNT; C10%-FT; C10%-FNT; C15%-FT; e C15%-FNT. As imagens foram

tomadas nas fraturas por tração em cada corpo de prova, com o intuito de avaliar a interação entre o reforço e a matriz, conforme apresentado na Figura 4.16.

As Figuras 4.16a e 4.16b mostram a região de fratura por tração dos compósitos C2,5%-FNT e C2,5%-FT, respectivamente, com um aumento de 37X. De modo geral todas as amostras aparentam possuir fibras orientadas aleatoriamente no interior da matriz elastomérica, contrapondo-se ao suposto na Seção 4.6.2 deste trabalho. Também foi observada a presença de poros, provavelmente devido à formação de bolhas, indicando falha no processamento do material, que é uma consequência da fabricação manual, sem compactação ou pressurização das amostras. As cavidades formadas por bolhas têm efeito negativo nas propriedades mecânicas, pois agem como concentradores de tensão, aumentando as chances de falha do material. Além disso, há evidências de má distribuição do reforço na matriz, pois se notam pontos de aglomeração de fibra na borracha natural (Fig. 4.16 c-f). Isso também pode potencializar descontinuidades e prejudicar a resistência mecânica dos compósitos.

Apesar disso, os compósitos com 2,5% de teor de fibra são os que apresentam melhor dispersão da fase reforço na matriz, em outras palavras, há menos aglomerações em comparação aos compósitos com teores de 10% e 15%, justificando seu melhor desempenho no ensaio de tração (Fig. 4.12a). Há pouca evidência de arrancamento das fibras (*pull-out*) nas amostras com teor de 2,5% de carga, no entanto, o compósito C2,5%-FNT possui uma superfície mais rugosa e apresenta camadas fraturadas (Fig. 4.17a), o que indica uma adesão mais fraca entre a matriz e o reforço (MIEDZIANOWSKA *et al.*, 2020). Por outro lado, através da Figura 4.17b, observa-se que o compósito com 2,5% de fibra tratada (C2,5%-FT) aparenta boa ligação entre a matriz e o reforço (seta amarela), além de apresentar fibras partidas (círculo amarelo), evidenciando uma adesão mais forte (MOONART *et al.*, 2019). Tais ponderações podem justificar a maior resistência à tração vista no compósito com 2,5% de fibra tratada em relação ao de não tratada.

Figura 4.16 - MEV dos compósitos (a) C2,5%-FNT (b) C2,5%-FT (c) C10%-FNT (d) C10%-FT (e) C15%-FNT e (f) C15%-FT, com aumento de 37x.

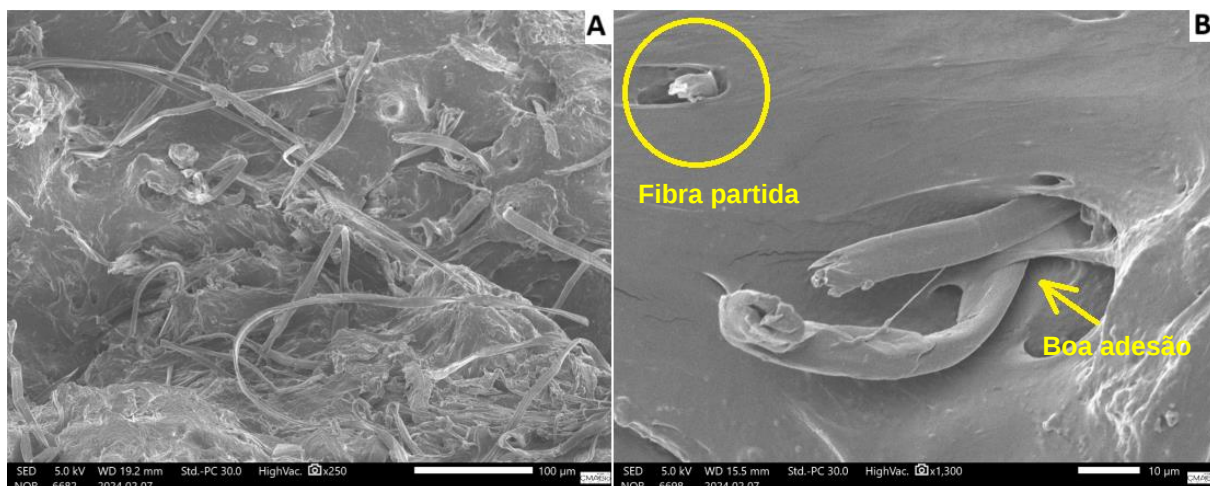


Fonte: Autor (2024).

Os compósitos com teores de fibra de 10% e 15% aparentam aspectos semelhantes, possuindo quantidades mais elevadas de cavidades de bolhas, ainda

maiores que as vistas nos compósitos de 2,5%, além de apresentarem muitas aglomerações de fibra. Tais aglomerações aumentam a interação carga-carga deteriorando a resistência mecânica dos compósitos. Mesmo a resistência à tração aumentando com incremento do reforço, esta não atinge o valor registrado pelo compósito C2,5%-FT (Fig. 4.12), devido à má distribuição de fibra (Fig. 4.16 e-f), estabilizando nos compósitos com 10% e 15% de fibra, estando em concordância com teste Tukey apresentado na Tabela 4.16.

Figura 4.17 - Detalhes da região de fratura dos compósitos (a) C2,5%-FNT aumentado 250X e (b) C2,5%-FT aumentado 1300X.



Fonte: Autor (2024).

Em razão das aglomerações de fibra nos compósitos com 10% e 15%, não ficou clara a presença de arrancamento (*pull-out*), tampouco camadas fraturadas, entretanto, tem-se uma ligeira impressão de que as amostras com fibras tratadas possuem mais pontos de concentração de reforço do que as sem tratamento. Tais agrupamentos de carga, combinado com o aumento de cristalinidade da fibra e uma boa adesão interfacial, podem ser responsáveis pelo o aumento expressivo na condutividade térmica dos compósitos devido ao incremento de fibra (Fig. 4.8), pois formam caminhos preferenciais que facilitam a condução térmica (REN *et al.*, 2022).

5 CONCLUSÕES

O compósito de borracha natural reforçado com fibras de curauá foi analisado no presente trabalho e a partir dos resultados apresentados, é possível concluir que:

- A partir das análises do FTIR, DRX e MEV, pôde-se constatar que o tratamento alcalino em solução aquosa de 5% de NaOH modificou a superfície da fibra de curauá, afetando propriedades como a densidade aparente (aumentou 14,2%), o índice de cristalinidade (aumentou 19,2%) e teor de umidade (reduziu 14,7%). O tratamento alcalino influenciou todas as propriedades analisadas dos compósitos em diversos graus, entretanto, não afeta significativamente o teor de umidade com base no teste de Tukey;
- O FTIR das amostras de compósitos produziu espectros predominantemente semelhantes ao da borracha natural, indicando que a interação matriz/reforço é apenas física;
- Os difratogramas de raios x dos compósitos não sofreram modificações significativas em função do teor de fibras tratadas e não tratadas, mantendo o padrão de espalhamento amorfo típico da borracha natural;
- A análise termogravimétrica mostrou que a merceirização tem pouca influência na estabilidade térmica da fibra de curauá, registrando uma discreta redução na temperatura inicial de degradação (3,61%) na fibra tratada. Da mesma forma, a estabilidade térmica dos compósitos apresentou poucas variações em decorrência a carga de fibra e o tratamento alcalino, onde a maior divergência observada foi inferior a 7% (C5%-FT);
- Foi observado o aumento de 6,3% na condutividade térmica da fibra de curauá devido o tratamento alcalino. Nos compósitos, baixos teores de fibra (2,5% e 5%*m*) produziram efeitos positivos nas amostras, uma vez que a condutividade térmica foi reduzida em até 34,18% em relação à matriz. Por outro lado, à medida que a carga de reforço foi incrementada, observou-se a maximização da condutividade térmica dos compósitos em até 3,29 vezes (C10%-FT) a da borracha natural;
- A dureza dos compósitos variou de 25,4 a 62,5 Shore A, atingindo aumentos de até 134% (C15%-FNT) em relação à borracha natural. Os

resultados apontaram para um aumento na dureza dos compósitos em função da carga de fibra até o teor de 7,5%, estabilizando nos compósitos de 10 a 15% de reforço. Isso indica que tanto o teor de fibra quanto o tratamento alcalino têm mais impacto nos compósitos com baixa carga de fibra.

- O ensaio de tração permitiu observar o comportamento elástico dos compósitos com variações do teor de fibra vegetal. A resistência à tração foi aprimorada nos compósitos de 2,5%, tanto com fibras tratadas e não tratadas, registrando um incremento máximo de 161% (C2,5%-FT) em relação à matriz. Esta melhoria se deve à melhor dispersão do reforço em comparação às demais amostras, conforme observado no MEV. O detrimento da resistência visto entre os compósitos de 2,5 e 5%, seguida por uma tendência de aumento com incremento da fibra, indicou que houveram problemas de dispersão do reforço devido principalmente ao processo de fabricação das amostras. Além disso, todos os compósitos constituídos de fibras tratadas, apresentaram resistência mecânica superior aos pares sem tratamento, mostrando que a merceirização exerceu influência no resultado, evidenciando uma melhora da adesão entre a fibra e a matriz de borracha.

Com base no exposto, pode-se inferir que a fibra de curauá atua como agente de reforço na matriz de borracha, na qual a ligação entre os compostos pode ser melhorada por meio da merceirização, apresentando propriedades superiores aos compósitos com fibra não tratadas. De maneira geral, o aumento do teor de fibra tende a beneficiar as propriedades mecânicas, enquanto as propriedades térmicas geralmente são otimizadas com cargas menores de reforço. Dentre os compósitos estudados, as amostras com teor de 2,5% de fibra natural foram as que apresentaram uma melhor combinação entre as propriedades térmicas e mecânicas, sugerindo que esta possui melhores condições de ser empregada nas aplicações de engenharia.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de pesquisas futuras, propõe-se:

- Avaliar o emprego de outros tratamentos químicos na fibra de curauá em compósitos de borracha natural;
- Investigar a possibilidade de anisotropismo condutividade térmica da fibra de curauá;
- Verificar a possibilidade da fabricação de amostras com altas pressões e temperaturas ou outros processos de manufatura;
- Estudar o efeito da orientação e do comprimento das fibras de curauá na matriz de borracha natural;
- Analisar o efeito do teor de fibra de curauá na cura dos compósitos;
- Analisar a durabilidade do compósito e resistência à degradação;
- Pesquisar o efeito da carga de fibra de curauá e do tratamento alcalino nas propriedades elétricas dos compósitos.

7 REFERÊNCIAS

- ABARCA, L F S., KLINKHAMER, P G L., & CHOI, Y H., Plant Latex, from Ecological Interests to Bioactive Chemical Resources. *Planta medica*, 85(11/12), 856-868, 2019.
- ALMEIDA JR, J. H. S., ORNAGHI JR, H. L., AMICO, S. C., AMADO, F. D. R., Study of hybrid intralaminar curaua/glass composites, *Materials & Design*, Vol. 42, pg. 111-117, 2012.
- ARAÚJO, L. G. S. (2022), Produção, caracterização e aplicação de nanocelulose do bagaço de caju. (Tese). UFC, Fortaleza-CE, Brasil.
- ARPITHA, G. R., YOGESHA, B., An Overview on Mechanical Property Evaluation of Natural Fiber Reinforced Polymers, *Materials Today: Proceedings – Part A*, Vol. 4, 2017.
- ASDRUBALI, F., D'ALESSANDRO, F., & SCHIAVONI, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17.
- AZIZ, S. H., ANSELL, M. P., The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: Part 1 – polyester resin matrix, *Composites Science and Technology*, Volume 64, Issue 9, 2004.
- AZWA, Z.N. *et al.* A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials and Design*. V. 47, P. 424–442, 2013.
- BARASOUL, F. V. (2021), Nanocompósitos de borracha natural e nanoestruturas de carbono visando aplicação como geradores triboelétricos. (Dissertação). UNIPAMPA, Baje-RS, Brasil.
- BEHZAD, T., & SAIN, M. (2007). Measurement and prediction of thermal conductivity for hemp fiber reinforced composites. *Polymer Engineering & Science*, 47(7), 977-983.
- BEILEN, J. B. V., POIRIER, Y., Establishment of new crops for the production of natural rubber, *Trends in Biotechnology*, Vol. 25, 2007.
- 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*, vol.24, n3, p.388-394, 2014
- BEMERW, B., TESHOME, B., GIBRIL, M., & KONG, F. Development of Papyrus Fiber Reinforced Natural Rubber Composite for Shoe Sole. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5344–5354, 2021.
- BORGES, E. R. G. (2019), Desenvolvimento e Caracterização Física e Mecânica de Painéis de Poliuretano com Fibras de Curauá e Resíduos Madeireiros. (Dissertação). UFAM, Brasil.
- BORSOI, C., SCIENZA, L.C. AND ZATTERA, A.J., Characterization of composites based on recycled expanded polystyrene reinforced with curaua fibers. *J. Appl. Polym. Sci.*, 128: 653-659, 2013.
- CALLISTER JR, W. D., RETHWISCH, D. G., *Ciência e engenharia de materiais – uma introdução*. 10ª ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2020.
- CARASCHI, J.C, LEÃO, A.L., Characterization of curaua fiber. *Mol Cryst Liq Cryst Sci Technol Sect A Mol Cryst Liq Cryst*, 2000;353(1):149–52.
- CARDARELLI, F., *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*. 2ª ed: Springer, London, New York, 2000.
- CASTRO, D.O., RUVOLO FILHO, A., FROLLINI, E., Materials prepared from biopolyethylene and curaua fibers: Composites from biomass, *Polymer Testing*, Vol. 31, Pg. 880-888, 2012.

CASTRO, D.O., PASSADOR, F., RUVOLO FILHO, A., FROLLINI, E., Use of castor and canola oils in “biopolyethylene” curauá fiber composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 95, 2017.

CHERUNOVA, I., СТЕΦΑΗΟΒΑ, Ε Β., & RADYUHINA, G. (2020). Method of getting the composite fiber material with functional heat-resistant, heat-accumulating components.

CORAN, A.Y., Chapter 7 - Vulcanization, Editor(s): MARK, J.E., ERMAN, B., ROLAND, M.C., *The Science and Technology of Rubber (Fourth Edition)*, Academic Press, Pages 337-381, 2013.

CUI, J. F., LI, F. Y., LI, J. Y., LI, J. F., ZHANG, C. W., CHEN, S., & SUN, X. (2019). Effects of magnesium hydroxide on the properties of starch/plant fiber composites with foam structure. *RSC advances*, 9(30), 17405-17413.

ÇENGEL, Y. A. Heat and mass transfer: fundamentals & applications. 6^a ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.

D'AGOSTINI, S., BACILIERI, S., VITIELLO, N., HOJO, H., BILYNSKYJ, M. C. V., BATISTA FILHO, A., REBOUÇAS, M. M., *Ciclo Econômico da Borracha – Seringueira Hevea Brasiliensis (Hbk)*. 2014.

DAS, M., & CHAKRABORTY, D. (2008). Evaluation of improvement of physical and mechanical properties of bamboo fibers due to alkali treatment. *Journal of applied polymer science*, 107(1), 522-527.

DATTA, J., WŁOCH, M. Preparation, morphology and properties of natural rubber composites filled with untreated short jute fibres. *Polym. Bull.* 74, 763–782 (2017).

DE, S. K., WHITE, J. R., *Rubber Technologist's Handbook*. Polestar Scientifica, Inglaterra, 2021.

DIKMEN, N., & OZKAN, S. T. E. (2016). Unconventional Insulation Materials. *InTech*. doi: 10.5772/63311.

GOMES, A., GODA, K., & OHGI, J. (2004). Effects of alkali treatment to reinforcement on tensile properties of curaua fiber green composites. *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, 47(4), 541-546.

GONÇALVES, F. A. C., AMARAL, E. L. S., & LOPES, J. L. *Fibras Vegetais: Aspectos Gerais, Aproveitamento, Inovação Tecnológica e uso em Compósitos*, 2018.

LILARGEM ROCHA, D., TAMBARA JÚNIOR, L. U. D., MARVILA, M. T., PEREIRA, E. C., SOUZA, D., & DE AZEVEDO, A. R. G.. A Review of the Use of Natural Fibers in Cement Composites: Concepts, Applications and Brazilian History. *Polymers*, 2022.

DELGADO-AGUILAR, M., TARRÉS, Q., MARQUES, M. F. V., ESPINACH, F. X., JULIÁN, F., MUTJÉ, P., VILASECA, F. Explorative Study on the Use of Curauá Reinforced Polypropylene Composites for the Automotive Industry. *Materials*, 2019.

DEL PINO, G. G., BEZAZI, A., BOUMEDIRI, H., KIELING, A. C., GARCIA, S. D., TORRES, A. R., SOARES, R. S., MACÊDO NETO, J. C., DEHAINI, J., PANZERA, T. H., Optimal Tensile Properties of Biocomposites Made of Treated Amazonian Curauá Fibres Using Taguchi Method. *Materials Research*, Vol. 24, 2021.

FAN, Q., DUAN, H., XING, X., A review of composite materials for enhancing support, flexibility and strength in exercise, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 94, 2024.

FARUK, O., BŁĘDZKI, A K., FINK, H., & SAIN, M., Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010, 2012.

FERNANDES, L. C., FÉRNÁNDEZ, E. F., MARTINS, P., FERREIRA, N., ANTUNES, P. J., & LANCEROS-MÉNDEZ, S. Overview on thermoactive materials, simulations and applications. *Journal of materials science*, 55(3), 925-946, 2019.

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*, Vol. 139, 2017.

FERREIRA, S. R., SENA NETO, A. R., SILVA, F. A., SOUZA, F. G., TOLEDO FILHO, R. D., The influence of carboxylated styrene butadiene rubber coating on the mechanical performance of vegetable fibers and on their interface with a cement matrix, *Construction and Building Materials*, Vol. 262, 2020.

FIDELIS, M. E. A., PEREIRA, T. V. C., GOMES, O. F. M., SILVA, F. A., TOLEDO FILHO, R. D., The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 2, Pg. 149-157, 2013.

FIELD, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. SAGE Publications.

FRANTA, I. I., *Elastomers and rubber compounding materials: Manufacture, Properties and Applications*. Elsevier, 1989.

FREITAS, A.S.M. (2019), *Desenvolvimento de Filmes Finos de Organossilicone Depositados à Plasma para Fotoproteção do Polipropileno*. (Dissertação). UFSC, Sorocaba-SP, Brasil.

FREITAS, A.E.M., PADILHA, F.D.J., BARROS, S.D.S. *et al.* Curauá fiber from plants produced by tissue culture: thermal, mechanical, and morphological characterizations. *Cellulose* 30, 2841–2858, 2023.

FREITAS, S. S., SOUZA, C. M., QUEIROZ, L. D. S., PADILHA, F. J., Possibilidades de Aplicações da Espécie Amazônica Curauá (*Ananas Erectifolius*): Mapeamento Temático da Espécie. *Anais [do] 7º Encontro Brasileiro de Bibliometria e Cientometria, (recurso eletrônico)*. - Salvador: Instituto de Ciência da Informação, Universidade Federal da Bahia, 2020.

FROLLINI, E., BARTOLUCCI, N., SISTI, L., CELLI, A., Biocomposites based on poly(butylene succinate) and curaua: Mechanical and morphological properties, *Polymer Testing*, Vol. 45, 2015.

GANJYAL, G.M., REDDY, N., YANG, Y.Q., HANNA, M.A. (2004), Biodegradable packaging foams of starch acetate blended with corn stalk fibers. *J. Appl. Polym. Sci.*, 93: 2627-2633.

GAVARI, L. K. (2012). *Obtenção e caracterização de compósitos de borracha natural e polianilina com ferrita de bário*. (Dissertação). UNESP, Brasil.

GEETHAMMA, V. G., KALAPRASAD, G., GROENINCKX, G., THOMAS, S., Dynamic mechanical behavior of short coir fiber reinforced natural rubber composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, 2005.

GENT, A. N. On the Relation Between Indentation Hardness and Young's Modulus. *IRI Trans*, 34:46 – 57. 1958.

GENT, A. N., *Engineering with rubber: how to design rubber components*. 3ª Ed., Hanser. Munic – Alemanha, 2012.

GONÇALVES, F. A. C., AMARAL, E. L. S., LOPES JR, J. L., LOPES, B. L. S., RIBEIRO JR, L. S., BRABO, D. R., AMARANTE, C. B., *Fibras Vegetais: Aspectos Gerais, Aproveitamento, Inovação Tecnológica e uso em Compósitos*. *Revista ESPACIOS*. Vol. 39, 2018.

GUTIÉRREZ, M. C., DE PAOLI, M. A., FELISBERTI, M. I., Cellulose acetate and short curauá fibers biocomposites prepared by large scale processing: Reinforcing and thermal insulating properties, *Industrial Crops and Products*, Vol. 52, 2014.

HASHIM, M. Y., AMIN, A. M., MARWAH, O. M. F., OTHMAN, M. H., YUNUS, M. R. M., & HUAT, N. C. The effect of alkali treatment under various conditions on physical properties of kenaf fiber. In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 914, 2017.

HASAN, Afnan; RABBI, M. S.; BILLAH, Md Maruf. Making the lignocellulosic fibers chemically compatible for composite: A comprehensive review. *Cleaner Materials*, v. 4, p. 100078, 2022.

HOWELL, D. C. (2012). *Statistical Methods for Psychology*. Wadsworth.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 8ª ed., Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2019.

IDICULA, M., BOUDENNE, A., UMADEVI, L., IBOS, L., CANDAU, Y., & THOMAS, S. (2006). Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites. *Composites science and technology*, 66(15), 2719-2725.

ISMAIL, H, EDYHAM, M. R., WIRJOSENTONO, B., Bamboo fibre filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent, *Polymer Testing*, Vol. 21, 2002.

ISMAIL, H., OTHMAN, N., KOMETHI, M., Curing characteristics and mechanical properties of rattan-powder-filled natural rubber composites as a function of filler loading and silane coupling agent. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 123, 2012.

JESUS, L. C. C., OLIVEIRA, J. M., LEÃO, R. M., BELTRAMI, L. R., ZATTERA, A. J., ANFLOR, C. T. M., DOCA, T. R. C., LUZ, S. M., Tensile behavior analysis combined with digital image correlation and mechanical and thermal properties of microfibrillated cellulose fiber/ polylactic acid composites, *Polymer Testing*, Vol. 113, 2022.

JOSEPH, S., JOSEPH, K., THOMAS, S., Green Composites from Natural Rubber and Oil Palm Fiber: Physical and Mechanical Properties, *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, Vol. 55, 2006.

KABIR, M. M., WANG, H., LAU, K. T., CARDONA, F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites: Part B*, v. 43, n. 2012, p. 2883-2892, 2012.

KARIM, A. F.A., ISMAIL, H., ARIFF, Z. M. (2016). "Properties and characterization of kenaf-filled natural rubber latex foam," *BioRes.* 11(1), 1080-1091.

KOHJIYA, S. & IKEDA, Y.. (2014). *Chemistry, manufacture and applications of natural rubber*.

KHAN, M Z R., & SRIVASTAVA, S K. (2018). Development, Characterization and Application Potential of Bio-composites: A Review.

LAZARINI, R. G.; MARCONCINI, J. M. Caracterização estrutural de fibras de bagaço de cana-de-açúcar quimicamente modificadas. *Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária (SIAGO)*. 2019.

LEÃO, A.L., ROWELL, R., TAVARES, N.. Applications of natural fibers in automotive industry in Brazil. In: Prasad PN, Mark JE, Kandil SH, Kaifi ZH, editors. *Science and technology of polymer and advanced materials*. Newyork: Plenum Press; 1998. p. 755–61.

LEÃO, M. A. (2008), *Fibras de Licuri - Um Reforço Alternativo de Compósitos Poliméricos*. (Dissertação). UFRN, Natal-RN, Brasil.

LIBERA JR, V. D., TEIXEIRA, L.A., LEÃO, R. M., LUZ, S. M., Evaluation of thermal behavior and cure kinetics of a curauá fiber prepreg by the non-isothermal method, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 8, 2019a.

LIBERA JR, V. D. (2019b), *Laminados de Fibra de Curauá/ Epóxi Obtidos a Partir de Pré-Impregnados*. (Dissertação). UNB, Brasília-DF, Brasil.

LIN, G., ZHANG, X. J., LIU, L., ZHANG, J. C., CHEN, Q. M., ZHANG, L. Q., Study on microstructure and mechanical properties relationship of short fibers/rubber foam composites, *European Polymer Journal*, Vol. 40, 2004.

LOPATTANANON, N., PANAWARANGKUL, K., SAHAKARO, K., ELLIS, B. (2006), Performance of pineapple leaf fiber–natural rubber composites: The effect of fiber surface treatments. *J. Appl. Polym. Sci.*, 102: 1974-1984.

LOPES, F.P.D. (2011), Estudos Adicionais dos Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras de Curauá. (Dissertação). UENF, Brasil.

MACIEL, N. D. O. R., FERREIRA, J. B., DA SILVA VIEIRA, J., RIBEIRO, C. G. D., LOPES, F. P. D., MARGEM, F. M., ... & DA SILVA, L. C. (2018). Comparative tensile strength analysis between epoxy composites reinforced with curaua fiber and glass fiber. *Journal of materials research and technology*, 7(4), 561-565.

MANIGANDAN, S., PRAVEENKUMAR, T. R., AL-MOHAIMEED, A. M., BRINDHADEVI, K, PUGAZHENDHI, A., Characterization of polyurethane coating on high performance concrete reinforced with chemically treated Ananas erectifolius fiber, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 150, 2021.

MARTINS, M. A., MATTOSO, L. H. C., Short sisal fiber-reinforced tire rubber composites: Dynamic and mechanical properties. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 91, 2004.

MASŁOWSKI, M., MIEDZIANOWSKA, J. & STRZELEC, K. Natural Rubber Composites Filled with Cereals Straw Modified with Acetic and Maleic Anhydride: Preparation and Properties. *J Polym Environ* 26, 4141–4157 (2018).

MASŁOWSKI, M.; ALEKSIEIEV, A.; MIEDZIANOWSKA, J.; STRZELEC, K. Common Nettle (*Urtica dioica* L.) as an Active Filler of Natural Rubber Biocomposites. *Materials*, 14, 1616, 2021.

MAXWELL, S. E., & DELANEY, H. D. (2004). *Designing Experiments and Analyzing Data*. Lawrence Erlbaum Associates.

MENON, A.R.R., PILLAI, C.K.S., NANDO, G.B. (1996), *Polym Degrad Stabil* 52 (3):265.

MIEDZIANOWSKA, J., MASŁOWSKI, M., RYBIŃSKI, P., & STRZELEC, K. Properties of chemically modified (selected silanes) lignocellulosic filler and its application in natural rubber biocomposites. *Materials*, 13(18), 4163, 2020.

MIRANDA, B. V. Q. (2022), Borracha Natural Modificada com Ácido Hialurônico para Aplicações em Lesões Cutâneas. (Dissertação). UFSCAR, Sorocaba-SP, Brasil.

MOHAMED, G R., MAHMOUD, R., ABUKHADRA, M R., FAHIM, I S., EL-SALAM, H M A., & MAHMOUD, H M. (2023). Towards a circular economy: valorization of banana peels by developing bio-composites thermal insulators.

MOHAMMED, M., RAHMAN, R., MOHAMMED, A. M., ADAM, T., BETAR, B. O., OSMAN, A. F., DAHHAM, O. S., Surface treatment to improve water repellence and compatibility of natural fiber with polymer matrix: Recent advancement, *Polymer Testing*, Volume 115, 2022.

MOHANTY, A.K., MISRA, M., & DRZAL, L.T. (Eds.). (2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203508206>

MONTEIRO, S. N., LOPES, F. P. D., NASCIMENTO, D. C. O., FERREIRA, A. S. F., SATYANARAYANA, K. G., Processing and properties of continuous and aligned curaua fibers incorporated polyester composites, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 2, Pg. 2-9, 2013.

MOONART, U., UTARA, S. Effect of surface treatments and filler loading on the properties of hemp fiber/natural rubber composites. *Cellulose* 26, 7271–7295 (2019).

MORELLI, A. C. Materiais compósitos: constituição, propriedades e reparos. Curitiba: CRV, 2022.

NAIR, A.B., E JOSEPH, R., Capítulo 9 - Eco-friendly bio-composites using natural rubber (NR) matrices and natural fiber reinforcements, Editores: Shinzo Kohjiya, Yuko Ikeda, Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber, Woodhead Publishing, 2014.

ÑAHUIS, L. E.C. (2021). Incorporação de partículas de hidrogel em microfibras de borracha natural obtidas por fiação por sopro em solução. (Dissertação). UNESP, Brasil.

Norma ASTM D297-21. Standard Test Methods for Rubber Products - Chemical Analysis, American Society for Testing and Materials. In: Annual Book of ASTM, 2021.

Norma ASTM D7984-21. Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument, American Society for Testing and Materials. In: Annual Book of ASTM, 2021.

Norma ISO. (2017). ISO 37:2017 - Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties. International Organization for Standardization.

OLIVEIRA, P.F., MARQUES M. F. V., Comparison between coconut and curaua fibers chemically treated for compatibility with PP matrixes. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014.

ORNAGHI J, H.L., ZATTERA, A.J., AMICO, S.C., Thermal behavior and the compensation effect of vegetal fibers. *Cellulose*, Vol. 21, 2014.

OSABOHEN, E., EGBOH, S.H.O., Utilization of bowstring hemp fiber as a filler in natural rubber compounds. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 107, 2007.

PAIVA, F.F.G., MARIA, V.P.K., TORRES, G.B. *et al.* Sugarcane bagasse fiber as semi-reinforcement filler in natural rubber composite sandals. *J Mater Cycles Waste Manag* 21, 326–335 (2019).

PAGOTTO, L. G., RODRIGUES, J., HENRIQUE, F. H., JUNIOR, J. P., & BLUMER, S. (2021). Análise de variância e testes de médias: um estudo aplicado em experimentos com variedades de algodoeiro e seleções de citrumele. *Brazilian Applied Science Review*, 5(3), 1287-1296.

PANTAMANATSOPA, P., ARIYAWIRIYANAN, W., MEEKEAW, T., SUTHAMYONG, R., ARRUB, K., HAMADA, H., Effect of Modified Jute Fiber on Mechanical Properties of Green Rubber Composite, *Energy Procedia*, Vol. 56, 2014.

PICKERING, K. L., EFENDY, M. A., & LE, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112.

PIMENTEL-GOMES, F. Curso de estatística experimental. Digitaliza Conteúdo, 2023.

PINTO, R.G. (2019), Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Curauá (*Ananás erectifolius*) Impregnadas com Sílica Ativa. UFPA. Belém-PA, Brasil.

PRASANNA, G.V., SRILEKHA, R., HARSHA, A.V.N.S., CHANDAN, V.S.A., KUMAR, V.S., Hybridization and influence of chemical treatment on the morphology and optimization of composites, *Materials Today: Proceedings*, Volume 44, Part 6, 2021.

RAHMAN, M. M., SHARMIN, N., KHAN, R. A., DEY, K., HAQUE, M. E., Studies on the Mechanical and Degradation Properties of Jute Fabric-Reinforced Natural Rubber Composite: Effect of Gamma Radiation. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2012

REN, F., YANG, Z., MA, H., ZHOU, Z., & XU, W. Enhanced damping and thermal conductivity of hBN/silicone rubber composites via strong interfacial action. *Materials Research Express*, 9(4), 046303, 2022.

RIPPEL, M. & BRAGANÇA, F. (2009). Borracha natural e nanocompósitos com argila. *Química Nova - QUIM NOVA*. 32. 10.1590/S0100-40422009000300024.

ROCHA, D. L., TAMBARA Jr, L. U. D., MARVILA, M. T., PEREIRA, E. C., SOUZA, D., & DE AZEVEDO, A. R. G. (2022). A review of the use of natural fibers in cement composites: concepts, applications and Brazilian history. *Polymers*, 14(10), 2043.

ROFF, W. J., SCOTT, J. R., PACITTI, J., *Fibres, Films, Plastics and Rubbers: A Handbook of Common Polymers*. 1ª ed., Butterworth & Co LTDA, 1971.

ROKBI, M., OSMANI, H., IMAD, A., & BENSEDDIQ, N. (2011). Effect of chemical treatment on flexure properties of natural fiber-reinforced polyester composite. *procedia Engineering*, 10, 2092-2097.

RYBIŃSKI, P., SYREK, B., MASŁOWSKI, M. *et al.*, Influence of Lignocellulose Fillers on Properties Natural Rubber Composites. *J Polym Environ* 26, 2489–2501 (2018).

SAFFIAN, H. A., TALIB, M.A., LEE, S.H., TAHIR, P. M. D., LEE, C.H., ARIFFIN, H., ASA'ARI, A.Z.M. Mechanical Strength, Thermal Conductivity and Electrical Breakdown of Kenaf Core Fiber/Lignin/Polypropylene Biocomposite. *Polymers* 2020.

SAHU, P., GUPTA, M. K. A review on the properties of natural fibres and its bio-composites: Effect of alkali treatment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, v. 234, n. 1, p. 198-217, 2020.

SAKDAPIPANICH, J., Current Study on Structural Characterization and Unique Film Formation of *Hevea brasiliensis* Natural Rubber Latex. *Trans Tech Publications*, 844, 498-501, 2013.

SALES, C. G. (2015), *Fibra de Curauá como Reforço em Matriz Cimentícia para Fabricação de Telhas e Placas de Fibrocimento*. (Dissertação). UFPA, Brasil.

SALGADO, I. P., SILVA, F. A., Flexural behavior of sandwich panels combining curauá fiber-reinforced composite layers and autoclaved aerated concrete core, *Construction and Building Materials*, Vol. 286, 2021.

SANTOS, F.R.S. (2013), Desenvolvimento e aplicação de compósitos à base de matriz polimérica reforçado com fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e resíduos de madeiras amazônicas. (Dissertação). UFAM. Manaus-AM, Brasil.

SANTOS, L. M. P. (2015), Desenvolvimento e caracterização de biocompósito de látex (borracha natural) e fibra de carnaúba. (Dissertação). UFRN, Brasil.

SAREENA, C., RAMESAN, M.T., PURUSHOTHAMAN, E., Utilization of peanut shell powder as a novel filler in natural rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 125, 2012a.

SAREENA, C., RAMESAN, M., PURUSHOTHAMAN, E., Utilization of coconut shell powder as a novel filler in natural rubber. *Journal of Reinforced Plastics and Composites.*, Vol. 31, 2012b.

SATISH, P., KUMAR, M. D. S., PRASANNA, A. S. B., PRAKASH, C. D. S., Investigation on behavioural aspects of pine apple leaf fiber–latex composites used for transformer applications, *Materials Today: Proceedings - Part 2*, Vol. 28, 2020.

SATYANARAYANA, K.G., GUIMARÃES, J.L. E WYPYCH, F., Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, 2007.

SEGAL, L., CREELY, J.J., MARTIN, A.E., CONRAD, C.M., An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the x-ray diffractometer. *Text Res J.*, 1959.

SEGARRA, M., BARRENECHE, C., CALDERÓN, A., & FERNÁNDEZ, A I., Materials Selection for Thermal Energy Storage Applications—Case Studies. *Green energy and technology*, 55-66, 2018.

SCALIONI, L. V., GUTIÉRREZ, M. C. AND FELISBERTI, M. I., Green composites of poly(3-hydroxybutyrate) and curauá fibers: Morphology and physical, thermal, and mechanical properties. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 134, 2016.

SEKINO, N., Density dependence in the thermal conductivity of cellulose fiber mats and wood shavings mats: investigation of the apparent thermal conductivity of coarse pores. *J Wood Sci*, Vol. 62, 2016.

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, 21p, 2023.

SENA NETO, A.R., MATTOSO, L.H.C., MARCONCINI, J.M., Compósitos Biodegradáveis de Poli(ácido láctico) e Fibra de Curauá: Tratamento e Compatibilização das Fibras. In: VII Workshop de Nanotecnologia Aplicada ao Agronegócio. Instituto de Física de São Carlos – IFSC. São Carlos – SP. 2014.

SILVA, F. T. (2017), Nanocompósitos de Borracha Natural e Nanocarbonos. (Dissertação). UNB, Brasília-DF, Brasil.

SILVA, H.S.P. (2010), Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibra de Curauá e Híbridos com Fibra de Vidro. (Dissertação). UFRGS, Porto Alegre-RS, Brasil.

SILVA, R. L. (2014), Influência dos Agentes de Acoplamento na Degradação Ambiental de Compósitos de Polipropileno-Fibra de Curauá. (Dissertação). UFABC, Brasil.

SILVA JR, O. G., MELO, R. P., SALES, R. B. C., AYRES, E., PATRICIO, P. S. O., Processing and characterization of polyethylene/starch/curauá composites: Potential for application as thermal insulated coating, *Journal of Building Engineering*, Vol. 11, 2017.

SILVA NETO, J. S., LIMA, R. A. A., CAVALCANTI, D. K. K., SOUZA, J. P. B., AGUIAR, R. A. A., BANEJA, M. D., *Journal of Applied Polymer Science. J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 136, 2018.

SIQUEIRA, J. E. L. d. (2006). Utilização de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento de alvenaria: Estudo comparativo de desempenho. (Dissertação). UFSC, Brasil.

SISTI, L., KALIA, S., TOTARO, G., VANNINI, M., NEGRONI, A., ZANAROLI, G., CELLI, A., Enzymatically treated curaua fibers in poly(butylene succinate)-based biocomposites, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 6, 2018.

SIVASUBRAMANIAN, P., MAYANDI, K., SANTULLI, C., ALAVUDEEN, A., & RAJINI, N. Effect of Fiber Length on Curing and Mechanical Behavior of Pineapple Leaf Fiber (PALF) Reinforced Natural Rubber Composites. *Journal of Natural Fibers*, 19(11), 4326–4337, 2020.

SHACKELFORD, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, 9ª Ed., Pearson, 2022.

SOEIRO, E. C. (2017), Análise da viabilidade na utilização como isolante térmico de um compósito de poliuretano/pó de macambira. (Tese). UFRN, Brasil.

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*, Vol. 103, 2017.

SOUSA, V. M. Z. D. (2016). Caracterização mecânica, térmica e morfológica de compósitos de Polihidroxibutirato (PHB) reforçados com fibras de curauá.

SOUZA FILHO, J. R. (2015), Obtenção e caracterização de um eco-compósito à base de látex e bainha da palha do coqueiro para isolamento térmico e acústico. (Tese). UFRN, Brasil.

SPINACÉ, M. A. S., LAMBERT, C. S., FERMOSELLI, K. K. G., DE PAOLI, M. A., Characterization of lignocellulosic curaua fibres, *Carbohydrate Polymers*, Vol. 77, Pg. 47-53, 2009.

SUBASH, M.C., MUTHIAH, P. Eco-friendly degumming of natural fibers for textile applications: A comprehensive review, *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 5, 2021.

SURYAWAN, I. G. P. A., SUARDANA, N. P. G., SUPRAPTA WINAYA, I. N., & BUDIARSA SUYASA, I. W. (2020). Study on correlation between hardness and thermal conductivity of polymer composites reinforced with stinging nettle fiber. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 11(1).

TAGLIARI, C. (2012), Estudo da aplicação de microondas no processo de secagem industrial de borracha sintética. (Dissertação). UNISC, Brasil.

TAKAGI, H. & NAKAGAITO, A. & LIU, K.. Heat transfer analyses of natural fibre composites. *WIT Transactions on the Built Environment*. 137. 237-243. 10.2495/HPSM140211. 2014.

THAKUR, V. K., THAKUR, M. K., & KESSLER, M. R. (Eds.). (2017). Handbook of composites from renewable materials: Volume 3: Physico-chemical and mechanical characterization. Hoboken, NJ: Wiley-Scrivener.

TENAZOA, C., SAVASTANO, H., CHARCA, S., QUINTANA, M. & FLORES, E. The Effect of Alkali Treatment on Chemical and Physical Properties of Ichu and Cabuya Fibers, *Journal of Natural Fibers*, 18:7, 923-936, 2021.

TEIXEIRA, F. P., SILVA, F. A., On the use of natural curauá reinforced cement based composites for structural applications, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 114, 2020.

TOMCZAK, F., SATYANARAYANA, K. G., SYDENSTRICKER, T. H. D., Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III – Morphology and properties of Brazilian curauá fibers, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, pg 2227-2236, 2007.

UBI, P. A., ADAH, P. U., ADEMOH, N. A., SALAWU, A. A., HASSAN, A. B., DASHE, J. D., OYEYEMI, S. W., Rice husk ash reinforced natural rubber composites: effect of benzene diazonium salt treatment. *Nigerian Journal of Technology*. Vol. 41, 2022.

VACCIOLI, K. B. (2022), Efeito da Adição de Sílica, Óxido de Grafeno e Agentes Organossulfurados na Vulcanização e nas Propriedades de Compostos Baseados em Borracha Natural. (Tese). USP. São Paulo-SP, Brasil.

VAN VLACK, L. H., Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais. 5ª ed., Campus, 1984.

XIONG, X. Q., BAO, Y.L., LIU, H., ZHU, Q., LU, R., MIYAKOSHI, T. Study on mechanical and electrical properties of cellulose nanofibrils/graphene-modified natural rubber, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 223, 2019.

ZAH, R., HISCHIER, R., LEÃO, A. L., BRAUN, I., Curauá fibers in the automobile industry – a sustainability assessment, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, 2007.

ZENG, Z., REN, W., XU, C., LU, W., ZHANG, Y, ZHANG. Y., Maleated natural rubber prepared through mechanochemistry and its coupling effects on natural rubber/cotton fiber composites. *J Polym Res*, Vol. 17, 213–219, 2010.

ZHOU, Y., FAN, M., CHEN, L., ZHUANG, J., Lignocellulosic fibre mediated rubber composites: An overview, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 76, 2015.

ZWAWI, M., A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications. *Molecules*, 2021.

WEBER, A. M. (2018), Viabilidade Técnica da Utilização de Fibra de Curauá (*Ananas Erectifolius*) como Reforço em Compósitos Cimentícios Laminados. (Dissertação). UTFR. Brasil.

WEI, J. Durability of Cement Composites Reinforced with Sisal Fiber. 2014. (Tese). Columbia University, Estados Unidos – Nova York, 2014.