



UFAM

ORIENTADORA:

Profa. Dra. Magnólia Grangeiro Quirino

COORIENTADOR:

Prof. Dr. Flávio Augusto
de Freitas

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS A PARTIR DE
COMPÓSITOS COM A FIBRA DO CURAUÁ
(ANANAS ERECTIFOLIUS (L. B. SM.)).**

Ana Emília Margarido de Freitas

**DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO
2023**

Ana Emília Margarido de Freitas

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS A PARTIR DE COMPÓSITOS
COM A FIBRA DO CURAUÁ (*Ananas erectifolius* (L. B. Sm.)).**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Design da Universidade Federal do Amazonas para a
obtenção do Grau de Mestre em Design.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Magnólia Grangeiro Quirino.

Co-orientador: Prof. Dr. Flávio Augusto de Freitas

Esta Dissertação será julgada adequada para aprovação
no exame de defesa de mestrado pelo Programa de
Pós-Graduação em Design.
Manaus, 16 de Janeiro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Magnólia Grangeiro Quirino, Presidente
Universidade Federal do Amazonas

Prof.^a Dr.^a Sheila Cordeiro Mota, Membro Interno
Universidade Federal do Amazonas

Prof.^a Dr.^a Simone da Silva, Membro Externo
Centro de Biotecnologia da Amazônia

Ficha Catalográfica

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

F866d Freitas, Ana Emília Margarido de
Desenvolvimento de produtos a partir de compósito com a fibra de curauá (*Ananas erectifolius* (L. B. Sm.)). / Ana Emília Margarido de Freitas . 2023
112 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Magnólia Grangeiro Quirino
Coorientador: Flávio Augusto de Freitas
Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Fibra de curauá. 2. compósito. 3. polipropileno. 4. tampa de vedação para garrafa térmica. 5. solado de sapato. I. Quirino, Magnólia Grangeiro. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Design

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANA EMÍLIA MARGARIDO DE FREITAS

DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS A PARTIR DE COMPÓSITOS COM A FIBRA DO CURAUÁ
(*Ananas erectifolius* (L. B. Sm.))

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para a obtenção do título de Mestre em Design, área de concentração Design, Sistemas de Produtos e Processos.

Aprovada em: Manaus, 15 fevereiro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Magnólia Grangeiro Quirino, Presidente
Universidade Federal do Amazonas

Profa. Dra. Sheila Cordeiro Mota, Membro Interno
Universidade Federal do Amazonas

Profa. Dra. Simone da Silva, Membro Externo
Centro de Bionegocios da Amazônia



Documento assinado eletronicamente por **Magnólia Grangeiro Quirino, Professor do Magistério Superior**, em 03/06/2023, às 11:58, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Simone da Silva, Usuário Externo**, em 05/06/2023, às 15:45, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sheila Cordeiro Mota, Professor do Magistério Superior**, em 06/06/2023, às 10:09, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufam.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1530721** e o código CRC **9E3C49A9**.

Av. Octávio Hamilton Botelho Mourão - Bairro Coroado 1 Campus Universitário Senador Arthur Virgílio Filho, Setor Norte - Telefone: (92) (92) 3305-1181 / Ramal 2600
CEP 69080-900 Manaus/AM - ppgd@ufam.edu.br

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

(Charles Chaplin)

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, ao dono de toda a sabedoria e conhecimento, aquele que antes da fundação do mundo já era Deus. Ao meu marido, Dr. Flávio Freitas, o maior incentivador e motivador que eu poderia ter. Sempre atencioso, exigente e dedicado em tudo que faz. À minha orientadora, professora Dr.^a Magnólia Quirino, por cada palavra nos momentos em que eu achava que não ia conseguir. À minha família, minha rede de apoio, meus pais que ficaram com a Lizzie para que eu pudesse assistir cada aula. Aos meus colegas de mestrado, por cada dica compartilhada. Por fim, agradeço ao PPGD pela oportunidade e a FAPEAM pela bolsa concedida.

Resumo

A pesquisa incide sobre o aproveitamento de resíduos poliméricos e o emprego de fibras vegetais para a produção de compósitos e desenvolvimento de produtos (tampa de vedação de garrafa térmica e solado de sapato). Neste contexto, as fibras do curauá já são bastante conhecidas, principalmente pelas suas boas propriedades mecânicas e sinergismo com matrizes poliméricas. Porém cada método de cultivo, resultará em diferentes composições lignocelulósicas das fibras. Assim, se faz necessário primeiramente conhecer a composição da fibra do Curauá. Neste trabalho, o curauá foi produzido através da técnica de micropropagação (cultura de tecidos) e extraiu-se as fibras a partir das suas folhas. Em seguida, foi feita a caracterização com relação à sua composição (umidade, cinzas, extrativos, lignina, hemicelulose, holocelulose e celulose), além das caracterizações por espectroscopia infravermelho com refletância atenuada (FTIR-ATR), difratometria de raios X (DRX), análises termogravimétricas (TGA), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e avaliação das propriedades mecânicas (resistência a tração e elasticidade). Ao comparar os teores lignocelulósicos obtidos com os apresentados em outros trabalhos presentes na literatura, a fibra de curauá produzida *in vitro* apresentou um teor superior de celulose (77.2%) e baixo teor de hemicelulose (6.8%). A fibra também apresentou uma celulose com alta cristalinidade, o que reflete em boas propriedades térmicas e mecânicas. Em seguida, foi desenvolvido um compósito a partir da aplicação das fibras e rejeitos de polipropileno, o qual resultou em um novo produto com características morfológicas e funcionais aceitáveis pelo crivo do Design. Além do produto, mostramos que a técnica de micropropagação é altamente vantajosa para a produção em escala dessa fibra, resultando na

produção de fibras de alta qualidade para aplicação em diversos compósitos. Apresentamos também os modelos tridimensionais de solado que podem ser obtidos de compósito de fibra de curauá e resinas naturais e pré-polímero derivado do petróleo.

Palavras-chave: *Fibra de curauá, compósito, polipropileno, tampa de vedação para garrafa térmica, solado de sapato.*

Abstract

The research focuses on the use of polymeric waste and the use of vegetable fibers for the production of composites and product development (thermos bottle sealing cap and shoe soles). In this context, curauá fibers are already well known, mainly for their good mechanical properties and synergism with polymer matrices. However, each different cultivation method will result in different lignocellulosic fiber compositions. Thus, it is first necessary to know the composition of the Curauá fiber. In this work, curauá was produced using the micropropagation technique (tissue culture) and the fibers were extracted from its leaves. Then, the characterization was performed in relation to its composition (moisture, ash, extractives, lignin, hemicellulose, holocellulose and cellulose), in addition to the characterizations by infrared spectroscopy with attenuated reflectance (FTIR-ATR), X-ray diffraction (DRX), thermogravimetric analysis (TGA), scanning electron microscopy (SEM) and evaluation of mechanical properties (tensile strength and elasticity). When comparing the lignocellulosic contents obtained with those presented in other works present in the literature, the curauá fiber produced in vitro presented a higher cellulose content (77.2%) and a low hemicellulose content (6.8%). The fiber also presented a cellulose with high crystallinity, which reflects in good thermal and mechanical properties. Then, a composite was developed from the application of fibers and polypropylene waste, which resulted in a new product with morphological and functional characteristics acceptable by Design. In addition to the product, we show that the micropropagation technique is highly advantageous for the scale production of this fiber, resulting in the production of high quality fibers for application in various composites. We also present the three-dimensional models of soles that can be obtained from curauá fiber composite and natural resins and petroleum-derived

pre-polymer **Keywords:** *Curauá fiber, composite, polypropylene, sealing cap for thermos bottle, shoe sole*

Lista de Figuras

Figura 1: Resumo das atividades de pesquisa.....	24
Figura 2: Classificação das fibras naturais.	26
Figura 3: Classificação das matrizes em compósitos.	32
Figura 4: Classificação dos tipos de reforço para compósitos.	32
Figura 5: Ossos do pé.	41
Figura 6: Movimento de dorsiflexão, posição neutra e plantiflexão.	42
Figura 7: Tipos de pé: quadrado, egípcio e grego.	42
Figura 8: Tipos de pé, chato, normal e cavo.	43
Figura 9: Movimentação de joelhos, tornozelos e arco plantar no momento da marcha.....	44
Figura 10: Sequência de 7 etapas para a marcha humana. .	45
Figura 11: Métodos científicos aplicados neste trabalho....	22
Figura 12: Etapas da produção do curauá. a) Subcultivo das plântulas, b) plântulas de curauá aos 10 dias in vitro, c) plântulas de curauá, aos 40 dias in vitro, d) Aclimatização do curauá, e) curauá em fase de aclimatização na casa de vegetação, f) curauá em campo.	51
Figura 13: Processo de produção das fibras do curauá: a) desfibrilamento das folhas, b) lavagem e c) secagem das fibras.....	52
Figura 14: Fibras sendo cortadas com tesoura (A) Fibras prontas pra os ensaios (B).....	52
Figura 15: Pesagem cadinhos vazios (A) e pesagem cadinhos com fibras (B)	53
Figura 16: Estufa com circulação de ar (A) e estufa com circulação de ar com conjuntos cadinhos-fibras (B).	53

Figura 17: Cadinhos sendo resfriados em dessecador.	54
Figura 18: Amostra de fibra natural em cadinhos.	55
Figura 19: Amostras já calcinadas, resfriando a temperatura ambiente em dessecador.	55
Figura 20: Pesagem do balão (A) pesagem da fibra (B).	56
Figura 21: Sistema de extração por Soxhlet.	57
Figura 22: Extrativos com solvente (A) e processo de rotoevaporação (B).	57
Figura 23: Balão com extrativos (A) balão na estufa (B).....	58
Figura 24: Pesagem da fibra em almofariz para posterior processo de digestão em ácido.....	59
Figura 25: Fibras no almofariz com solução de ácido (A) Fibras e solução de ácido após maceração (B).....	59
Figura 26: Transferência da solução do almofariz para o balão (A) Balões com a solução no condensador (B).	60
Figura 27: Pesagem do funil (A) Kitassato conectado a bomba a vácuo para filtração do sobrenadante (B).....	61
Figura 28: Transferência da solução contida no balão para o funil.....	61
Figura 29: Banho de óleo (A) e pesagem da fibra sem extrativos e umidade (B).	63
Figura 30: Temperatura constante de 70 °C (A) Conjunto Erlenmeyer-reagentes na capela (B).	63
Figura 31: Adição de mais ácido acético (A) Pesagem do clorito (B).....	64
Figura 32: Conteúdo do Erlenmeyer sendo transferido para o funil e quantificação do teor de holocelulose.....	64
Figura 33: Conjunto funil/holocelulose (A) Holocelulose após estufa (B).....	65
Figura 34: Material utilizado para iniciar a quantificação de alfacelulose (A) e solução de NaOH à 17,5% e proveta (B). 66	

Figura 35: Solução de NaOH em contato com a holocelulose antes da maceração (A) e após maceração do material (B).	67
Figura 36: Adição da água destilada ao almofariz com celulose macerada (A) e transferência do conteúdo do almofariz para o funil e posterior quantificação.	67
Figura 37: Funil na estufa para secagem da alfa celulose (A) e pesagem do conjunto alfacelulose-funil (B).	68
Figura 38: Corpo de prova utilizados no ensaio de tração. (a) Corpo de prova antes do ensaio e (b) corpo de prova após ensaio.	69
Figura 39: Análise termogravimétrica das fibras de curauá, e da holocelulose e celulose extraídas das fibras, a) TG e b) DTG. Fonte: a autora.	81
Figura 40: Espectros obtidos na região do infravermelho para as fibras das folhas do curauá, holocelulose e celulose extraídas das fibras. Destaque para a região de impressão digital de materiais lignocelulósicos.	82
Figura 41: Difractogramas obtidos para as fibras das folhas do curauá, holocelulose e celulose extraídas das fibras.	84
Figura 42: Microscopia das fibras do curauá produzidas in vitro (A) e da celulose extraída com alto percentual ($77.17 \pm 1.18 \%$) a partir das fibras (B).	85
Figura 43: Fibra de curauá (A) e embalagens de PP pós-consumo trituradas (B).	87
Figura 44: Resíduos industriais de PP homopolímero separados em (A) cores escuras e (B) cores claras.	88
Figura 45: Fibra de curauá sendo pesada (A) e equipamento aglutinador utilizado para mistura (B).	89
Figura 46: Amostra de fibra após 7 min. no aglutinador (A) e adição do PP ao aglutinador (B).	89
Figura 47: Amostras de PP e fibra aglutinadas.	90
Figura 48: Filamento sendo resfriado e preparado para o corte (A) e equipamento responsável pelo corte (B).	90

Figura 49: Pellets fora do padrão (A) e processo de peneiramento dos pellets (B).....	91
Figura 50: Pesagem dos pellets (A), operador alimentando a injetora (B).....	91
Figura 51: Saída da dupla de peças da injetora (A), peças injetadas com fibra (B).....	92
Figura 52: Vistas do componente aplicado ao produto.....	92
Figura 53: Vista superior (A), lateral (B) e posterior (C)....	93
Figura 54: Estudo da forma dos solados.....	94
Figura 55: Formas geométricas originando a forma anatômica do pé (vista superior do pé).....	95
Figura 56: Formas ondulares originando a forma anatômica do pé (vista lateral do pé).....	95
Figura 57: Primeira proposta de solado de sapato (vista lateral).....	96
Figura 58: Segunda proposta de solado de sapato (vista lateral).....	96
Figura 59: Terceira proposta de solado de sapato (vista lateral).....	97
Figura 60: Primeira Proposta: sobreposição decrescente de painéis (vista lateral).	97
Figura 61: Terceira Proposta: sobreposição decrescente de painéis (vista lateral).	98
Figura 62: Representação para visualizar os cortes da proposta 1	98
Figura 63: Representação para visualizar os cortes da proposta 3	98
Figura 64: Blocos colados A e bloco com vista frontal B.....	99
Figura 65: Cortes perpendiculares A e processo de lixamento B	99

Figura 66: Modelo de solado da proposta 1 finalizado Fonte: a autora.....	100
Figura 67: Modelo de solado da proposta 3 finalizado	100
Figura 68: Courim aplicado no solado (A) vista frontal (B)	101
Figura 69: Cabedal com palminha e solado	102
Figura 70: Vista frontal (A), superior (B) e inferior (C)	102

Lista de Tabelas

Tabela 1: Comparação de fibras sintéticas e naturais.....	28
Tabela 2: Teor de umidade em fibras de curauá.	73
Tabela 3: Teor de cinzas encontrados em fibras do curauá.	74
Tabela 4: Teor de extrativos obtidos nas fibras do curauá.	75
Tabela 5: Teor de lignina nas fibras de curauá.....	75
Tabela 6: Teor de hemicelulose em fibras de curauá.	76
Tabela 7: Teor de celulose quantificado em fibras de curauá.	78
Tabela 8: Comparação das propriedades mecânicas (tensile strenght and elastic modulus) apresentadas por fibras sintéticas e naturais.....	79

Lista de Quadros

Quadro 1: Principais materiais utilizados na produção de solados.	36
--	----

Sumário

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Problematização.....	19
1.2 Perguntas Norteadoras	20
1.3 Hipóteses	20
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo Geral	20
1.4.2 Objetivo Específico	21
1.5 justificativa	21
1.6 Metodologia	21
1.7 Delimitação do tema	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1 Fibra de curauá.....	25
2.2 Compósito	30
2.3 Design Sustentável	31
2.3 Rejeitos poliméricos	33
2.4 Design Sustentável	36
2.5 Conceitos ergonômicos que compõe o solado	39
2.5.1 Anatomia e tipo de pé	39
2.5.2 Marcha humana	42
2.5.3 Calçado e sola	45

3 METODOLOGIA	48
3.1 Desenvolvimento dos procedimentos experimentais	49
3.2 Materiais.....	50
3.3 Experimental	50
3.3.1 Obtenção da fibra do curauá	50
3.3.2 Ensaio físico	52
3.3.3 Ensaio químico	53
3.3.4 Ensaio mecânico	68
3.3.5 Ensaio térmico	69
3.3.5 Outras caracterizações	69
4 RESULTADOO	70
4.1 Produção <i>in vitro</i>	72
4.2 Produção das fibras.....	72
4.3 Ensaio físicos	72
4.4 Ensaio químicos.....	74
4.5 Ensaio mecânicos.....	78
4.6 Ensaio térmicos	79
4.7 Outras caracterizações	81
4.8 Compósito	85
5 PROCESSOS DE PRODUÇÃO	86

5.1 Processo obtido por meio da mistura da fibra com polímero polipropileno que produz uma tampa de vedação	87
5.2 Compósito que resulta um painel para o emprego de solado de sapato	90
5.2.1 Produção do painel	93
5.2.2 Estudo da forma do solado de sapato.....	94
5 CONCLUSÃO	104
6 REFERÊNCIAS	106

CAPÍTULO 1

Introdução

Neste capítulo será apresentado a problematização da pesquisa, considerando relevante comentar sobre as perguntas norteadoras da pesquisa, as hipóteses, os objetivos, a justificativa, a delimitação da pesquisa, e, por fim, definir a estrutura do documento.

O cerne desta pesquisa incide sobre o aproveitamento de resíduos poliméricos e o emprego de fibras vegetais para o desenvolvimento de compósitos para a fabricação de tampa de vedação de garrafa térmica e solado de sapato.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

O plástico é um dos materiais mais presentes no nosso cotidiano. Muitos dos produtos que usamos diariamente contêm algum tipo de plástico como, por exemplo, escovas de dentes, potes de margarina, sacos de lixo, baldes, dentre outros. Segundo Faria e Franchetti (2010), isso se deve às suas características singulares, tais como durabilidade, atoxicidade, baixo custo, maleabilidade, capacidade de reciclagem e versatilidade de aplicação.

A produção de resinas termoplásticas no Brasil em 2020, ano de pandemia, esteve em queda, mas ainda assim chegou à marca de 7,3 milhões de toneladas (Abiplast, 2020). Gerando uma grande quantidade de rejeitos que, normalmente, são descartados em lixos domésticos e tem como destino final o meio ambiente. Esse descarte inadequado tem como consequência o desequilíbrio de ecossistemas e desastres ambientais, poluindo solos, aquíferos e acumulando lixo no mar, além de trazer diversos prejuízos a fauna, devido ao seu altíssimo tempo de degradação, permanecendo na natureza por longos anos. Todas essas consequências geram efeitos locais, regionais e globais associados à forma destrutiva da ação do ser humano sobre a natureza (Marinelli *et al*, 2008).

Recentemente, o uso de matérias-primas renováveis vem sendo alvo de muitas pesquisas na área do Design Sustentável, apoiado pela Engenharia de Materiais, principalmente quando se trata da geração de produtos com baixo impacto ambiental, onde se busca a diminuição da dependência de polímeros derivados e petróleo pela aplicação de fibras vegetais. A combinação destas fibras com polímeros usuais é conhecida como material compósito, o qual pode possuir apenas estes ou mais componentes (Spadetti *et al*, 2017). Compósitos que apresentam algum tipo de fibra vegetal têm grande potencial na substituição de polímeros reforçados com fibra de vidro, por exemplo (Santos, 2013). Outra grande vantagem é que podem promover um aumento na resistência mecânica e redução na densidade do produto (Quirino, 2010).

A região Amazônica tem uma flora extraordinariamente rica, onde seus recursos naturais são abundantes. O curauá (*Ananas erectifolius* (L. B. Sm.)) é uma planta nativa desta região, sendo da família das bromeliáceas, mesma família do abacaxi (*Ananas comosus*). Existem duas variedades distintas, o curauá roxo e o curauá branco (Santos, 2013). Embora a planta produza um fruto comestível, o grande interesse econômico pelo curauá está ligado às fibras extraídas das folhas. O curauá produz fibras de elevada resistência mecânica, especialmente quando misturadas a algum

tipo de polímero (Monteiro *et al.*, 2006). Assim, sua aplicação em um compósito poderia resultar em um produto mais resistente, com baixa densidade, boa tenacidade e boas propriedades térmicas.

1.2 PERGUNTAS NORTEADORAS

Entende-se que alguns materiais possuem propriedades predominantes e outras com menor evidência, até mesmo inexistente, como, por exemplo, o ferro, o qual é bastante resistente, porém, não apresenta baixa densidade. Não se trata de uma regra, mas em sua grande maioria, a resistência se opõe a leveza. Desse modo, os compósitos são produzidos para somar propriedades em um único material por meio de processos fabris que reúne materiais diferentes entre si. Existem materiais com boas propriedades que estão sendo descartados ou mal-empregados. Recursos naturais como as fibras possuem resistência e leveza. Então, abraçando o viés da sustentabilidade, questionamos: quais as vantagens dos materiais compósitos para o meio ambiente? Será que fazemos o aproveitamento total dos materiais extraídos da natureza? Será que a extração destes recursos naturais está equalizada com relação ao uso que faremos destes recursos? Indagamos também sobre como a gestão de resíduos poliméricos pode contribuir na redução dos impactos ambientais? Quais práticas do design podem colaborar para melhorar a gestão de resíduos poliméricos? Outra questão norteadora remete ao uso da fibra do curauá: Como a fibra de curauá se destaca entre outras fibras naturais mais conhecidas? Qual o diferencial da utilização da fibra de curauá em um compósito? A fibra resultante do curauá produzido pela técnica de micropropagação é superior às fibras do curauá plantado convencionalmente? Os questionamentos e preocupação giram em torno da sustentabilidade por motivos de identidade com o Design Sustentável e questões éticas.

1.3 HIPÓTESES

Positiva: A gestão adequada de resíduos poliméricos, associada à produção e aplicação de fibras naturais, podem contribuir para melhorar as características físicas dos compósitos, ampliando sua aplicação em produtos.

Negativa: A gestão adequada de resíduos poliméricos, associada à produção e aplicação de fibras naturais, não contribuem na melhora das características físicas dos compósitos, ampliando sua aplicação em produtos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de produtos a partir de compósito com a fibra de curauá.

1.4.2 Objetivo Específico

- Apresentar a caracterização física, química e mecânica da fibra do curauá;
- Desenvolver um material compósito aplicando resíduos de polipropileno e fibras do curauá em forma de pellets para posterior injeção e produção de um produto;
- Desenvolver compósitos em forma de placas através da aplicação das fibras do curauá e resinas para aplicação em solado de sapato;
- Mostrar aplicabilidade para os compósitos desenvolvidos.

1.5 JUSTIFICATIVA

Atualmente, a extração das fibras do curauá vem tomando papel importante por suas promissoras características físicas e mecânicas, principalmente quando em sinergia com um ou mais polímeros (Spinacé et al., 2009; Castro et al., 2012; Moraes et al., 2016). Assim, o curauá poderia se tornar fonte de matéria-prima renovável, além de resultar em compósitos com baixa densidade e alta resistência à tração, dentre outras características que colocam essa fibra no topo das fibras naturais, quando comparada às fibras mais conhecidas, tais como a juta e sisal. Abrindo um leque de possibilidades de aplicações desse compósito nos mais diversos tipos de produtos, tendo como alguns exemplos as peças de eletrodomésticos, indústria moveleira e construção civil. Neste trabalho, utilizaremos a fibra de curauá obtida a partir da técnica de micropropagação (cultura de tecidos), onde uma única muda, pode dar origem até 300 novas mudas, permitindo o uso escalonado e a aplicação industrial. Neste contexto, a presente pesquisa se justifica na medida em que busca uma forma de aplicação da fibra de curauá, combinadas com rejeito de polímeros, os quais normalmente têm como destino final os aterros sanitários, rios e mares, causando danos inestimáveis ao meio ambiente e à vida. Assim, o desenvolvimento de novos produtos sustentáveis aplicando técnicas de Design, bem como a utilização dessas fibras em escala industrial, também poderiam movimentar a bioeconomia do nosso estado.

1.6 METODOLOGIA DA PESQUISA

A natureza desta pesquisa pode ser considerada aplicada, pois além de conhecimentos científicos, também resultará em aplicações práticas. Quanto à abordagem do problema, os métodos serão qualitativos e quantitativos. Do ponto de vista da fixação dos objetivos, esta pesquisa é classificada como explicativa, pois faz uso de métodos experimentais. Do ponto de vista dos procedimentos técnicos é bibliográfica, esta vem sendo desenvolvida com base em livros, obras de referências, artigos científicos, teses e dissertações que contemplam informações teóricas e experimentais, que consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciar o objeto e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. A Figura 1 ilustra de forma esquemática os métodos científicos utilizados nesta pesquisa.

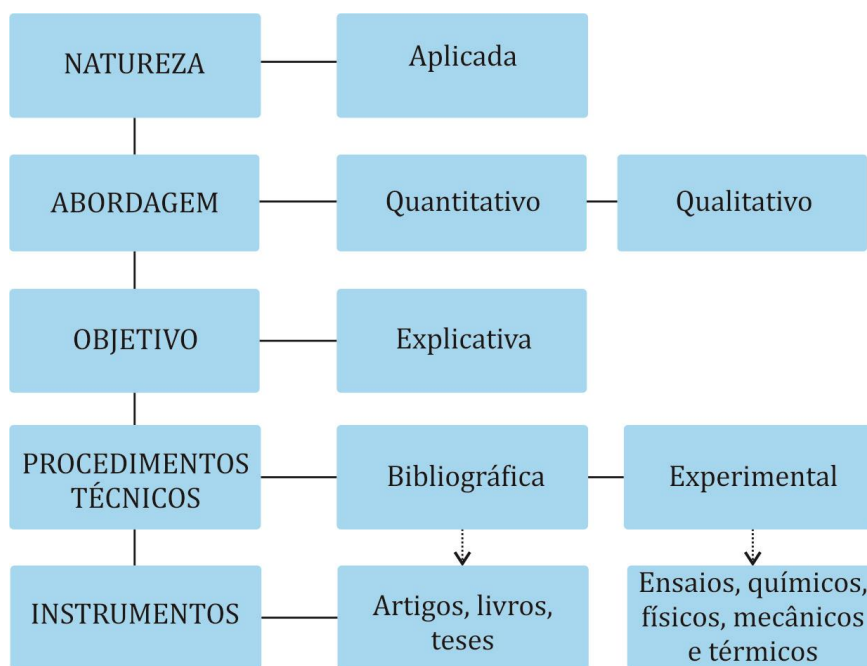


Figura 1: Métodos científicos aplicados neste trabalho.

Fonte: a autora.

1.7 DELIMITAÇÃO DO PESQUISA

Ao considerar que temas abrangidos por este estudo são de conhecimento multidisciplinar, faz-se necessário estabelecer suas limitações e abrangência em vista de se alcançar os objetivos propostos.

As fibras de curauá a serem estudadas, caracterizadas e aplicadas serão obtidas através da técnica de micropropagação (cultura de tecidos) e seus resultados serão comparados com os das fibras cultivadas de maneira convencional, diretamente em solo.

Apesar do termo polímero ser usado para generalizar os materiais plásticos, sabemos que existem inúmeros tipos de polímeros e que cada um deles, carrega características próprias que irão influenciar diretamente nas propriedades do produto final. Assim, neste trabalho será aplicado o polipropileno, também chamado de PP. Nas embalagens plásticas, ele pode ser identificado pelo número 5, onde essa numeração facilita na hora da separação das embalagens em uma possível reciclagem.

Quanto à linha de pesquisa pertinente ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Amazonas, do qual esta pesquisa faz parte, considera-se a linha de pesquisa 2: Design, Sistemas de Produtos e Processos, uma vez que se trata de um projeto envolvendo processos industriais e tecnologias de produção.

Em resumo, esta pesquisa se configura com o desenvolvimento de produtos a partir da produção de compósitos por meio de diferentes materiais e processos produtivos, mantendo as fibras do curauá cultivado pelo método de micropropagação nos dois processos (Figura 2). O motivo para a escolha deste procedimento se justifica na busca por melhorar as características física, química e mecânica da fibra. Foi produzido um compósito com as fibras do curauá e o polímero polipropileno, resultando no primeiro produto: uma tampa de vedação para garrafa térmica (peça extrusada e moldada). O outro compósito corresponde da mistura das fibras do curauá com resinas obtendo painéis por meio de processo térmico, onde essas peças serão direcionadas para o desenvolvimento de solado de sapatos. Diante destas duas alternativas do emprego das fibras do curauá para o desenvolvimento de produtos, abrem-se possibilidades para outras novas pesquisas com esta fibra e com os desafios que podem ser solucionados pelo campo do Design.

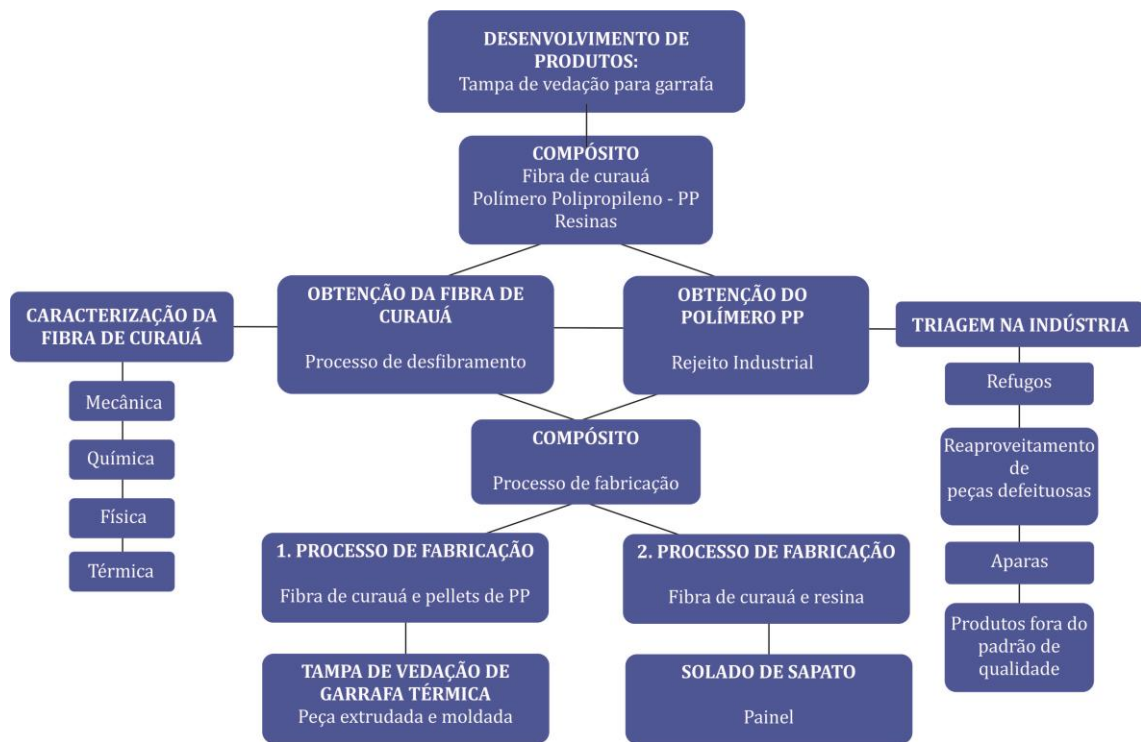


Figura 2: Resumo das atividades de pesquisa.

Fonte: a autora.

CAPÍTULO 2

Referencial Teórico

Neste capítulo se faz uma abordagem multidisciplinar dos principais conceitos que direcionam a pesquisa, fundamentando os objetivos e o problema levantado, como fibras do curauá, compósitos, rejeitos poliméricos e conceitos ergonômicos que compõe o solado.

2.1 FIBRA NATURAIS

As fibras naturais podem ser obtidas a partir de fontes vegetais, animais ou minerais, incluindo fibras celulósicas totalmente naturais, como o algodão, e fibras proteicas, como a seda (Shekar e Ramachandra, 2018).

Um panorama das fibras naturais e suas subdivisões, pode ser observado com mais detalhes na Figura 3.

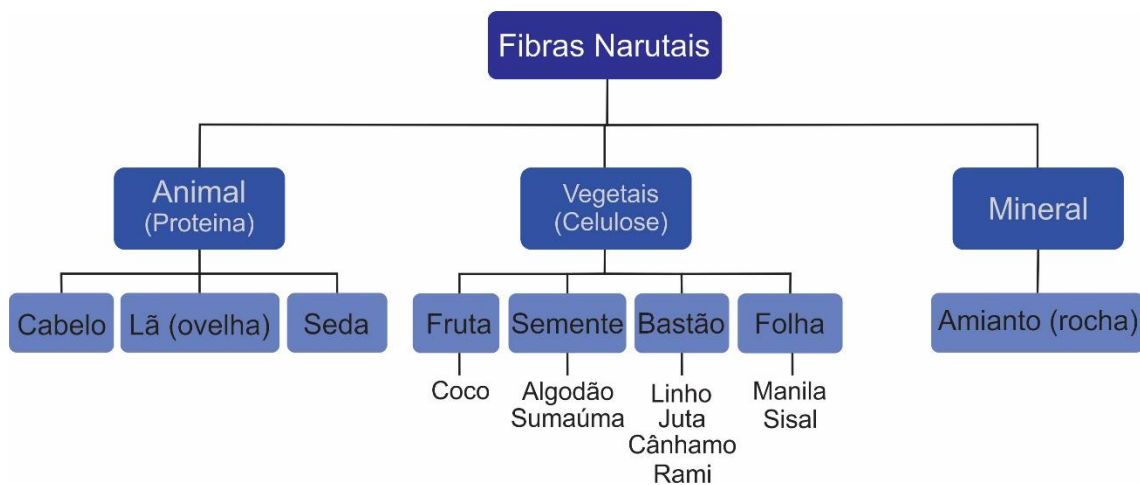


Figura 3: Classificação das fibras naturais.

Fonte: Adaptada de Shekar e Ramachandra, 2018.

Por suas propriedades, às fibras naturais têm ganhado espaço entre pesquisadores e engenheiros por conta do seu baixo custo, baixa densidade, baixa energia específica de consumo, facilidade de obtenção, tração elevada, força e rigidez, além da biodegradabilidade. As fibras naturais também não são tóxicas e podem ser modificadas quimicamente, melhorando suas características. Além disso, estão abundantemente disponíveis em várias formas em todo o mundo (Dasore *et al.*, 2021; Kuranchie, Yaya, Bensah, 2021).

Devido às suas grandes vantagens quando comparadas às fibras sintéticas, a aplicação das fibras naturais vem ganhando espaço nos mais variados setores, como na produção de automóveis, móveis, embalagens e na construção civil (Sanjay *et al.*, 2016).

Essas fibras possuem propriedades mecânicas moderadas quando comparadas às fibras sintéticas, tais como vidro, carbono, kevlar, entre outras, porém, a principal desvantagem das fibras naturais é sua alta sensibilidade à umidade (Sanjay *et al.*, 2016).

Outro benefício das fibras naturais, quando comparadas com as fibras sintéticas é que apresentam um ótimo benefício ambiental, uma vez que são consideradas neutras na emissão de CO₂ (Guanaes, 2019).

2.1.1 Fibra do curauá

Dentre as fibras naturais encontradas na região Amazônica, encontramos o curauá (*Ananas erectifolius*), o qual é uma planta nativa dessa região. Ele é da família das bromeliáceas, mesma família do abacaxi (*Ananas comosus*).

Existem duas variedades distintas de curauá, o curauá roxo e o curauá branco (Santos, 2013). Embora a planta produza um fruto comestível, o grande interesse econômico pelo curauá está ligado às fibras extraídas das folhas. Estas folhas são rígidas, eretas e com faces planas, podendo atingir mais de um metro de comprimento e quatro centímetros de largura (Monteiro *et al.*, 2006 apud Frolini *et al.*, 2000). Essas folhas singulares tornam possível a produção de fibras de elevada resistência mecânica, especialmente quando aliadas a algum tipo de polímero sintético (Monteiro *et al.*, 2006).

O curauá se destaca pela sua resistência à tração, a qual é superior à de algumas outras fibras bem conhecidas, tais como sisal, juta e coco. Ela também é econômica, uma vez que suas propriedades físicas são bem similares à alternativas mais caras, como linho, polipropileno e fibras de vidro (Salgado e Silva, 2021 e Spinacé *et al.*, 2008).

Vale ressaltar que a composição química (celulose, hemicelulose, lignina e cinzas) das fibras naturais pode variar muito, dependendo de como a planta foi cultivada, do clima, dos nutrientes presentes no solo, etc., resultando em propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas distintas (Spinacé *et al.*, 2008). Por isso se faz necessário conhecer a composição das fibras antes de aplicá-las.

Quando comparadas às fibras sintéticas, às fibras lignocelulósicas – fibras que possuem lignina e celulose e hemicelulose em sua composição química – apresentam uma grande vantagem. Por sua baixa densidade, é possível aplicá-las no desenvolvimento de compósitos mais leves. A Tabela 1 apresenta algumas das propriedades deste tipo de fibras e fibras sintéticas (Monteiro *et al.*, 2011).

Tabela 1: Comparação de fibras sintéticas e naturais.

Fibras	Densidade (g/cm³)	Tensão Máx. (Mpa)	Módulo Elástico (GPa)
Sintéticas			
Vidro	2,50 – 2,58	2000 – 3450	70 – 73
Aramida	1,44	300 – 4100	63 – 131
Carbono	1,78 – 1,81	2500 – 6350	230 – 400
Naturais			
Curauá (<i>Ananas erectifolius</i>)	0,57 – 0,92	117 – 3000	27 – 80
Buriti (<i>Mauritia flexuosa</i>)	0,63 – 1,12	129 – 254	-
Algodão (<i>Gossyioium hirsutum</i>)	1,51 – 1,60	287 – 800	6 – 13
Juta (<i>Corchorus capsularis</i>)	1,30 – 1,45	393 – 800	13 – 27
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	1,26 – 1,50	287 – 913	9 – 28
Coco (<i>Coco nucifera</i>)	1,15 – 1,52	95 – 220	4 – 6

Fonte: Adaptada de Monteiro *et al.*, 2011.

Através da Tabela 1 é possível evidenciar as características promissoras da fibra de curauá, quando comparadas até mesmo às fibras sintéticas, principalmente em relação a sua baixa densidade e alta tensão.

O emprego de fibras naturais para a produção de compósitos poliméricos contribui para a redução de problemas ambientais, já que a sua utilização reduz ou substitui materiais derivados de petróleo (Silva e Tambourgi, 2011). No entanto, para que isso ocorra são necessárias mudas para a implantação do cultivo e, conseqüentemente, a produção de fibras. Porém, o sistema de propagação de mudas convencional é lento e possui baixo rendimento, pois uma planta adulta é capaz de produzir no máximo 40 mudas por ano (Lameira, Lemos, Menezes, e Pinto, 2000) e para a produção

de 1,0 hectare são necessárias 25.000 mudas. Logo, pelo método convencional, torna-se inviável o atendimento (Gato *et al.*, 2018).

Neste contexto, a micropropagação de plantas através da produção de mudas via cultura de tecidos é uma alternativa viável para aumentar o número de mudas de uma determinada espécie e pode ser um valioso instrumento na produção clonal de mudas de curauá ao permitir a obtenção de plantas em escala comercial em curto período, com elevada qualidade genética e fitossanitária, além da isenção de pragas e doenças (Gato *et al.*, 2018). Assim, esta técnica consiste na regeneração de plantas completas (caule, folhas e raízes) a partir de gemas axilares de plantas matrizes selecionadas.

As plântulas provenientes da micropropagação podem ser aclimatizadas em diversos tipos de substratos, essa fase de aclimatização ocorre em um sistema fechado, sendo realizada em tubetes ou sacos específicos para a formação de mudas em cultivos protegidos. Durante esse período, os estresses bióticos e abióticos são baixos, em virtude do controle de temperatura, adubações, irrigação e viveiros telados (Pereira *et al.*, 2006). No campo, por se tratar de um sistema aberto, a planta é exposta a diferentes condições de estresse de acordo com o estímulo recebido do ambiente. Exemplos desses estresses é o risco da deficiência de nutrientes, o qual pode reduzir o crescimento da planta e o ataque de pragas e doenças, os quais podem fazer com que as plantas produzam espécies reativas de oxigênio, fortalecendo a parede celular vegetal através do aumento de lignina, por exemplo (de Lange, Balmer, Mauch-Mani; Turlings, 2014). No entanto, o excesso de lignificação pode acarretar prejuízos, tais como afetar o crescimento vegetal e contorcer a planta (Fan *et al.*, 2006). O fato é que sistemas abertos de produção podem causar diversos tipos de estresses, resultando no aumento da concentração de componentes do metabolismo secundário como, por exemplo, terpenos, alcaloides, flavonoides, compostos fenólicos e outros compostos secundários (Kirakosyan *et al.*, 2004). Estes compostos estão diretamente relacionados ao teor de lignina, a qual é responsável pela rigidez dos vasos condutores e sistema vascular (Parizotto *et al.*, 2015).

Assim, diversas fibras vem sendo trabalhadas de forma a aumentar a produção em escala, evitando-se o plantio de culturas insalubres, tais como a juta. Neste contexto, o curauá vem se destacando por ser uma planta amazônica, extremamente adaptada às condições tropicais e solos ácidos.

Com relação à aplicação dessas fibras naturais, Spinacé *et al.*, 2009 desenvolveram compósitos utilizando PP reforçados com fibras de sisal e curauá. Eles observaram que as densidades dos compósitos reforçados com fibra de curauá e de sisal foram 1100 (\pm 91) e 1588 (\pm 11) kg.m⁻³,

respectivamente. Esses valores são comparáveis à outras fibras vegetais como a fibra da palmeira (1030 kg.m^{-3}), coco (1150 kg.m^{-3}), algodão ($1500\text{-}1600 \text{ kg.m}^{-3}$) e banana (1350 kg.m^{-3}), o que reforça a leveza dos compósitos obtidos com o curauá. Neste mesmo estudo, as fibras do sisal e do curauá apresentaram diâmetro médio (\varnothing_m) de 235 e 60 μm , respectivamente. Contudo, o valor de tensão na força máxima da fibra do curauá foi quase o dobro do valor para a fibra de sisal e as propriedades mecânicas dos compósitos usando as fibras de sisal como reforço foram inferiores quando comparadas aos compósitos com fibras de curauá.

Similarmente, Mano *et al.*, 2006 prepararam compósitos de PP com fibras do curauá (distribuição bimodal de 0,10 e 0,35 cm de comprimento) usando o polipropileno enxertado com anidrido maleico (PP-g-AM) como compatibilizante. Eles observaram que o uso de PP-g-AM promoveu uma melhor adesão entre o PP e a fibra, produzindo compósitos com propriedades mecânicas melhoradas.

Veloso de Carvalho *et al.*, 2021 propuseram modificações utilizando a fibra de curauá com o objetivo de aumentar aderência entre as fibras vegetais e as matrizes à base de cimento. Eles aplicaram como fibras de reforço as fibras de curauá hornificadas (HF) modificadas com polianilina (HF-PAni), magnetita (HF-Mag) e ambas (HF-PAni/Mag). Os materiais obtidos foram testados quanto à compatibilidade de adesão com a matriz de cimento Portland através de ensaio de arrancamento da fibra e análise microestrutural. As fibras foram modificadas e os resultados dos valores de retenção de água mostraram uma redução na capacidade de absorção de água para todas as fibras tratadas. Além disso, os resultados mecânicos da amostra HF-PAni mostraram boas respostas de resistência à tração. Com o revestimento do híbrido HF-PAni/Mag, os resultados do teste de arrancamento indicam uma melhora significativa na adesão fibra-matriz, resultando em um aumento de 40% na tensão de adesão em relação à fibra hornificada (HF), indicando ganho de estabilidade dimensional, principalmente para as amostras de cobertura de PAni devido à impermeabilização da fibra promovida pelo polímero hidrofóbico.

Outro compósito foi desenvolvido aplicando o biopolietileno de alta densidade (PEAD) como matriz, o qual foi obtido em escala industrial por polimerização de etileno derivado do etanol de cana-de-açúcar, e como reforço as fibras de curauá (5, 10, 15 e 20 % em peso, 1 cm). Os óleos de mamona (CO) e canola (CA) foram utilizados na preparação de compósitos (5, 10, 15 e 20 % em peso) como potencial compatibilizador das fibras polares e da matriz apolar para facilitar o respectivo processamento e intensificar as interações entre o polímero e a interface do material de reforço. Os resultados indicaram que a incorporação de óleos em várias composições, principalmente o CO, indicando o potencial do óleo como compatibilizante na interface

fibra/matriz, além de geralmente resultar em propriedades melhoradas em relação ao compósito polietileno de alta densidade/fibra sem compatibilizador (Castro *et al.*, 2016).

Sisti *et al.*, 2018 apresentaram em seu trabalho o potencial de reforço de fibras de curauá tratadas enzimaticamente em compósitos biodegradáveis à base polibutileno succinato (PBS), onde eles avaliaram a aplicação de duas diferentes enzimas (celulase e pectinase). Os tratamentos enzimáticos resultaram em mudanças significativas na morfologia das fibras do curauá, enquanto sua estabilidade térmica e cristalinidade não foram muito afetadas. A investigação por microscopia das superfícies fraturadas por tração mostrou forte adesão entre as fibras e a matriz.

Silva *et al.*, 2018 investigaram o comportamento balístico de uma resina de poliéster termofixo, onde o composto híbrido laminado foi reforçado com um tapete de fibra natural (curauá) e tecido de aramida após exposição à radiação UV. Os resultados mostram que o compósito é influenciado pela radiação UV, afetando o desempenho balístico devido à delaminação das camadas na interface, bem como na cisão da cadeia nas fibras de curauá e no aumento da reticulação da resina de poliéster. A delaminação foi atribuída a uma baixa energia interfacial entre a matriz de poliéster e as fibras de curauá.

2.2 COMPÓSITOS E BIOCOMPÓSITOS

Quando dois ou mais materiais que possuem diferenças físicas e químicas são combinados entre si a fim de formar um único material, são chamados de compósitos ou material composto (Shekar e Ramachandra, 2018).

Os compósitos geralmente apresentam uma ou mais fases descontínuas envolvidas por uma fase contínua. A fase descontínua (reforço) normalmente é a fase com maior rigidez e resistência, quando comparada à fase contínua (aglomerante), também chamada de matriz. Com o intuito de garantir e assegurar o reforço, geralmente aplica-se uma fração volumétrica substancial da fase descontínua (Menezes, 2018).

Quanto à classificação do compósito com base nos materiais da matriz, pode-se organizar da maneira expressa na Figura 4.

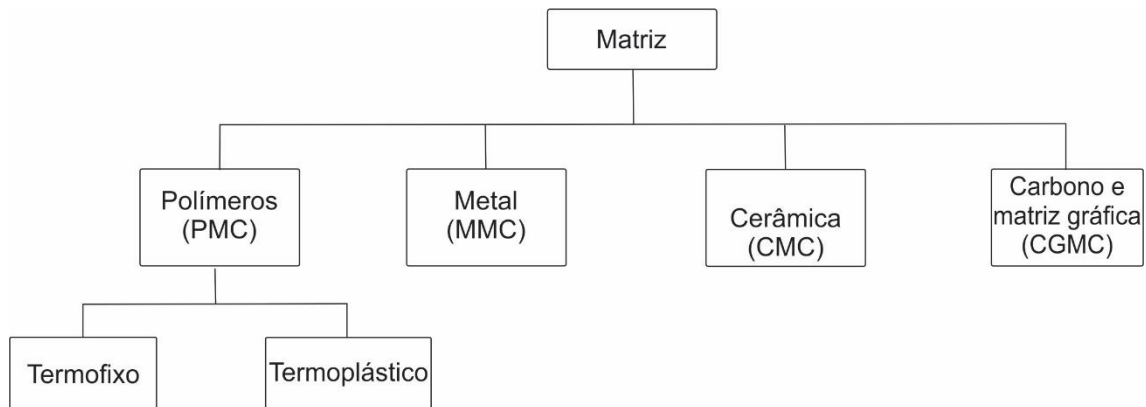


Figura 4: Classificação das matrizes em compósitos.

Fonte: Jahan e Soni 2021.

A função da matriz é manter as partículas de reforço no lugar e servir de sustentação. O reforço, por sua vez, tem como objetivo melhorar as características mecânicas da matriz. Uma ampla gama de características pode ser adquirida ao se combinar reforços e matrizes diferentes, visando alterar as características do material e preencher os requisitos específicos de cada projeto (Johan e Soni, 2021).

Com base em materiais de reforço, compósitos podem ser classificados como mostra a Figura 5.

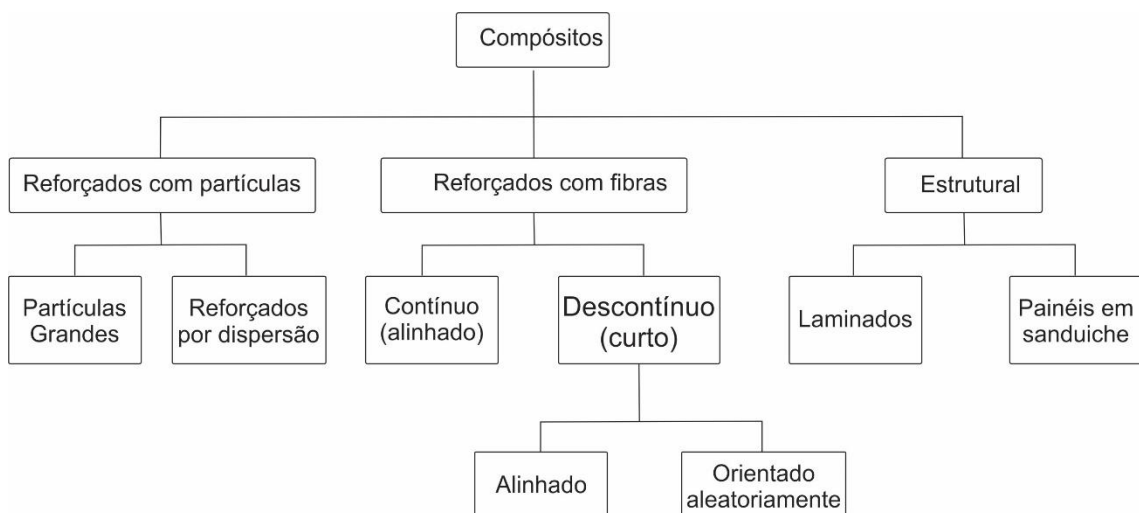


Figura 5: Classificação dos tipos de reforço para compósitos.

Fonte: Callister 2000.

A Figura 4 aponta os três tipos de reforços de compósitos: partículas, fibras e estruturas. Contudo, neste trabalho será aplicado as fibras do curauá como reforço. Nos materiais compósitos as fibras (natural ou sintética) são a parte responsável pela resistência mecânica enquanto a matriz tem como principal função a transmissão dos esforços entre as fibras (Menezes, 2018).

Os compósitos de matriz polimérica (PMC) são bem conhecidos por seu preço acessível e fácil produção, levando seus fabricantes a criarem produtos mais econômicos. Os PMCs consistem em um plástico termoplástico ou termoendurecível podendo ter um ou mais reforços, como carbono, vidro, aço e fibras naturais. As principais aplicações desses compósitos são em foguetes, aeronaves e equipamentos esportivos. Cada procedimento de fabricação irá definir as características do produto a ser fabricado, permitindo que o fabricante ofereça a melhor opção para o consumidor. Algumas de suas características são: peso leve (baixa densidade), alta resistência, excelentes propriedades de impacto, compressão e fadiga, além dos processos de produção e ferramentas de baixo custo, excelente resistência química e à corrosão. (Sharma *et al.*, 2019)

Os materiais compósitos que apresentam propriedades específicas podem ser classificados como:

- a) compósitos verdes ou biocompósitos visto serem constituídos por fases de origem natural, e, portanto, o seu desenvolvimento é primordial na redução dos impactos ambientais causados pelo intenso consumo de materiais sintéticos obtidos a partir de fontes fósseis, além de diminuir o acúmulo de resíduos naturais permitindo valorizar de forma sustentável a cadeia de produção agrícola e também na intenção de se reduzir custos de produção dos materiais plásticos;
- b) os compósitos híbridos que se configuram a partir de uma mistura de fibras sintéticas e/ou naturais modificadas (John e Thomas, 2008).

O desdobramento de biocompósitos reforçados com fibras naturais se alia à novas tendências de desenvolvimento sustentável, intensificando a produção de materiais ambientalmente corretos, reduzindo o uso de recursos não renováveis. A fim de tornar economicamente viável e ambientalmente favoráveis, estes novos materiais passam pela adaptação de técnicas consagradas de fabricação de compósitos aliando-se às propriedades peculiares e intrínsecas das fibras naturais (Pimentel *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*, 2015).

Esses biocompósitos são utilizados em várias indústrias devido à baixa densidade, sua disponibilidade em abundância, baixo custo e também por possuírem excelentes propriedades mecânicas. Existem várias fibras naturais conhecidas, como a juta, cânhamo, linho, coco, sisal,

banana, abacaxi, rami, bagaço etc., que são utilizados para o reforço em compósitos (Jahan e Soni, 2021).

Rodrigues *et al.*, 2015 demonstraram em seu trabalho a utilização da técnica de infusão de resina, compósitos de matriz de poliéster insaturado reforçados com fibras de curauá, juta e palha da costa, os quais foram dispostos na forma de tecidos em estilo plano e fios alinhados. Os compósitos foram produzidos sobre dois diferentes níveis de vácuo. Os resultados apontaram que o processo de infusão possibilitou a fabricação de compósitos com até 45% de fração volumétrica de fibra, com porosidade em torno de 2% e excelente estabilidade dimensional. Verificou-se ainda que, no geral, a elevação do nível de vácuo alterou significativamente as condições de compactação dos reforços, alterando, a depender da estrutura da fibra utilizada, a eficiência da interface matriz/reforço.

Chandramohan e Kumar, 2017 apresentaram um estudo experimental sobre o desenvolvimento de biocompósitos. Foram usados como reforço, a casca de coco em pó, cascas de noz e casca de arroz, com resina bio-epoxi para compósitos híbridos. Os compósitos fabricados foram analisados em relação à resistência à tração, resistência à flexão, resistência ao cisalhamento e impacto da força, onde estas propriedades foram avaliadas em ambiente com e sem a presença de umidade. Os resultados dos testes mostram que esse composto híbrido tem melhores propriedades do que um único composto reforçado com fibra de vidro sob cargas mecânicas.

2.3 REJEITOS POLIMÉRICOS

O avanço de novas tecnologias aliado à vida moderna tem causado um aumento significativo na produção de resíduos sólidos. Esses por sua vez, permanecem por centenas e milhares de anos no meio ambiente. Contudo, seus efeitos vão muito além de questões ambientais, mas também econômico e social. O grande consumo de produtos industrializados, como produtos alimentícios que necessitam de embalagens (primárias, secundárias e terciárias), resulta no acúmulo de resíduos sólidos e, conseqüentemente, em impacto ambiental (Landim, 2016). Uma significativa parte dessas embalagens produzidas contém algum tipo de polímero (plástico) em sua composição. Para se produzir o plástico, necessita-se da nafta, que por sua vez é obtida durante o refino do petróleo (Machado, 2002).

Os polímeros dividem-se em dois grandes grupos, termoplásticos, que não sofrem alterações químicas quando aquecidos e quando resfriados, podem novamente passar pelo processo de fundição, podendo ser remoldados. Os termofixos, por sua vez, são aqueles que sofrem reações

químicas em sua moldagem as quais impedem uma nova fusão, portanto não são recicláveis (Landim, 2016).

Durante a pandemia da Covid-19, no Brasil, a produção física da indústria geral de plásticos sofreu um recuo de (-4,5%) em 2020 com relação a 2019. No setor de transformados plásticos houve crescimento de 2,4% em 2020 com relação a 2019 na produção física, sustentado pelo segmento de embalagens e de tubos e acessórios para construção civil (Abiplast 2020).

Embora a produção anual tenha fechado em queda, o número é ainda bem grande, chegando a marca de 7,3 milhões de toneladas de produção física em 2020, sendo apenas 838,5 mil toneladas de resinas plásticas pós consumo, recicladas (Abiplast 2020).

Dentre os polímeros mais utilizados nesta produção de plásticos, destacam-se o polipropileno (PP), polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET), os quais correspondem a 90% da demanda de plástico no mundo. A grande busca por esses materiais é em função do seu baixo custo, alta durabilidade, resistência à radiação, produtos químicos, pressão, dentre outros (Andrady e Neal, 2009; Caixeta *et al.*, 2018).

O principal polímero consumido no Brasil em 2020 foi o polipropileno – PP, representando 20% do total consumido neste ano (Abiplast 2020). O PP é um tipo de termoplástico produzido a partir da família dos alcenos (moléculas lineares com dupla ligação) e se destaca por sua versatilidade e suas propriedades de não toxicidade, leveza, baixo custo de produção e facilidade de processamento e, o mais importante de tudo, o PP é reciclável (Lanzim e Samat, 2019; Thomas, 2012).

Devido à sua ampla aplicabilidade em utensílios domésticos, componentes automotivos, equipamentos de laboratórios, embalagens, dentre outras, seu enorme volume pós-consumo tem gerado em todo o mundo grandes quantidades de resíduos sólidos urbanos (Thomas, 2012). Porém, analisando de uma outra perspectiva, características relevantes, tais como alta estabilidade química, rigidez, dureza, tenacidade, resistência ao calor e propriedades mecânicas ainda permanecem no PP já utilizado, colocando-o como um resíduo ideal para ser reciclado e que tem grande potencial de ser usado como matriz compósita de alto desempenho (Ramos *et al.*, 2020).

Apesar de apresentar características singulares que permitem ao PP a sua reciclagem, a maior parte dos plásticos com esse polímero é destinada aos aterros. Estes permanecem no meio-ambiente ao longo de 20 a 30 anos, período para sua decomposição. Levantando assim, graves problemas ambientais, principalmente pela presença de aditivos no PP, os quais podem ser

compostos por metais altamente tóxicos como chumbo e cádmio. A incineração também não é uma boa alternativa pois pode liberar dioxinas e vinil cloreto, ambos venenosos (Thomas, 2012).

Dada a sua flexibilidade, o PP pode ser reciclado em muitos produtos diferentes, incluindo: fibras de roupas, fibras industriais, recipientes para alimentos, louça, entre outros (Thomas, 2012).

A reciclagem do PP ainda resulta em outras grandes vantagens, tais como a diminuição do uso de recursos brutos finitos como petróleo e gás propano, onde o consumo de energia pode ser reduzido em 88% quando o plástico é produzido a partir de plástico. Sendo assim, a reciclagem do polipropileno vem como uma opção importante e economicamente viável em grande escala (Thomas, 2012).

Assim, tendo as atividades humanas e industriais como as principais fontes de inserção de plásticos no ambiente, onde estes materiais correspondem de 60 a 80% dos detritos encontrados nos oceanos (Carvalho e Baptista Neto, 2016; Caixeta *et al.*, 2018).

Recentemente, tem se observado uma preocupação ambiental, não apenas com resíduos poliméricos maiores, mas também partículas inferiores a 5 mm, denominadas microplásticos, que são reduzidas decorrente a fatores como temperatura, umidade, salinidade e radiação UV. Essas intempéries permitem a “erosão” do plástico, transformando-o em nano ou micropartículas que chegam aos ambientes aquáticos e são ingeridos pelos animais, sendo repassados por toda cadeia alimentar (Rajam e Goel, 2021).

Essas partículas têm sido identificadas em amostras ambientais de água e sedimento coletados em rios, lagos, mares e oceanos. A presença de microplásticos no meio ambiente representa uma ameaça para a biota, devido ao seu tamanho muito reduzido, possuem maior distribuição, podendo atingir até áreas remotas, e se tornam disponíveis para uma grande variedade de organismos desde os níveis tróficos inferiores e também por sua vasta área de superfície, podendo adsorver compostos altamente tóxicos, tais como hidrocarbonetos e metais pesados (Olivatto *et al.*, 2018; Caixeta *et al.*, 2018).

Essas minúsculas partículas de plástico têm se tornado um problema eminente. Nesta corrente década em diversas pesquisas começaram a se preocupar com o plástico degradado, visto que já foram encontrados em animais muito consumidos (peixes principalmente), na água em que bebemos (Endereço eletrônico, G1), PET e PP em placenta de mulheres grávidas e nano e micropartículas de PET (de garrafas plásticas), polietileno (usado em embalagens de alimento e sacolas de supermercado), polímeros de estireno (isopor) e polipropileno (embalagens e rótulos de produtos) até na corrente sanguínea humana de 80% dos doadores de sangue (Leslie *et al.*, 2022)

Os efeitos da presença desses plásticos no corpo humano ainda estão sendo revelados. O que se sabe até agora é que eles podem se acumular em alguns órgãos (Leslie et al., 2022) e que sofrem várias biotransformações no trato gastrointestinal e no cólon, além de reduzir as culturas bacterianas presentes na microbiota intestinal, o que pode causar diversas outras consequências (Tamargo et al., 2022). Além do plástico em si, diversos aditivos presentes neles também podem causar sérios problemas, por exemplo, alterando a programação fetal em um nível epigenético (alterações do DNA que não modificam sua sequência, mas afetam a atividade de um ou mais genes), o que pode ser transmitido por gerações e pode desempenhar um papel no desenvolvimento de vários distúrbios crônicos mais tarde na vida, como doenças metabólicas, reprodutivas e degenerativas, bem como algumas formas de câncer (Gruber, et al.,2022).

Em virtude de tantos problemas, é urgente a necessidade de reduzir a produção de plásticos através da reciclagem os plásticos já existentes ou até mesmo do desenvolvimento de biocompósitos, diminuindo a dependência desses plásticos derivados de petróleo, além de torná-los mais “verdes”.

2.4 DESIGN SUSTENTÁVEL

Devido ao crescimento do descarte inadequado de resíduos sólidos, o que provoca danos ambientais, vem aumentando a necessidade de alternativas para o reaproveitamento desses resíduos, afim de gerarem produtos que reforcem a proposta sustentável (Azevedo, dos Santos e Santos, 2016).

Como resultado do uso intenso dos recursos renováveis e não renováveis, nos mais diversos ecossistemas, trouxe consigo o desgaste ambiental, justificando o aumento das preocupações com o planeta, fazendo com que o conceito de sustentabilidade expandisse em muitas áreas do conhecimento, passando a fazer parte do universo do design de produtos. Este termo foi adicionado às muitas especialidades desta área bem como foi criada a expressão design sustentável, referindo-se à capacidade do sistema produtivo de se preocupar com a procura social de bem-estar utilizando uma quantidade de recursos ambientais drasticamente inferior aos níveis atualmente utilizados (Manzini, Vezzoli, 2008).

Por outro lado, segundo Lobach, 2001, o design consiste em uma solução projetual para um problema determinado. Sendo assim, o design incide na apresentação na forma de projetos ou modelos, mediante a construção e configuração resultando em um produto industrial que pode ser factível de escalonamento.

Com essa demanda sustentável emergente da atualidade, o design deve considerar para produzir produtos, tanto as necessidades humanas quanto requisitos ambientais no processo de desenvolvimento (Mesacasa, 2011). Essa questão vem a ser um fator de muita relevância no projeto, pois a busca por soluções que promovam o baixo impacto ambiental, pode ser o grande diferencial em um projeto de produto (Azevedo, dos Santos e Santos, 2016).

Para Sun, Guo e Lin, 2022, com intuito de melhorar ou mudar o modo de vida da atualidade, novos métodos de design sustentável são incessantemente propostos, visando evitar danos irreparáveis como: danos sociais, ambientais e ecológicos. Trazendo estratégias reversíveis típicas para alcançar maior sustentabilidade no desenvolvimento de produtos proposto, incluindo Remanufaturar, Reduzir, Reutilizar e Reciclar (4R). Colocando em prática o design sustentável de forma eficaz.

Devido a uma nova conscientização com questões ambientais e a busca por inovações, o movimento da sustentabilidade está ganhando mais espaço dos designers, podendo estes, exercer várias funções em iniciativas de sustentabilidade, conectando e integrando inspirações em dimensões ambientais, sociais e tecnológicas relacionando seus produtos, uso, serviços e modelos de negócios (Wan e Lin 2022).

Considerar o conceito de ciclo de vida dos produtos, faz com que o design sustentável aborde corretamente o conceito ecologicamente correto. Avaliar cada etapa deste ciclo é de suma importância e traz muitos desafios aos designers, como controlar o uso de material sintético ou aumentar o uso de recursos renováveis, reduzir emissões tóxicas, trazendo eficiência na produção. Os projetistas, devem considerar ainda o desperdício de consumo e a reciclabilidade, nas etapas de uso e recuperação (Wan e Lin 2022). Suas decisões projetuais, impactam a fabricação, distribuição, uso e descarte do produto, trazendo uma consciência efetiva de impactos positivos e negativos de cada tomada de decisão (Watkins *et al.*, 2021).

Para que os produtos contribuam para a sustentabilidade exige-se não apenas que os impactos socioecológicos do ciclo de vida sejam considerados nos estágios iniciais do processo de inovação do produto, mas que sejam mantidos como requisitos integrais do produto (Watz e Hallstedt, 2022). Aproximadamente de 80% do impacto ambiental de um produto é determinado nas fases iniciais (de design) do processo de desenvolvimento do produto (McAloon e Bey, 2009).

A sustentabilidade, dentro do design de produto, é a capacidade de um produto permanecer a trabalhar com o mínimo impacto no meio ambiente, paralelamente que fornece um design ideal e benefícios econômicos para o produtor. Nos últimos dias, a pesquisa sobre design de produto sustentável concentra-se principalmente no desenvolvimento de eco-design dentro da indústria

(Sun, Guo e Lin, 2022). Segundo Watz e Hallstedt, 2022, mesmo com a pesquisa oferecendo infinidade de abordagens, métodos e ferramentas para a elaboração sustentável de produtos, a implementação na indústria permanece baixa.

Segundo Watkins *et al.*, 2021, para a tomada de decisões informadas e responsáveis em sua prática, a fim de melhorar o desempenho social e ambiental de suas criações, comunicando efetivamente o valor de tais decisões dentro de um contexto comercial é imprescindível a educação em design de produto sustentável, sendo fundamental para desenvolver o conhecimento, as habilidades e a responsabilidade necessárias para as futuras gerações de designers de produto e seus educadores.

O conceito de sustentabilidade indica que deve se ter um processo a seguir, definindo limites às possibilidades de crescimento. Trazendo diversas iniciativas e participantes sociais que pratiquem por meio da educação, processo e diálogos de valor ético no sentido de co-responsabilizar para uma sociedade mais sustentável. Com este avanço, encontramos alguns percalços, no que diz respeito a modelos de desenvolvimento já existentes, apontando desafios a sociedade para encontrar um caminho e delinear a necessidade de objetivos e soluções para uma mudança de consciência ambiental generalizada (Mauro e de Borba, 2015).

O design de produto sustentável, portanto, atua no contexto da crescente preocupação com a degradação do planeta, a disponibilidade de recursos para as gerações futuras e o impacto desses fenômenos no homem e na sociedade (Watkins *et al.*, 2021).

Neste sentido, havia um problema em questão: a quantidade de plástico do tipo PP gerada por uma indústria do polo industrial de Manaus, inerente ao seu processo fabril, gerando ferugos, aparas e peças fora do padrão de qualidade.

A solução em questão, precisa atender alguns dos requisitos acima explanados, como baixo impacto ambiental, com a reciclagem de resíduos plásticos que poderiam ser descartados, controle do uso de materiais sintéticos, através do uso dos resíduos, diminuindo a quantidade de plástico mensal utilizada e o uso de recursos renováveis, como a fibra do curauá.

Como é do conhecimento de todos, muitas pesquisas têm sido feitas e soluções eficientes ficam, na maioria das vezes, no campo teórico. Pouquíssimo do que tem sido produzido no campo científico é de fato implementado na indústria. Esse grande desafio projetual foi superado, haja vista que a solução projetual proposta, pôde ser testada e avaliada pela indústria em questão.

2.5 CONCEITOS ERGONÔMICOS QUE COMPÕE O SOLADO

O pé humano se caracteriza como uma complexa estrutura que trabalha no suporte do corpo, recebendo e distribuindo cargas. Este é indispensável para a locomoção e estabilidade corporal. Os pés se caracterizam como uma complexa e importante estrutura dos membros inferiores. Eles são de suma importância para a marcha, possuindo diversas funções no corpo, como apoio de propulsão, estabilidade, absorção e manutenção de impactos (Dorneles, 2011).

A locomoção se inicia com o caminhar e se faz necessária tanto nas atividades diárias, quanto nas atividades de lazer ou esportivas. Ao apoiar o peso corporal sobre os pés, a força de gravidade ativa um estímulo muscular, o qual faz com que nosso corpo mantenha o equilíbrio nessa pequena base de suporte constituída pelos pés. Neste processo, é possível observar a função biomecânica do pé durante a fase de apoio da marcha, a qual constitui o toque do calcanhar até a retirada do hálux do solo (Dorneles, 2011).

A marcha é uma atividade cíclica e que possui muitas variáveis, tais como deslocamento, forças de reação do solo e atividade muscular, sendo estas consideradas como uma função do ciclo. Esse processo cíclico envolve a integração de informações sensoriais intrincadas dentro do sistema nervoso, resultando em comandos motores para controle muscular e movimento articular subsequente (Vaughan *et al.*, 1999).

Dos diversos elementos que compõem o calçado, o solado é a parte que deve suportar pressões e impactos, como aqueles que ficam em contato direto com o solo quando o calçado é inadequado aos aspectos biomecânicos do pé, podendo ocorrer desconfortos e/ou lesões (Menin, 2007 e Wang, 2010).

2.5.1 Anatomia e tipo de pé

O pé humano é uma estrutura complexa formada por 26 ossos irregulares e articulados entre si, além de 20 músculos, 107 ligamentos e 31 articulações. Ele é dividido na parte óssea em tarso, metatarso e falanges, ou retopé, mediopé e antepé, conforme pode ser observado na Figura 6. O pé é o seguimento terminal do membro inferior, que forma um ângulo (quase) reto com a perna (Menin, 2007). Dividido, esse membro possui dois tipos de arcos, um longitudinal (formado por um arco medial e um lateral) e outro transverso (constituído por um arco proximal e um distal) (Dorneles, 2011).

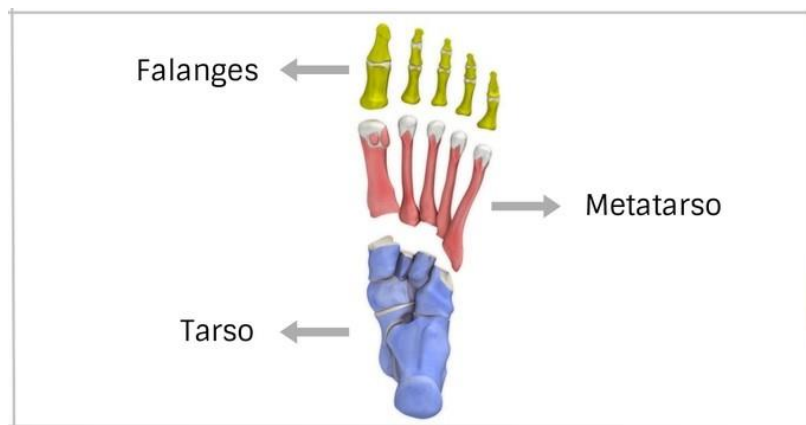


Figura 6: Ossos do pé.

Fonte: Endereço eletrônico – Toda matéria.

Alguns principais movimentos que podem ser realizados pelo pé são:

- Dorsiflexão ou flexão dorsal: movimento de aproximação da face anterior (dorso) do pé em direção à perna (Dangelo e Fattini, 2007);
- Plantiflexão ou flexão plantar: movimento que afasta o pé da perna (Dangelo e Fattini, 2007);
- Inversão: quando se coloca o peso na borda lateral do pé (Floyd e Thompson, 2002);
- Flexão: consiste em mover os dedos em direção à superfície plantar do pé (Floyd e Thompson, 2002);
- Extensão: consiste no afastamento dos dedos em relação à superfície plantar do pé (Floyd e Thompson, 2002).

Na Figura 6 é possível observar a ilustração de dois dos movimentos supracitados, dorsiflexão ou flexão dorsal e plantiflexão ou flexão plantar.

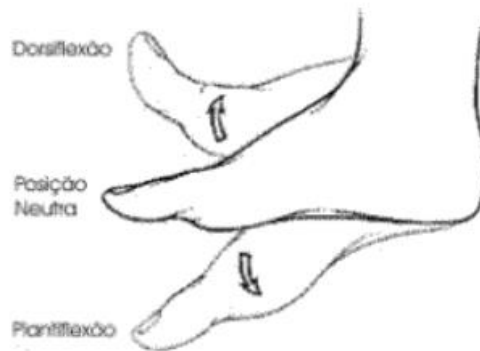


Figura 7: Movimento de dorsiflexão, posição neutra e plantiflexão.

Fonte: Grüdtner, 2008.

Por conta dessa complexidade estrutural dos pés, eles podem receber classificações de acordo com alguns aspectos, onde a forma e o tipo do pé são determinados pelo comprimento dos dedos (forma digital) dos pés e, com base nisso, existem três tipos básicos de pés: quadrados, egípcios e gregos (Figura 8).

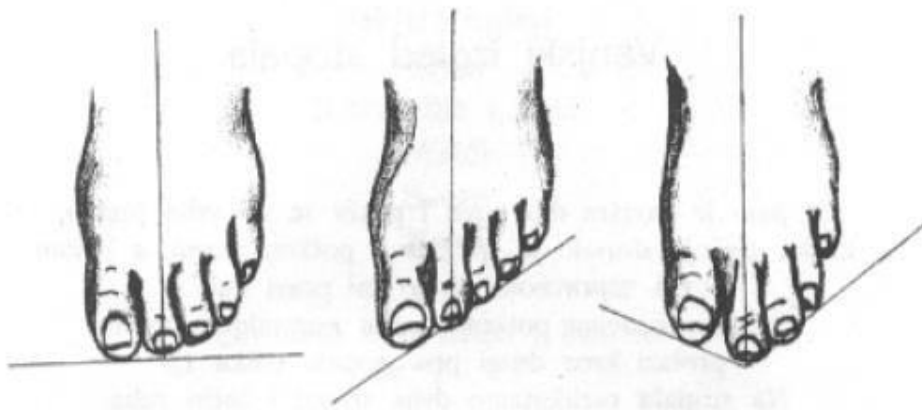


Figura 8: Tipos de pé: quadrado, egípcio e grego.

Fonte: NURKOVIĆ *et al.*, 2020.

Com base na Figura 8, é possível identificar as mudanças anatômicas em cada um tipo de pé (Silva, 2017).

Apesar de toda forma digital ser considerada normal, alguns deles apresentam uma correlação com problemas ortopédicos, como é o caso do pé egípcio, que tem maiores ocorrências de halux

valgo, também conhecido popularmente como joanete. Por outro lado, a maior queixa do pé do tipo grego está relacionada à acomodação em palmilhas e à estética no uso de sandálias que deixam os pés à mostra (Silva, 2017; Nurković *et al.*, 2020).

Uma outra classificação mediante à altura do arco plantar, categoriza os pés como planos/chato (arqueado baixo com retropé valgo e/ou antepé varo), reto/normal (retropé e antepé bem alinhados), e cavo (arqueado alto com retropé em varo e/ou antepé valgo). Estes formatos podem ser identificados na Figura 9, onde podemos supor as diferenças nas pisadas de cada formato de pé (Hillstrom *et al.*, 2013).



Figura 9: Tipos de pé, chato, normal e cavo.

Fonte: Endereço eletrônico: Pé sem dor.

Essas diferenças também têm relação com o tipo de pisada que cada pessoa tem, pois para se adaptar a terrenos diferentes os sensores presentes na planta enviam informações ao sistema nervoso, repercutindo na adaptação do apoio plantar de forma a encontrar a posição mais adequada (Silva, 2017).

O pé chato é um dos tipos de pé que mais sofre com calçados, pois, muitas vezes, quando estes são desenvolvidos, não se leva em consideração esse tipo de pé. Outro problema anatômico muito comum no pé humano é o joanete (ou Hallux Valgus), causado pela contínua pressão exercida sobre o grande artelho lateralmente em calçados estreitos e bicudos. O joanete é caracterizado como uma patologia que, em alguns casos, exige intervenção ortopédica ou cirúrgica (Valente e Paschoarelli, 2009).

2.5.2 Marcha Humana

Os pés evoluíram a fim de ser a base para a marcha, sendo a espécie humana, dominante na locomoção bípede entre outras espécies (Franklin *et al.*, 2015). Sua principal função é suportar o peso do corpo e espalhar as forças experimentada durante a marcha. Para isso os ossos são

organizados para formar um arco longitudinal medial que o torna ideal para essa função (Mackeen, 2015). Além da estrutura óssea, há um complexo conjunto de músculos internos e externos do pé que se combina com o sistema somestésico para controlar o equilíbrio e o movimento. Na Figura 10 é possível observar as variações de amplitude nos joelhos, tornozelos e no arco plantar para que a marcha ocorra (Kavounoudias *et al.*, 2001).

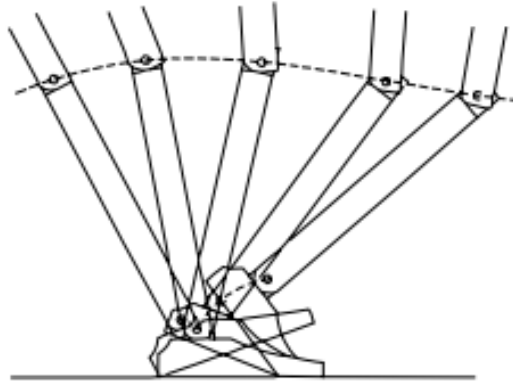


Figura 10: Movimentação de joelhos, tornozelos e arco plantar no momento da marcha.

Fonte: Vaughan, 1992.

O processo em que estamos mais interessados observar tem como principal característica uma abordagem baseada na causa e efeito que inicia como um impulso no sistema nervoso central e termina com a geração de solo forças de reação (Vaughan *et al.*, 1999). Assim, uma sequência de processos relacionados à marcha tem início com reconhecimento da programação locomotora que ocorre na região supraespinal central e envolve a conversão de uma ideia no padrão de atividade muscular, que são primordiais para andar (Vaughan *et al.*, 1999).

Segundo Vaughan *et al.*, 1999, a sequência para que a caminhada ocorra pode ser resumida da seguinte forma:

1. Registro e ativação do comando de marcha no sistema nervoso central sistema;
2. Transmissão dos sinais de marcha para o sistema nervoso periférico;
3. Contração dos músculos que desenvolvem tensão;
4. Geração de forças e momentos através das articulações sinoviais;

5. Regulação das forças e momentos articulares pelos segmentos esqueléticos rígidos com base em sua antropometria;

6. Deslocamento (ou seja, movimento) dos segmentos de uma maneira que é reconhecida como marcha funcional;

7. Geração de forças de reação do solo.

Esses sete passos da cadeia de eventos que resultam no padrão de movimento que reconhecemos prontamente como caminhada humana (Figura 11).

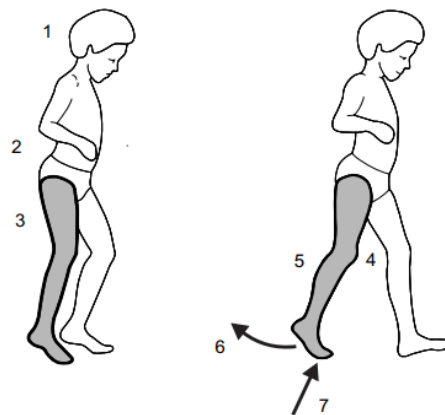


Figura 11: Sequência de 7 etapas para a marcha humana.

Fonte: Vaughan et al., 1999.

Ainda para Vaughan *et al.*, 1999, o ato de caminhar (marchar) possui dois requisitos básicos:

1. Movimento periódico de cada pé de uma posição de suporte para a próxima;
2. Forças de reação do solo suficientes, aplicadas através dos pés, para apoiar o corpo.

Esses dois elementos são necessários para que qualquer forma de caminhada bípede ocorra, sendo este movimento periódico das pernas a essência da natureza cíclica da marcha humana.

Um fator que pode alterar a marcha e muitas vezes passa despercebido é o peso corporal. Um estudo realizado por Dames *et al.*, 2019 fez algumas comparações entre a marcha de caminhada de adultos obesos, estando alguns destes com os pés descalços e outros calçados. Eles observaram que ao andarem descalços houve uma redução das amplitudes de movimento do tornozelo, joelho e

quadril, bem como do comprimento da passada, o tempo de apoio e o tempo de apoio duplo. Esses resultados comprovaram que a condição do calçado influencia significativamente as principais variáveis da marcha em adultos obesos.

Franklin *et al.*, 2015 publicou um trabalho cujo objetivo era investigar o efeito do calçado na marcha, focando especificamente em estudos que avaliaram a cinemática, a cinética e a atividade muscular entre andar descalço e com calçado comum. Andar descalço permite uma maior propagação do antepé sob carga e os caminhantes descalços habituais têm pés anatomicamente mais largos. Diferenças espaço-temporais, incluindo passo reduzido / comprimento da passada, são observados quando descalço. Caminhantes descalços habituais exibem pressões plantares de pico mais baixas e impulsos de pressão, enquanto as pressões plantares de pico são aumentadas no usuário calçado habitualmente andando descalço. O calçado afeta particularmente a cinemática e cinética de marcha aguda e crônica.

2.5.3 Calçado e sola

O homem contemporâneo faz uso de calçados por, no mínimo 1/3 do dia e o tipo de calçado que utilizam muda a forma como andam e como o seu peso corporal é distribuído. Sapatos mal ajustados ou inadequados ao formato do pé são conhecidos por causar deformidades nos pés ou patologias (Park, 2012; Valente, 2007).

Atualmente, é natural que a preocupação com o produto moda, o calçado, esteja ligada às condições econômicas e aos hábitos dos indivíduos, muito mais que às propostas dos designers em oferecer novos estilos. Assim, a cultura acaba determinando como será a produção dos calçados e o seu uso, entrando em conflito com questões relacionadas ao conforto dos pés das usuárias e a estética (Valente, 2007).

Segundo o Zorn, 2007, os calçados podem ser classificados quanto:

- Ao público-alvo: calçados masculinos, femininos e infantis;
- Ao tipo de cabedal: calçados abertos ou fechados;
- Ao uso que se destinam: calçados sociais, esportivos, de segurança de trabalho, de praia, para trekking, entre outros;
- Quanto ao modelo: mocassim, tênis, bota, scarpin, chanel, sandália, chinelo, Luis XV, inglês, napolitano, entre outros.

Cada modelo de calçado, tem suas próprias características, estéticas e técnicas, importantes para obter um bom calce, estabilidade e conforto aos pés.

A concepção e produção de calçado é uma tarefa difícil e intensiva, onde a qualidade dos produtos de calçado deve cumprir rigorosamente os requisitos do consumidor (Spahiu et al., 2021). O papel do calçado vai muito além da estética. Este também tem como objetivo proteger os pés das diferentes condições e proporcionar conforto.

As partes que compõem o calçado, são aproximadamente 20 a 25 partes ou componentes, sendo dividido em parte superior, o cabedal e uma parte inferior, a sola. Cada uma dessas partes, deve ser projetada considerando o movimento do pé. (Zorn, 2007).

Neste contexto, a sola do calçado é a parte que deve suportar pressões e impactos e está em contato direto com o chão, uma parte do desempenho do calçado depende da sola. Os principais materiais nos quais ele pode ser constituído são couro bovino, borracha natural, resina emborrachada, poliuretano (PU) e borracha vulcanizada (Spahiu et al., 2021; Da Costa 2013).

A seguir, pode ser observado no quadro 1 uma breve análise dos principais materiais utilizados na confecção de sola e suas características.

Quadro 1: Principais materiais utilizados na produção de solados

MATERIAL	NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICA
NR	Elastômero	Elasticidade e tração na ruptura
SR	Elastômero derivado do petróleo	Abrasão e colagem
PU	Poliuretano	Leveza e colagem
TR	Borracha termoplástica	Flexibilidade e reciclagem total
EVA	Etileno acetato de vinila	Fácil pigmentação e leveza
TPU	Poliuretano termoplástico	Resistência ao rasgo e hidrólise
PVC	Cloreto de vinila	Boa adesão e isolamento

Fonte: Furlanetto, 2019.

Para o desenvolvimento dessa importante peça do calçado, alguns parâmetros devem ser levados em conta:

- A distribuição da pressão plantar – um dado detalhado de pressão da pisada – é um importante parâmetro a ser considerado para o desenvolvimento de solas, onde a espessura e seu material que o compõe influencia diretamente no conforto dos sapatos (Spahiu *et al.*, 2021);
- A área de contato real e a estrutura do desenho da sola, podem influenciar no desempenho de tração do sapato em condições secas (Shih *et al.*, 2020);
- O atrito de sapatos em revestimentos de piso é geralmente considerado importante em conexão com a ocorrência de escorregões e quedas. Por este motivo, a resistência ao deslizamento ou, pelo contrário, a escorregabilidade das superfícies de pedestres. Este parâmetro é normalmente avaliado com base nos coeficientes de atrito medidos com materiais de sola de sapato, tais como elastômeros (polímeros com propriedades elásticas) ou couro (Chang *et al.*, 2001).

Para Grieser e Frantz 2018, são quatro os principais fatores que afetam a probabilidade de escorregar e cair, incluindo o material da superfície de caminhada e acabamento, design e condição da sola do calçado, contaminantes presentes na interface entre o piso e sola do sapato (água ou sujeira) e questões de fatores humanos como, por exemplo, dinâmica da marcha. Talvez o menos estudado desses fatores, são os calçados.

Na prática esportiva, envolvendo contato entre o aspecto plantar do pé e uma superfície, como em corrida e ginástica, só praticantes são frequentemente lesionados. Acredita-se que as lesões sejam causadas pelo efeito cumulativo efeito de trauma repetido de impacto vertical excessivo. Interfaces de superfície de suporte compostos de materiais de espuma de polímero, são usados para proteger contra essas lesões. Por exemplo, um estudo controlado em grande escala descobriu que o mais caro tênis de corrida, possuindo as solas mais flexíveis, foram associados a 31,9 lesões por 1.000 km corridos, enquanto os mais baratos, geralmente sapatos de sola dura, foram associados a 14,3 lesões a cada 1.000 km. O modelo no qual esses produtos se baseiam não leva em consideração o comportamento humano. Os humanos se movem exclusivamente como bípedes. Consequentemente, eles possuem sistemas de controle sensíveis para manter um equilíbrio estável quando em pé (Robbins e Waked, 1997).

CAPÍTULO 3

Metodologia

Neste capítulo serão apresentados os métodos científicos aplicados na pesquisa e os procedimentos técnicos utilizados para sua execução, os quais são descritos nos subtópicos, explicando como se deu o desenvolvimento da pesquisa.

3.1 DESENVOLVIMENTO DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, inicialmente será abordado o processo de cultivo do curauá através da técnica de micropropagação e a caracterização física, química, mecânica e térmica das fibras obtidas das suas folhas. Utilizaremos nos ensaios para análise lignocelulósica a metodologia proposta pela EMBRAPA, 2010. Em seguida, serão apresentados os processos de produção dos compósitos, onde o compósito se trata da mistura da fibra do curauá com o polímero polipropileno, resultando uma tampa de vedação para garrafa térmica. Por fim, será apresentado o compósito resultante da mistura entre resinas e a fibra, formando painéis que serão empregados como solado de sapatos.

3.2 MATERIAIS

Os reagentes utilizados nesse trabalho foram comprados e utilizados como recebidos: ácido acético (Sigma-Aldrich, 99%), ácido sulfúrico (VETEC, 99%); etanol (Merck, 99.8%); hidróxido de sódio P.A. (Quimex, 97%); Polipropileno – PP proveniente de rejeitos industriais e a fibra de curauá que foi produzida no Centro de Biotecnologia da Amazônia – CBA pela Dra. Simone Silva.

3.3 EXPERIMENTAL

3.3.1 Obtenção da fibra de curauá

O curauá foi obtido através da técnica de micropropagação (cultura de tecidos) e extraímos as fibras a partir das suas folhas e caracterizamos com relação à sua composição (umidade, cinzas, extrativos, lignina, hemicelulose, holocelulose e celulose), além das caracterizações por espectroscopia na região do infravermelho (FTIR-ATR), difratometria de raios X (DRX), análises termogravimétricas (TGA), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e avaliação das propriedades mecânicas.

Para o estabelecimento das culturas in vitro, foram utilizadas plântulas provenientes do Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais do Centro de Biotecnologia da Amazônia e a produção das plântulas foram realizadas de acordo com o protocolo estabelecido por Gato *et al.*, 2018.

- Etapa de crescimento

As culturas in vitro foram sub-cultivadas e introduzidas em frascos de 250 mL contendo 40 mL de meio de cultivo MS suplementado com 2.0 mg/L de 6- benzilaminopurina + 0.25 mg/L de ácido

naftaleno acético (Fig. 12b). Em seguida, as culturas foram mantidas a 25 ± 2 °C sob fotoperíodo de 16 h e intensidade luminosa de $50 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Gato *et al.*, 2018) (Fig. 1c). Após 60 dias de cultivo, os explantes foram avaliados quanto ao seu desenvolvimento. Logo após, as mudas foram lavadas para a retirada do excesso de meio de cultura e foram dispostas em tubetes de 180 cm³ e levadas à casa de vegetação telada para retenção luminosa (entre 50 e 70%) com temperatura média de 28 °C e irrigação por microaspersores, onde permaneceram por um período de 5 meses. Após esse tempo, estarão aptos ao plantio em solo.

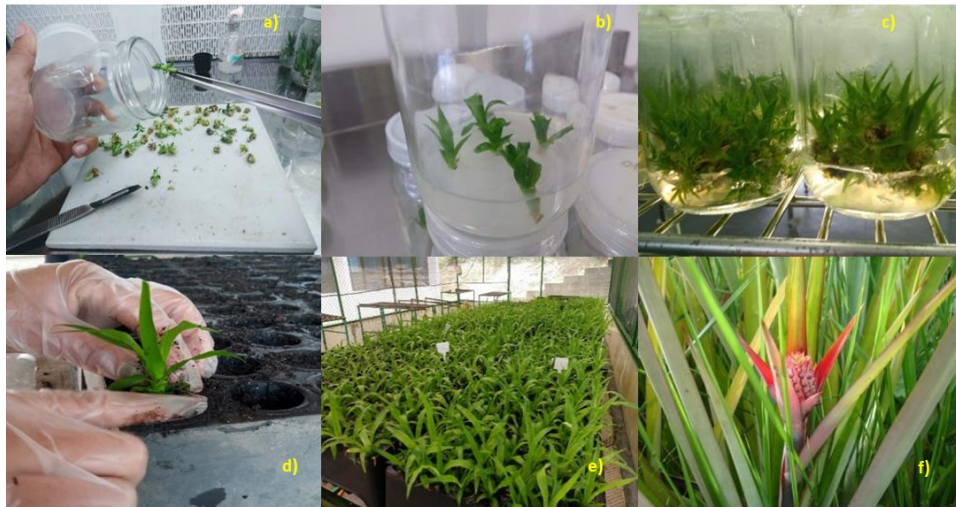


Figura 12: Etapas da produção do curauá. a) Subcultivo das plântulas, b) plântulas de curauá aos 10 dias in vitro, c) plântulas de curauá, aos 40 dias in vitro, d) Aclimatização do curauá, e) curauá em fase de aclimatização na casa de vegetação, f) curauá em campo.

Fonte: Centro de Biotecnologia da Amazônia.

- Produção das fibras

Para a produção de fibras, as folhas entre 1 e 1,5 m foram retiradas rente ao caule e lavadas em água corrente para a remoção de impurezas provenientes da colheita. As folhas colhidas foram beneficiadas em máquina desfibradora com motor à gasolina Honda GX160QD 5,5 CV a 3600 rpm (Fig. 13a). A fibra proveniente do desfibramento foi recolhida, lavada com água corrente e deixada de molho em água limpa por 36 h (Fig. 13b). Após esse período, foram batidas, penteadas e postas para secar em temperatura ambiente em armações suspensas (Fig. 13c).

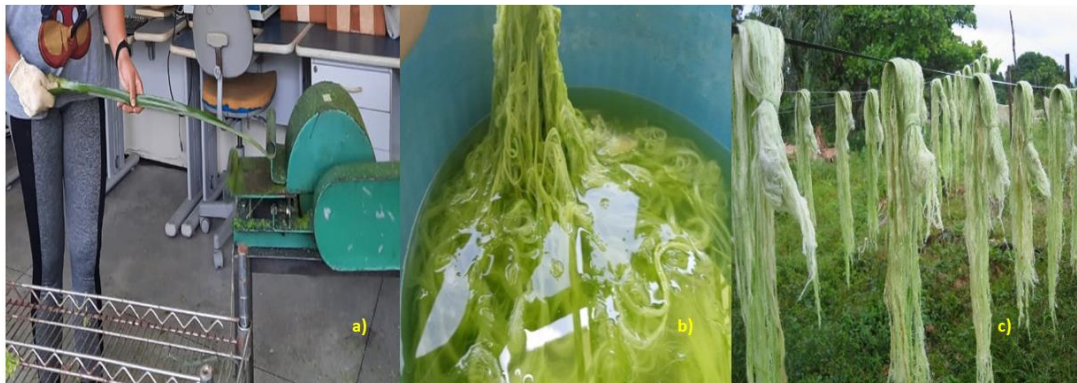


Figura 13: Processo de produção das fibras do curauá: a) desfibrilamento das folhas, b) lavagem e c) secagem das fibras.

Fonte: Centro de Biotecnologia da Amazônia

3.3.2 Ensaios físicos

- Preparação da amostra

As amostras foram padronizadas, onde usou-se uma tesoura de costura para cortar a fibra o menor possível, como mostra a Figura 14, e, assim, obter o material apropriado para realizar os ensaios (Figura 14).

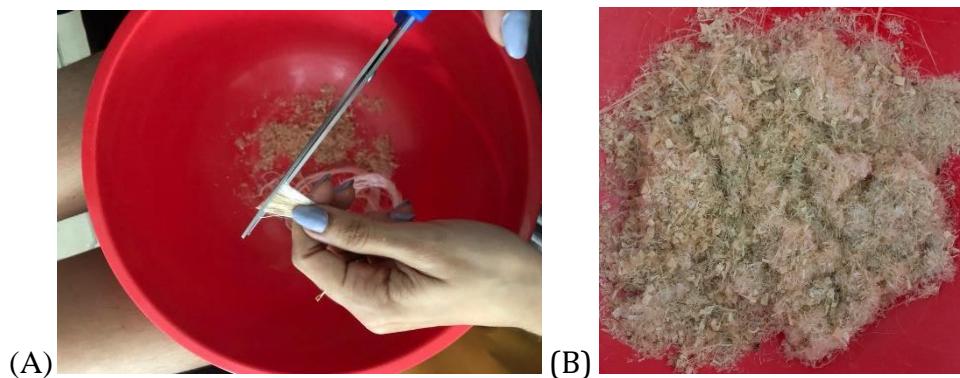


Figura 14: Fibras sendo cortadas com tesoura (A) Fibras prontas pra os ensaios (B).

Fonte: a autora.

- Teor de umidade

A umidade é representada como o teor de água presente na amostra. Para a sua quantificação utilizou-se a metodologia TAPPI, 2009, onde foram pesados em balança analítica Mettler Toledo (AB304-S) os cadinhos vazios e secos. Logo após, aproximadamente 1g de fibra cortada foi pesada nos cadinhos.

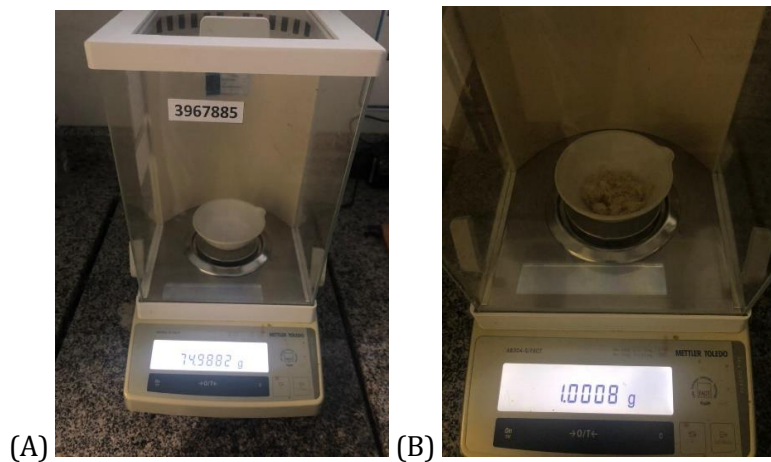


Figura 15: Pesagem cadinhos vazios (A) e pesagem cadinhos com fibras (B)

Fonte: a autora.

Os conjuntos cadinho-fibra permaneceram em estufa com circulação de ar a 105 °C, inicialmente, por 3h.



Figura 16: Estufa com circulação de ar (A) e estufa com circulação de ar com conjuntos cadinhos-fibras (B).

Fonte: a autora.

Em seguida, os materiais foram esfriados em dessecadores (Figura 17) até temperatura ambiente, sendo retirados utilizando pinças, e pesados.



Figura 17: Cadinhos sendo resfriados em dessecador.

Fonte: a autora.

Logo após, retornaram a estufa por mais 30 min, e foram esfriados em dessecador e novamente pesados. Esta etapa foi repetida até obter um peso constante. Com as massas finais e iniciais, foi calculado o teor de umidade. Esta análise foi feita em triplicata.

Com o conhecimento dos valores da massa do recipiente (MR), da massa da amostra úmida (MAU), da massa do conjunto recipiente/amostra úmida (MRAU) e da massa do conjunto recipiente/amostra seca (MRAS), é possível o cálculo da massa da amostra seca (AS) e, conseqüentemente, a determinação do teor de umidade (TU%) em porcentagem, de acordo com a equação Eq.1 a seguir:

$$\frac{(MRAU - MRAS) \times 100\%}{MAU} = TU\%$$

- Cinzas

As cinzas, em amostras vegetais, representam basicamente os minerais presentes, apesar de também poderem consistir em resíduos de produtos usados durante o preparo da amostra (TAPPI, 2002b; TAPPI T211 om-02, 2002).

Foi adicionado a cadinhos previamente calcinados a 600 °C por 30 minutos, e resfriados em dessecador, 1g de material vegetal.



Figura 18: Amostra de fibra natural em cadinhos.

Fonte: a autora.

O conjunto foi colocado em um forno mufla à temperatura ambiente, foi utilizada uma rampa de aquecimento de aproximadamente $9,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, afim de que a temperatura de trabalho de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ fosse atingida após 60 minutos de aquecimento. Essa temperatura foi mantida por três horas, e, ao final desse tempo, decaiu para $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ em uma hora. Quando a mufla atingiu esse ponto, foi removido o conjunto cadinho-amostra calcinada e foi colocado em um dessecador, até atingir a temperatura ambiente, antes de proceder à medida da massa de cinzas.



Figura 19: Amostras já calcinadas, resfriando a temperatura ambiente em dessecador.

Fonte: a autora.

O procedimento foi feito em duplicata.

Com o conhecimento dos valores da massa do recipiente (MR), da massa da amostra (MA) e da massa do conjunto recipiente/amostra calcinada (MRAC), é possível o cálculo da determinação do teor de cinzas totais (TC%) em percentagem, de acordo com a equação a seguir:

Eq. 2:

$$\frac{MRAC - MR}{MA} \times 100\% = TC\%$$

3.3.3 Ensaios químicos

- Extrativos

Os extrativos são definidos como compostos que podem ser extraídos de materiais lignocelulósicos, tanto por solventes polares quanto por apolares, que não são componentes estruturais da parede celular (TAPPI, 1997), como por exemplo gomas.

O processo teve início com a pesagem do balão (Figura 20A) e pesagem da fibra de curauá dentro do cartucho de papel filtro (Figura 20B).

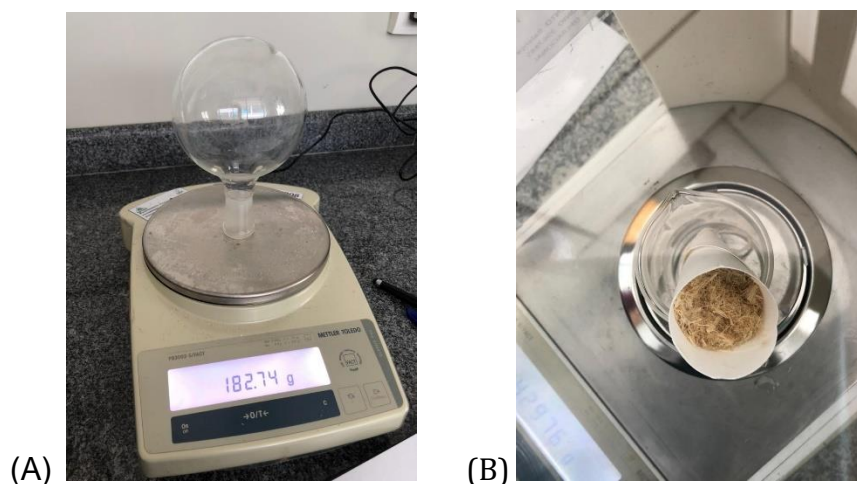


Figura 20: Pesagem do balão (A) pesagem da fibra (B).

Fonte: a autora.

Em uma aparelhagem limpa e desengordurada para extração por Soxhlet, (Figura 21) foi colocado um cartucho com mais ou menos 4g da fibra do curauá seca. Ao balão de vidro, adicionou-se 200 mL do solvente (álcool etílico, 70%) e conectou-se ao extrator. O conjunto balão-extrator foi colocado em uma manta aquecedora e conectado ao condensador. Após o primeiro refluxo, contou-se o período de quatro horas de extração.



Figura 21: Sistema de extração por Soxhlet

Fonte: a autora.

Após esse tempo, retirou-se o sistema das mantas de aquecimento e separou-se as fibras, agora sem extrativos. O balão com extrativos, (Figura 22A), foi removido e acoplado ao rotaevaporador (Buchi) (Figura 22B) para evaporação do solvente a pressão reduzida.

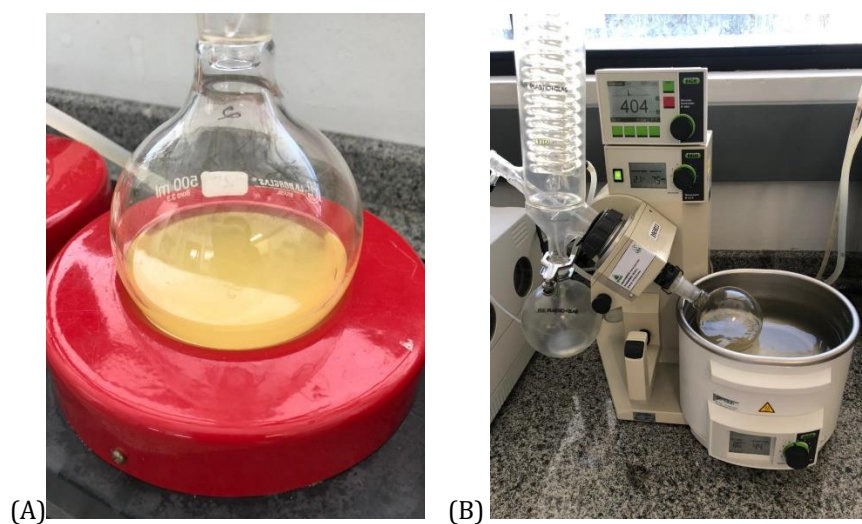


Figura 22: Extrativos com solvente (A) e processo de rotoevaporação (B).

Fonte: a autora.

Os balões com extrativos (Figura 23A) foram colocados em rotaevaporador para extração completa do solvente a pressão reduzida. Em seguida, o balão foi seco overnight (Figura 23B). Após

esse tempo, removeu-se o material da estufa para um dessecador, onde permaneceu até resfriar à temperatura ambiente e mediu-se a massa final.

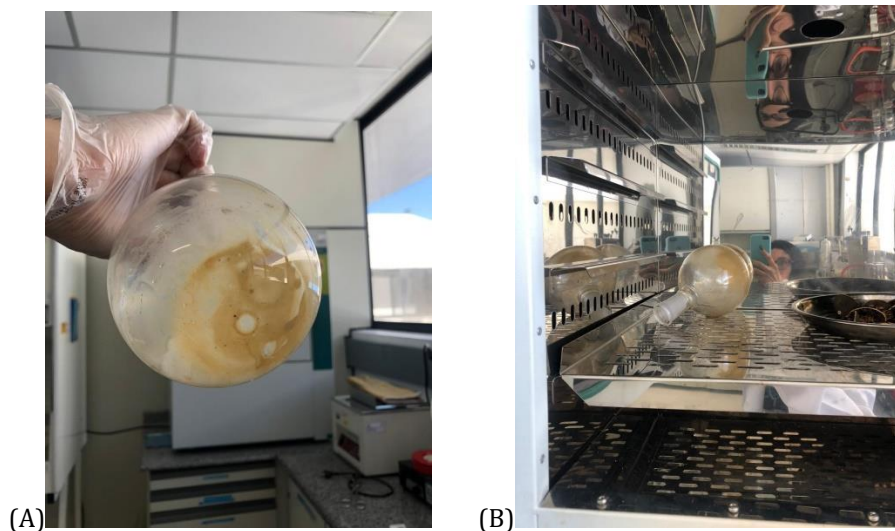


Figura 23: Balão com extrativos (A) balão na estufa (B).

Fonte: a autora.

Com o conhecimento dos valores da massa do recipiente (MR), da massa da amostra (MA), da massa do conjunto recipiente/extrativos (MRE) foi possível calcular do teor de extrativos (TE%) em percentagem.

Eq. 3:

$$\frac{MRE - MRRS}{MA} \times 100\% = TE\%$$

É importante lembrar que esses dados vão se referir à massa da amostra seca. É necessário realizar mais um cálculo, a fim de corrigir os valores que deverão constar na tabela de análise centesimal do material original, de acordo com a equação a seguir:

Eq. 4:

$$\frac{TE\% \times (100 - TU\%)}{100} = TE\% \text{ Corrigido}$$

- Lignina

Na determinação de lignina de Klason, segundo a norma TAPPI T 222 om-22 (2002c), com modificações, utiliza-se cerca de 1,0 g de amostra moída, sem umidade nem extrativos (Figura 22).

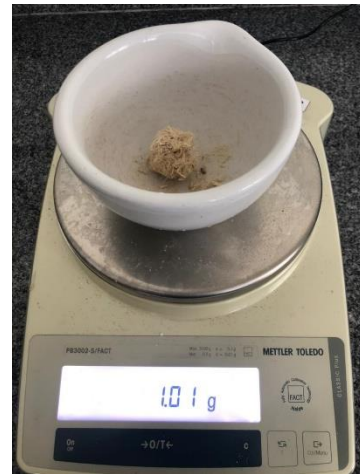


Figura 24: Pesagem da fibra em almofariz para posterior processo de digestão em ácido.

Fonte: a autora.

Esse material foi colocado em um almofariz (Figura 25A) e adicionado de 17,0 mL de ácido sulfúrico 72% (m/m) resfriado em geladeira (de 10 a 15 °C) antes do uso.

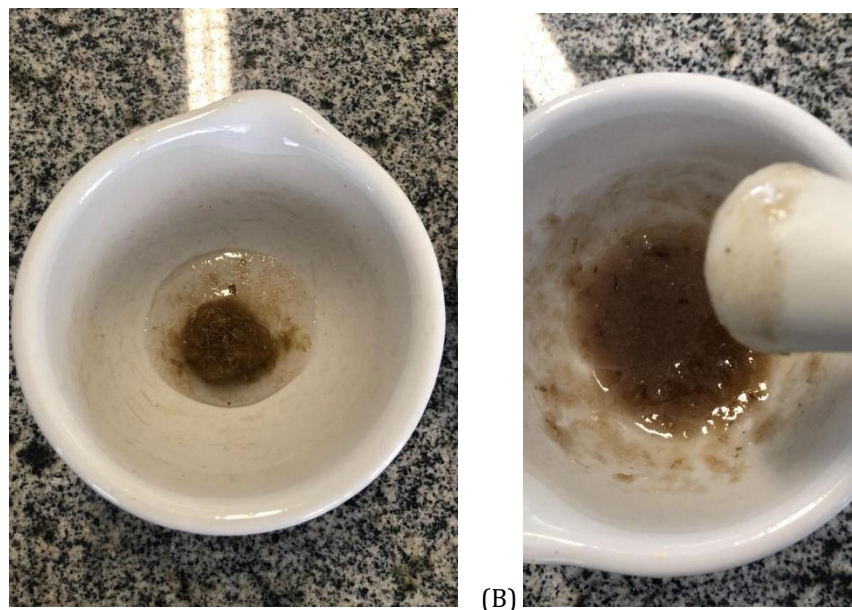


Figura 25: Fibras no almofariz com solução de ácido (A) Fibras e solução de ácido após maceração (B).

Fonte: a autora.

Após 15 minutos de agitação vigorosa e cuidadosa com o pistilo, até não haver mais partículas visíveis não solubilizadas, o material permaneceu sob digestão ácida por 24 horas, iniciando a etapa seguinte.

Entre as duas etapas, foi lavado um funil de vidro sinterizado – ASTM tipo C ou 4 –, com uma abertura de poro de 10 a 16 μ , e uma capacidade de 500 mL, e foi colocado por duas horas, em uma

estufa a 105 ± 2 °C. A seguir, o funil foi removido com pinças e guardado em um dessecador, até o momento da utilização.

Depois de decorrido o tempo de digestão, foi adicionado 306 mL de água destilada ao almofariz para diluir o ácido sulfúrico a 4%, transferindo quantitativamente o conteúdo para um balão de 500 mL (Figura 26A), em várias porções, o balão foi levado para uma manta aquecedora em seguida, foi conectado a um condensador (Figura 26B), e mantido sob aquecimento e refluxo por 4 horas, contadas a partir do início da ebulição. Após o fim do tempo de refluxo, foi desligado o aquecimento e esperou-se até o balão atingir a temperatura ambiente.

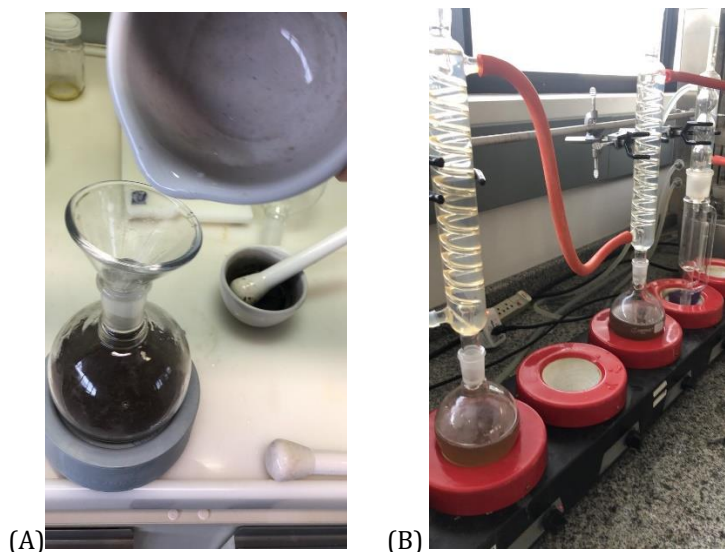


Figura 26: Transferência da solução do almofariz para o balão (A) Balões com a solução no condensador (B).

Fonte: a autora.

Enquanto isso, foi preparada a aparelhagem de filtração. A massa do funil de vidro sinterizado foi medida (Figura 27A) e o funil foi colocado sobre um kitassato de 500 mL (Figura 27B). Por fim, foi conectada uma bomba de vácuo ao kitassato para iniciar a filtração (Figura 25B).

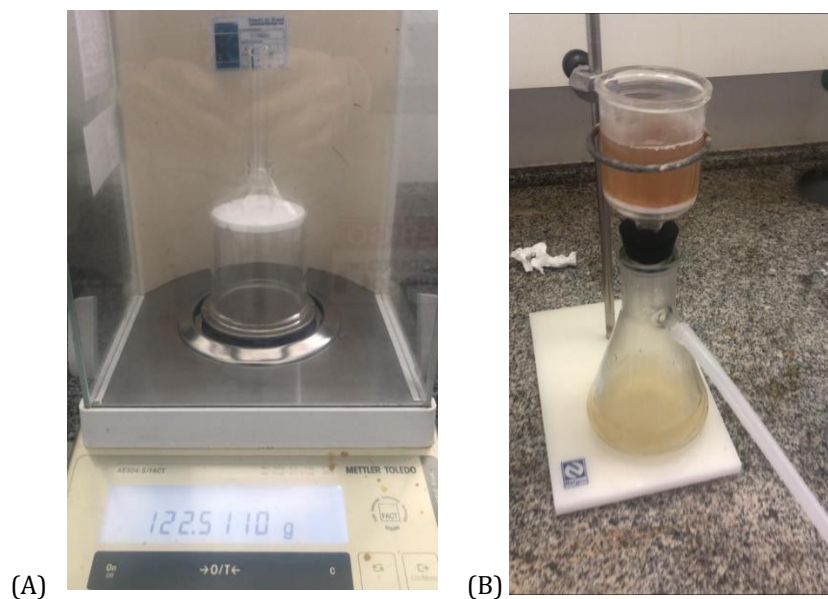


Figura 27: Pesagem do funil (A) Kitassato conectado a bomba a vácuo para filtração do sobrenadante (B).

Fonte: a autora.

O conteúdo do balão foi transferido para o funil (Figura 28), com uma agitação constante, para evitar a perda de precipitado no interior do funil. Ligou-se a bomba de vácuo, para agilizar o processo.



Figura 28: Transferência da solução contida no balão para o funil.

Fonte: a autora.

Na metade da operação, a bomba foi desligada para recolher o filtrado. Após a transferência de todo o conteúdo do balão, ele foi limpo com mais água destilada, para que nenhum resquício de lignina insolúvel fosse perdido. O precipitado recolhido no funil foi enxaguado até que o filtrado tivesse um pH próximo ao da água utilizada.

A seguir, o funil foi levado para uma estufa a 105 ± 2 °C e seco até adquirir um peso constante, conforme discutido na determinação de umidade. Após a secagem, foi colocado o conjunto funil-lignina em um dessecador com agente desecante, até atingir a temperatura ambiente. Foi medida a massa do funil somada à massa de lignina, em uma balança analítica, com uma precisão de 0,0001 g.

Com base na massa do funil limpo e seco (MF); na massa da amostra (MA); na massa do funil somada à massa de lignina, após a secagem em estufa (MFL); pode-se calcular o teor de lignina insolúvel (TLI%), conforme as fórmulas a seguir:

Eq. 5:

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

É importante lembrar que esses dados vão se referem à massa da amostra seca e sem extrativos. É necessário realizar mais um cálculo, a fim de corrigir os valores que deverão constar na tabela de análise centesimal do material original, de acordo com as equações a seguir:

Eq. 6:

$$\frac{TLI\% \times [100 - (TE\% + TU\%)]}{100} = TLI\% \textit{ Corrigido}$$

Onde, TLI% corresponde ao teor de lignina, TE% teor de extrativos e TU% o teor de umidade.

- *Holocelulose*

Experimento segundo a norma, TAPP 2009. Inicialmente, foram lavados os funis de vidro sinterizado, tipo ASTM 2 ou M, com abertura de poro de 40 a 100 μ e capacidade 150 mL. Após a lavagem, esse funil foi colocado para secar em estufa. A seguir, o funil foi removido com pinças e guardado em um dessecador, até o momento da utilização.

Em um Erlenmeyer de 500 mL, adicionou-se cerca de 3,0 g da fibra de curauá (Figura 29B), sem umidade nem extrativos. A seguir, adicionou-se 120 mL de água destilada. Em uma capela de exaustão, foi preparado um banho-maria de óleo de soja (Figura 29A), mantendo a temperatura constante a 70 ± 2 °C.

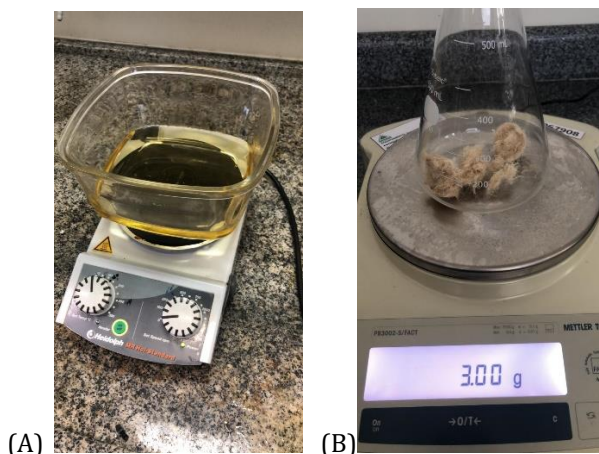


Figura 29: Banho de óleo (A) e pesagem da fibra sem extrativos e umidade (B).

Fonte: a autora.

Ao Erlenmeyer, foram acrescentados 2,5 g de clorito de sódio (NaClO_2), com pureza aproximada de 80%, e 1 mL de ácido acético glacial, com pureza $\geq 99,85\%$. Também foi acrescentada uma barra magnética afim de garantir uma agitação constante durante a reação. O conjunto Erlenmeyer-reagentes foi tampado com um Erlenmeyer de 25 mL, mergulhado no banho, aquecido por uma hora, e foi mantido sobre um agitador magnético ligado (Figura 30).

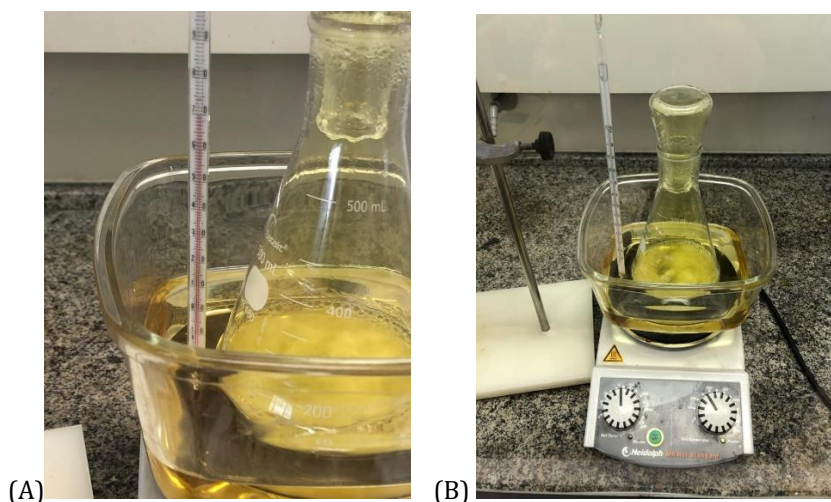


Figura 30: Temperatura constante de 70 °C (A) Conjunto Erlenmeyer-reagentes na capela (B).

Fonte: a autora.

Após esse tempo, foi realizada uma nova adição de 2,5 g de clorito de sódio (Figura 31B) e 1 mL de ácido acético (Figura 31A), mantendo a temperatura de 70 ± 2 °C por mais uma hora. Findo esse tempo, adicionou-se, mais uma vez, 2,5 g de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético, e prosseguiu-se com o aquecimento em banho por mais três horas. Ao longo do aquecimento, ocorreu a elevação

de cloro, como pode ser notado pela formação de um gás amarelo-esverdeado dentro do Erlenmeyer.

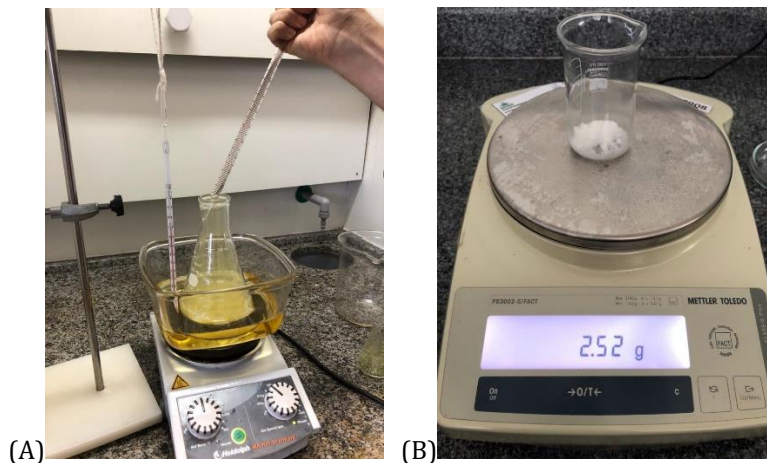


Figura 31: Adição de mais ácido acético (A) Pesagem do clorito (B).

Fonte: a autora.

Enquanto isso, foi preparada a aparelhagem de filtração, na capela de exaustão. A massa do funil de vidro sinterizado foi medida, e o funil colocado sobre um kitassato de 500 mL, por fim, foi conectado uma bomba de vácuo ao kitassato para iniciar a filtração.

O conteúdo do Erlenmeyer foi transferido para o funil, com uma agitação constante para evitar a perda de precipitado no interior do funil. Ligou-se a bomba de vácuo, para agilizar o processo. Com água destilada, foi lavado o Erlenmeyer e transferiu-se o conteúdo para o funil, tanto para não ocorresse perdas de holocelulose, quanto para lavar o material recolhido.

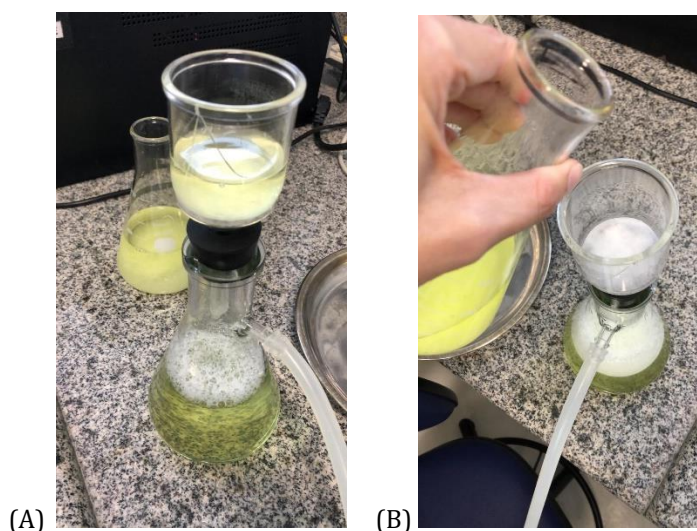


Figura 32: Conteúdo do Erlenmeyer sendo transferido para o funil e quantificação do teor de holocelulose.

Fonte: a autora.

O precipitado recolhido no funil foi enxaguado até que o filtrado tivesse um pH próximo ao da água utilizada. Verificando-se a proximidade da neutralidade, deve-se fazer uma lavagem com um pequeno volume, de cerca de 10 mL a 20 mL de acetona ou de metanol, seguida de mais um enxague com bastante água destilada.

O funil, então, foi levado para uma estufa a 105 ± 2 °C e secado até adquirir um peso constante. Após a secagem, foi colocado o conjunto funil-holocelulose em um dessecador com agente desecante, até atingir a temperatura ambiente, foi pesada a massa do funil somada à massa de holocelulose, em uma balança analítica (Figura 33A).

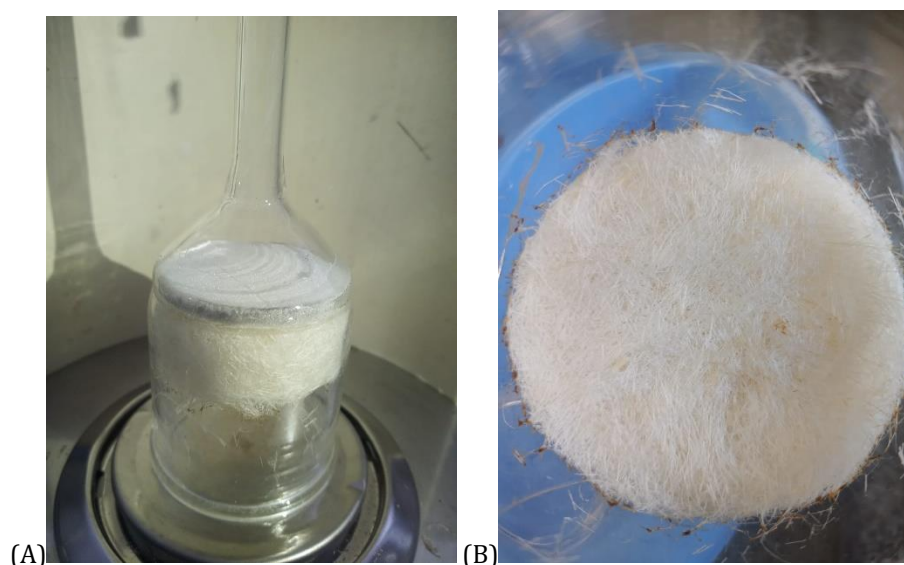


Figura 33: Conjunto funil/holocelulose (A) Holocelulose após estufa (B).

Fonte: a autora.

Com base na massa do funil limpo e seco (MF); na massa da amostra (MA); e na massa do funil somada à massa de holocelulose, após a secagem em estufa (MFH), pode-se calcular o teor de holocelulose (TH%), conforme a fórmula a seguir:

Eq. 7:

$$\frac{MFH - MF}{MA} \times 100\% = TH\%$$

É importante lembrar que esses dados vão se referir à massa da amostra seca e sem extrativos. Ou seja, é necessário realizar mais um cálculo, a fim de corrigir os valores que deverão constar na tabela de análise centesimal do material original, conforme a fórmula a seguir:

Eq. 8:

$$\frac{TH\% \times [100 - (TE\% + TU\%)]}{100} = TH\% \text{ Corrigido}$$

- *Celulose e hemicelulose*

Experimento segundo a norma TAPPI 2009. Inicialmente, foi lavado um funil de vidro sinterizado – ASTM tipo 2 – com uma abertura de poro de 40 a 100 μ e capacidade de 50 mL e foi colocado em uma estufa. A seguir, o funil foi removido com pinças e guardado em um dessecador, até o momento da utilização. Procedeu-se, então, à montagem da aparelhagem de filtração. A massa do funil de vidro sinterizado foi medida, e o funil colocado sobre um kitassato de 1.000 mL. Por fim, conectou-se uma bomba de vácuo ao kitassato, que foi ligada quando se iniciou a filtração.

Foi pesado cerca de 1,0000 g da holocelulose seca obtida e foi colocada em um almofariz, à temperatura ambiente.

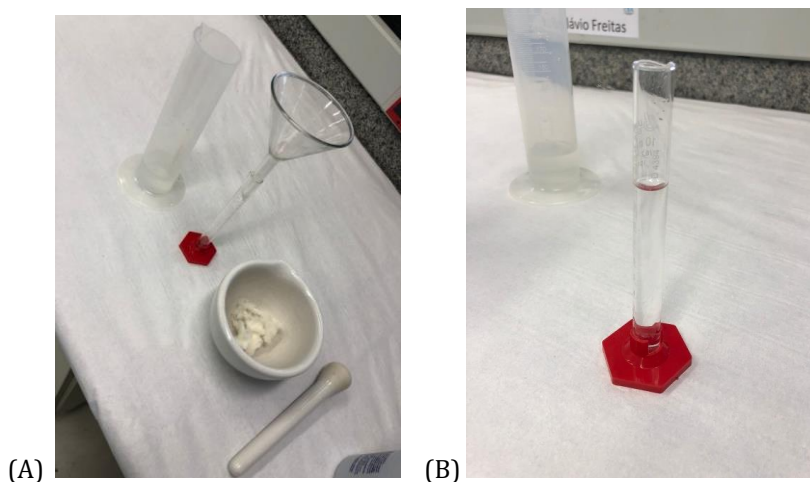


Figura 34: Material utilizado para iniciar a quantificação de alfacelulose (A) e solução de NaOH à 17,5% e proveta (B).

Fonte: a autora.

Adicionou-se 15 mL de uma solução de NaOH a 17,5% (Figura 34B) e aguardou-se dois minutos de contato entre a solução e a holocelulose, e, então, começou a macerar o material por oito minutos, (Figura 33A).

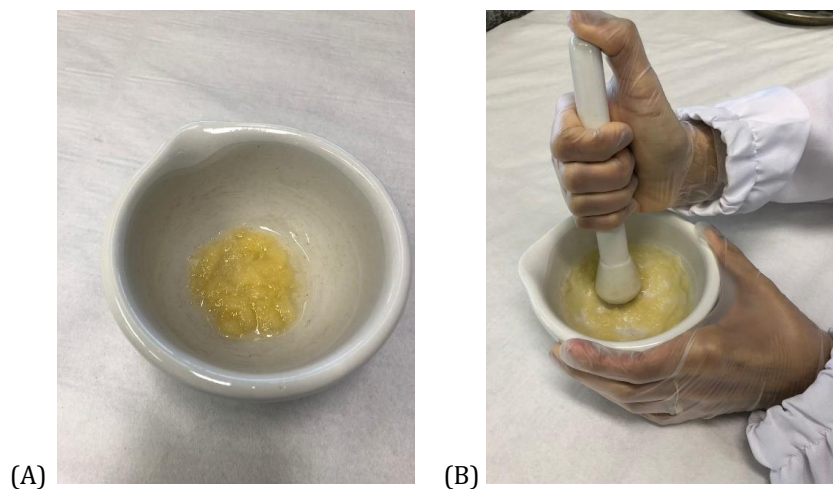


Figura 35: Solução de NaOH em contato com a holocelulose antes da maceração (A) e após maceração do material (B).

Fonte: a autora.

Terminado esse tempo, foi adicionado 40 mL de água destilada ao almofariz (Figura 35B) e transferiu-se o conteúdo, quantitativamente, para o funil (Figura 36B). O conteúdo do almofariz foi transferido para o funil com uma agitação constante, para evitar a perda de precipitado no interior do instrumental (Figura 36B).

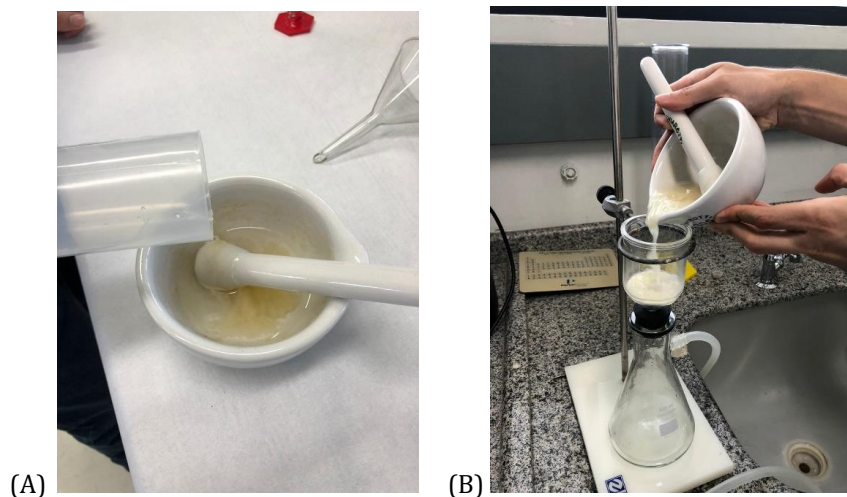


Figura 36: Adição da água destilada ao almofariz com celulose macerada (A) e transferência do conteúdo do almofariz para o funil e posterior quantificação.

Fonte: a autora.

O almofariz foi bem lavado com mais água destilada, transferindo-se todo o material macerado para o funil, e ligou-se a bomba de vácuo, para agilizar o processo de filtração. O precipitado recolhido no funil foi enxaguado até que o filtrado tivesse um pH próximo ao da água utilizada.

O funil, então, foi levado para uma estufa a 105 °C (Figura 37A), e seco até adquirir um peso constante, conforme discutido na determinação de umidade. Após a secagem, o conjunto funil-holocelulose foi colocado em um dessecador, até atingir a temperatura ambiente e foi medida a massa do funil somada à massa de alfacelulose (Figura 37B), em uma balança analítica, com uma precisão de 0,0001 g.

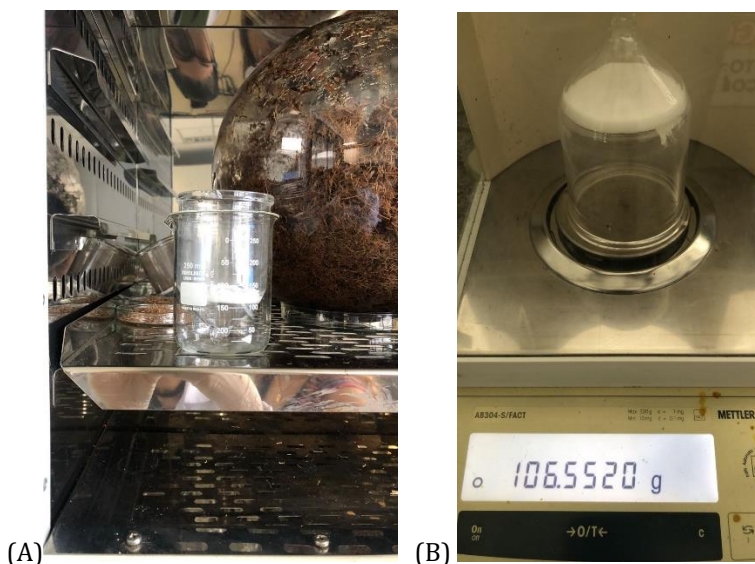


Figura 37: Funil na estufa para secagem da alfa celulose (A) e pesagem do conjunto alfacelulose-funil (B).

Fonte: a autora.

O procedimento foi feito pelo em duplicata.

Com base na massa do funil limpo e seco (MF); na massa da amostra de holocelulose (MAH); e na massa do funil somada à massa de celulose, após a secagem em estufa (MFA), pode-se calcular o teor de alfacelulose (TA%), conforme a fórmula a seguir:

Eq. 9:

$$\frac{MFA - MF}{MAH} \times 100\% = TA\%$$

Para a obtenção do teor corrigido de celulose (TA_{corrigido}), com base no teor corrigido de holocelulose (TH_{corrigido}), pode-se realizar o cálculo da seguinte fórmula:

Eq. 10:

$$\frac{(TH_{\text{corrigido}} \times TA)}{100} = TA_{\text{corrigido}}$$

E, por meio do cálculo da diferença entre os valores dos dois teores, calcula-se, então, o valor do teor percentual corrigido de hemicelulose (TheC_{corrigido}), conforme a fórmula a seguir:

Eq. 11:

$$TH_{\text{corrigido}} - TA_{\text{corrigido}} = TH_{\text{eC corrigido}}$$

E, por meio da diferença entre os valores dos dois teores de holocelulose e alfacelulose, calcula-se, então, o teor de hemicelulose (THem), conforme Eq. 12:

$$THem\% = (TH\%) - (TA\%)$$

3.3.4 Ensaio mecânico

- Tração Direta

Este ensaio foi realizado no laboratório do SENAI-CIMATEC, Salvador – BA, sob a orientação da Dra, Josiane Barbosa. A caracterização mecânica sob tração das fibras foi utilizada para analisar as propriedades de tensão na força máxima, tensão e deformação na ruptura e módulo de elasticidade, segundo a norma ASTM C1557 (M.R. *et al.*, 2019). Os experimentos foram conduzidos em máquina universal de ensaios Emic Modelo DL 2000, a uma velocidade de deformação de 0.1 mm/min, onde foram utilizados 12 corpos de prova com 8 cm de comprimento. O diâmetro médio de cada corpo de prova foi calculado a partir da medição em 3 pontos utilizando um micrômetro. Cada corpo de prova foi posicionado no centro de uma folha de papel e suas extremidades foram coladas para evitar o seu escorregamento durante o ensaio, conforme Figura 38A. Antes de cada ensaio as bordas da folha de papel foram cortadas para não interferir nos resultados (Figura 38B).

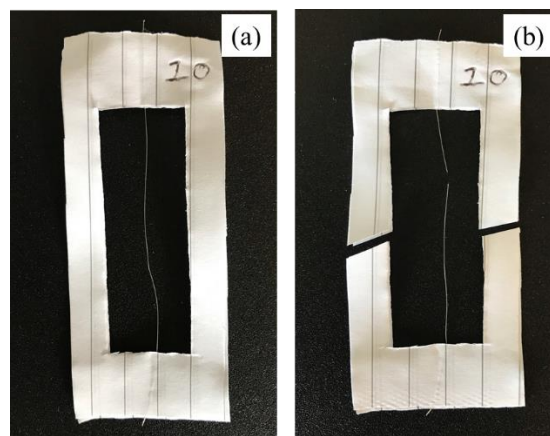


Figura 38: Corpo de prova utilizados no ensaio de tração. (a) Corpo de prova antes do ensaio e (b) corpo de prova após ensaio.

Fonte: SENAI-CIMATEC.

3.3.5 Ensaio térmico

- *Análises termogravimétricas – TGA*

Análises termogravimétricas (TG-DTG) foram utilizadas para avaliar a pureza e estabilidade térmica das amostras, onde foram utilizados aproximadamente 5 mg de amostra e adicionados em um cadinho de platina e inseridos em um analisador térmico (Shimadzu, modelo TGA-51). A análise foi realizada com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, partindo da temperatura ambiente até 900°C em atmosfera de nitrogênio.

3.3.6 Outras caracterizações

Como as fibras mostraram alta concentração de holocelulose ($\cong 84\%$), sendo grande parte desse percentual resultante da celulose, as caracterizações da fibra de curauá a seguir foram comparadas com as caracterizações da holocelulose e celulose extraídas das fibras.

- *Espectroscopia de infravermelho com reflectância atenuada FTIR-ATR*

As fibras, bem como a holocelulose e a alfacelulose foram caracterizadas por espectroscopia de infravermelho com reflectância atenuada (FTIR-ATR) usando espectrômetro Shimadzu (IRAffinity-1S e IV), onde os espectros foram registrados na região de 4000 a 500 cm^{-1} .

- *Difratometria de raios X*

As medidas de difração de raios X foram realizadas em um difratômetro (Panalytical, modelo Empyrean), operando com radiação Cuka ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), até uma tensão de 40 kV e uma corrente de 40 mA, sendo controlada por software. As medidas das amostras realizadas neste equipamento foram analisadas no modo espelho Bragg-Brentano HD, na faixa angular de 3° a 70° com passos de 0,01313 com 60 segundos cada passo.

Os dados amostrais foram normalizados e plotados, gerando gráficos de difratometria com o gráfico. Para o cálculo do Índice de Cristalinidade (IC) das celuloses e da fibra de curauá pela metodologia de Segal (Segal, Creely, Martin, & Conrad, 1959), utilizamos a Eq. 13:

$$CI = (CI - I_{am}) / CI \times 100$$

Onde CI é o índice de cristalinidade, I_c é a intensidade do pico cristalino da celulose (em torno de 20: 22°) representado pela cristalinidade do material e I_{am} é a intensidade da parte amorfa (20: 15 – 18°).

Esse mesmo índice também foi calculado utilizando a metodologia de Hermans (Hermans & Weidinger, 1949), apresentada na Eq. 14:

$$CI = A_{\text{crystal}}/A_{\text{total}} \times 100$$

Onde A_{crystal} é a soma das áreas referentes às regiões cristalinas, e A_{total} é a área total sob os difratogramas.

-Microscopia eletrônica de varredura – MEV

As fibras e a celulose também foram caracterizadas morfológicamente pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde as amostras foram metalizadas com ouro por 120 s a 20 °C com corrente de 50 mA, no metalizador BAL-TEC SCD050 e a morfologia foi examinada pelo microscópio eletrônico de varredura EGA3-TECLAN usando 30 kV a 25 °C.

CAPÍTULO 4

Resultado

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados alcançados na caracterização da fibra de curauá, desde sua produção *in vitro* até seus ensaios.

4.1 PRODUÇÃO *IN VITRO*

A produção do curauá pela técnica de cultura de tecidos (produção *in vitro*) se torna altamente vantajosa para escalonar a produção de fibras, visto que, pelo método convencional, 1 muda pode gerar até 6 novas mudas, em 6 meses. Por outro lado, pela cultura de tecidos, com 1 única gema, nós conseguimos produzir em torno de 720 mudas, neste mesmo espaço de tempo.

4.2 PRODUÇÃO DAS FIBRAS

O mercado de fibras naturais pode ser uma alternativa na geração de emprego e renda, principalmente nas regiões mais pobres dos países em desenvolvimento. A produção de juta e malva vem sofrendo queda na produção nos últimos anos, devido às mudanças climáticas, variação nos níveis de água dos rios, principalmente a juta, em áreas de várzea (Nogueira, 2018). As quedas históricas de produção mostram que os estados produtores de fibras devem estar atentos às instabilidades de produção. Neste contexto, o curauá aparece como uma alternativa, visto ser uma planta que demanda pouco nível tecnológico, dispensa grandes quantidades de água para a

irrigação, cresce em solos com baixa fertilidade e atinge de 1 a 1.5 m de comprimento, produzindo de 12 a 15 folhas, o que resulta em cerca de 2 kg de fibras (Neves *et al.*, 2019). Com isso, uma área plantada de 1.0 ha com espaçamento de 0.5 x 0.5 m entre as plantas, pode-se produzir aproximadamente 50 toneladas de fibras de curauá.

4.3 ENSAIOS FÍSICOS

- Teor de umidade

Normalmente, as fibras lignocelulósicas naturais apresentam-se como hidrofílicas e, portanto, possuem alta capacidade de absorver umidade (Silva, Kim, Aguilar, & Nakamatsu, 2020). Esse teor pode afetar diversos fatores nas fibras, tais como resistência à tração, grau de cristalinidade, porosidade, orientação, e comportamento de dilatação das fibras (Joseph *et al.*, 2002). Quanto maior a capacidade de absorção de umidade da fibra, maior será a sua biodegradabilidade e menor estabilidade térmica (Azwa *et al.*, 2013). Assim, a análise desse teor é de suma importância e os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2: Teor de umidade em fibras de curauá.

Teor de umidade (%)	Referência
7,60 ± 0,30	Este trabalho
8,0 ± 0,2	(Castro, Ruvolo-Filho e Frollini, 2012)
7,9	(Jay Amarasekera <i>et al.</i> , 2009)

Fonte: a autora.

Para as fibras de curauá produzidas *in vitro* observou-se um teor similar aos encontrados em fibras de curauá produzidas convencionalmente (Tabela 2). Normalmente, as fibras naturais apresentam um teor de umidade que varia de 4 a 12% (Azwa *et al.*, 2013) e que esse teor está correlacionado com o percentual de hemicelulose presente nas fibras (Azwa *et al.*, 2013; Karimah *et al.*, 2021). Como a umidade pode influenciar consideravelmente as fibras, diversos trabalhos aumenta a hidrofobicidade das fibras através da degradação da hemicelulose por tratamentos alcalinos (NaOH ou KOH em diferentes concentrações) (Lopattananon *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2015). Esse aumento da hidrofobicidade normalmente propicia uma melhor adesão da fibra em

matrizes poliméricas, dando melhores propriedades mecânicas aos compósitos desenvolvidos (Azwa *et al.*, 2013; Lopattananon *et al.*, 2006).

Teor de cinzas

O teor de cinzas em amostras vegetais, representa a matéria inorgânica (minerais) presente na amostra. Este foi quantificado e pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3: Teor de cinzas encontrados em fibras do curauá.

Teor de cinzas (%)	Referência
0,36 ± 0,03	Este trabalho
0,5 ± 0,1	(Castro, Ruvolo-Filho e Frollini, 2012)
1,0	(Behrens, 1999)
0,9	(Jay Amarasekera <i>et al.</i> , 2009)

Fonte: a autora.

Ao observar a Tabela 3, pode-se observar que o teor de cinzas encontrado na literatura apresenta valores superiores ao comprarmos com o reproduzido *in vitro*, embora próximo do valor encontrado por Castro e colegas (Castro, Ruvolo-Filho e Frollini, 2012) e dos trabalhos com a fibra de sisal (0.6 – 1%) e juta (0.8%) (Karimah *et al.*, 2021). Por outro lado, esse teor também é inferior ao encontrado em outras fibras, tais como açai (1.01%) (Barros, Silma de Sá *et al.*, 2021), buriti (2%) (Cruz Demosthenes, Da *et al.*, 2020) e coco (2.96%) (Rambo, Schmidt e Ferreira, 2015). Esse parâmetro é um bom indicativo de quando há contaminação das fibras com materiais metálicos no momento do desfibramento das fibras, bem como com outras impurezas, tais como areia ou solo (Morais, Rosa e Marconcini, 2010). Assim, o baixo valor de cinzas confirma a pureza das fibras obtidas no processo desenvolvido neste trabalho.

4.4 ENSAIOS QUÍMICOS

Teor de extrativos

O teor de extrativos normalmente é feito para trabalhos que visam principalmente a extração de celulose, visto que os extrativos podem reduzir a ação do hidróxido utilizado na produção da alfa-celulose, além de causar problemas nos equipamentos (Morais, Rosa e Marconcini, 2010). Assim, este foi quantificado e pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4: Teor de extrativos obtidos nas fibras do curauá.

Teor de extrativos (%)	Referência
3,81 ± 0,21	Este trabalho
2,5 – 2,8	(Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014)

Fonte: a autora.

Neste contexto, as fibras apresentam um baixo teor, visto serem lavadas após o processo de desfibramento. Mesmo assim, ainda se encontra dentro da faixa observada de extrativos para outros materiais, tais como coco (1.41%) (Rambo, Schmidt e Ferreira, 2015), açaí (4.48%) (Barros, Silma de Sá *et al.*, 2021), e buriti (6%) (Cruz Demosthenes, Da *et al.*, 2020). Os extrativos são formados normalmente por compostos de baixa ou de média massa molecular, tais como sais, açúcares e polissacarídeos (solúveis em água), ácidos ou ésteres graxos, álcoois de cadeia longa, ceras, resinas, esteroides, compostos fenólicos e glicosídeos (solúveis em solventes orgânicos) (Morais, Rosa e Marconcini, 2010). Estes têm como funções fisiológicas o acúmulo de nutrientes e a proteção dos materiais vegetais contra o ataque de microrganismos e cupins, e contra a formação de cor e de aromas (Pino, Ayala, Gonzalez, & Afonso, 2007).

Teor de lignina

O teor de lignina é um bom indicativo sobre algumas propriedades mecânicas e físicos das fibras, tais como resistência à tração, tensão de falha, ângulo microfibrilar e densidade (Karimah *et al.*, 2021). Esse teor também pode ajudar na viabilidade de aplicação de biomassas para a determinação da sua digestibilidade como forragem, facilidade de extração de celulose, e uso do material em biorrefinaria para produção de gasolina, metanol, gasogênio e outros produtos (Morais, Rosa e Marconcini, 2010). Assim, o teor de lignina foi quantificado e pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5: Teor de lignina nas fibras de curauá.

Teor de lignina (%)	Referência
8,68 ± 0,05	Este trabalho
14	(Zimmermann, Bordeanu e Strub, 2010)
14,64	(Souza, Souza e Andrade Silva, de, 2020)
13,0 ± 0,18	(Soltan <i>et al.</i> , 2017)

7,5 – 11,1	(Satyanarayana, Guimarães e Wypych, 2007)
14,7	(Ferreira <i>et al.</i> , 2017)
5.2 ± 0,1	(Castro, Ruvolo-Filho e Frollini, 2012)
1,5	(Behrens, 1999)
7,5	(Jay Amarasekera <i>et al.</i> , 2009)
7,5	(Hoareau <i>et al.</i> , 2004)
7,5 – 11	(Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014)

Fonte: a autora.

As fibras lignocelulósicas geralmente apresentam teor de lignina variando de 1 a 25% (Spinacé *et al.*, 2009). Ao observar a Tabela 5, constata-se que esse teor variou significativamente ao comparar com diferentes trabalhos sobre fibras de curauá (de 1.5 a 14.7%). Ao comparar com outras fibras, esse teor pode variar ainda mais (ex. fibra de rami – 0.6% e fibra de bambu – 36.88%) (Karimah *et al.*, 2021). Normalmente, é desejável um baixo teor de lignina, aliado a um alto teor de celulose, resultando em fibras com alta resistência à tração, i.e., a força necessária para romper a fibra ao ser tracionada (Karimah *et al.*, 2021). Assim, as fibras de curauá produzidas *in vitro* apresentaram um valor médio ao se comparar com os outros trabalhos e um potencial para apresentar uma boa resistência mecânica.

Teor de hemicelulose

A hemicelulose são polímeros de massa molar menor que a celulose e totalmente amorfo (Spinacé *et al.*, 2009). Ela se liga fortemente à celulose através de ligações de hidrogênio, tornando a fibra mais hidrofílica (Karimah *et al.*, 2021). Em compósitos (fibras/polímeros) esse teor pode ser correlacionado com algumas propriedades mecânicas (Specific Young's Modulus e Failure strain), algumas propriedades físicas (diâmetro da fibra e ganho de umidade) (Karimah *et al.*, 2021), bem como é responsável pelo comportamento inicial de degradação térmica (Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014). Assim, para o desenvolvimento de compósitos, um alto teor desse polímero pode causar uma baixa adesão da fibra na matriz polimérica. Portanto, a quantificação desse teor foi feita e pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6: Teor de hemicelulose em fibras de curauá.

Teor de hemicelulose (%)	Referência
--------------------------	------------

6,77 ± 0,69	Este trabalho
10	(TAPPI, 2006)
22,5	(Souza, Souza e Andrade Silva, de, 2020)
10,0 ± 0,12	(Soltan <i>et al.</i> , 2017)
21,1	(Satyanarayana, Guimarães e Wypych, 2007)
23,8	(Ferreira <i>et al.</i> , 2017)
29,6 ± 0,2	(Castro, Ruvolo-Filho e Frollini, 2012)
20	(Behrens, 1999)
9,9	(Spinacé <i>et al.</i> , 2009)
9,9 - 21	(Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014)

Fonte: a autora.

Ao comparar o teor de hemicelulose obtido nesse trabalho com os encontrados por diversos autores (Tabela 6), fica evidente que o teor de hemicelulose produzido *in vitro* foi inferior ao encontrados em curauá produzido convencionalmente. Isso pode ser efeito tanto da forma de produção, quanto da forma de tratamento das fibras após a desfibramento. Como a hemicelulose é parcialmente solúvel em água (Spinacé *et al.*, 2009), um bom percentual pode ter sido solubilidade ao deixar as fibras de molho na água após a desfibramento, resultando num baixo teor desse polímero e, conseqüentemente, uma menor hidrofiliçidade (Karimah *et al.*, 2021). Assim, espera-se que a fibra produzida *in vitro* favoreça a produção de compósitos, pois a adsorção de água se torna um fator primordial, a qual dificulta a interação entre a fibra e os polímeros (Spinacé *et al.*, 2009).

Teor de celulose

Estudos mostram que quanto maior o teor de celulose e cristalinidade desta, melhores são as propriedades de resistência das fibras naturais (Karimah *et al.*, 2021). Em fibras, esse teor pode ser diretamente correlacionado com a Tensile strength e Specific Young's Modulus (propriedades me), bem como à densidade e diâmetro das fibras (propriedades mecânicas). Assim, quantificamos o teor de celulose na fibra produzida *in vitro* e comparamos com outros teores obtidos em fibras de curauá produzido convencionalmente (Tabela 7).

Tabela 7: Teor de celulose quantificado em fibras de curauá.

Teor de celulose (%)	Referência
77,17 ± 1,18	Este trabalho
68	(Tappi, 2007)
60,1	(Souza, Souza e Andrade Silva, de, 2020)
69,0 ± 0,39	(Soltan <i>et al.</i> , 2017)
70,7 ± 3,6	(Satyanarayana, Guimarães e Wypych, 2007)
58,8	(Ferreira <i>et al.</i> , 2017)
63,4 ± 0,9	(Castro, Ruvolo-Filho e Frollini, 2012)
73	(Behrens, 1999)
73,6	(Jay Amarasekera <i>et al.</i> , 2009)
71 – 74	(Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014)

Fonte: a autora.

Ao se comparar o teor de celulose (Tabela 7), é possível observar que o curauá produzido neste trabalho apresentou um teor superior aos demais, o que pode ser um bom indicativo de boas propriedades mecânicas destas fibras.

4.5 ENSAIOS MECÂNICOS

As propriedades mecânicas das fibras obtidas das folhas do curauá foram analisadas e o resultado pode ser observado na Tabela 8. As fibras de curauá produzidas neste trabalho apresentaram uma alta resistência a tração (2113 Mpa) e módulo elástico (151 Mpa), os quais foram superiores aos valores apresentados em diversos trabalhos anteriores com o curauá plantado convencionalmente, bem como a outras fibras naturais (Tabela 8). Martel, Salgado, & Silva, 2022 investigaram o comportamento de fibras de curauá em condições naturais e tratadas visando aumentar sua durabilidade e desempenho mecânico, eles obtiveram resistência à tração de 872 ± 326 MPa e o módulo de elasticidade de 16.5 ± 5.8 GPa para as fibras naturais de curauá. Neves, Cabral, Santos, Mafra, & Junior, 2021 analisaram a resistência à tração e módulo de Young de fibras de curauá com diferentes comprimentos. Para as fibras de 40 mm (comprimento) foi registrado resistência a tração de 566.5 ± 76.7 MPa e modulo elástico de 38.7 ± 5.0 GPa. Já Latif et

al., 2019 realizaram uma revisão abrangente sobre os efeitos de diferentes tratamentos de superfície nas propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras. Dentre as várias fibras citadas na revisão, a fibra natural de curauá apresentou resistência a tração de 825 MPa e módulo elástico de 9 GPa. Portanto é possível evidenciar as características promissoras da fibra de curauá, comparada a outras fibras naturais, como também a fibras sintéticas.

Tabela 8: Comparação das propriedades mecânicas apresentadas por fibras sintéticas e naturais, com destaque para os diversos resultados encontrados na literatura com curauá produzido convencionalmente.

	Fibras	Resistência à tração (Mpa)	Elasticidade (GPa)	Referência
Sintéticas	Vidro	2000 – 3450	70 – 73	(Costa <i>et al.</i> , 2020)
	Aramida	300 – 4100	63 – 131	
	Carbono	2500 – 6350	230 – 400	
Naturais	Curauá (<i>A. erectifolius</i>)	2113 ± 514	151 ± 27	(Esse trabalho)
	Curauá (<i>A. erectifolius</i>)	900 ± 200	36 ± 10	(Spinacé <i>et al.</i> , 2009)
	Curauá (<i>A. erectifolius</i>)	680	36	(Queiroz Minillo, Cesar de Castro Cardoso e Ortenzi, 2021)
	Curauá (<i>A. erectifolius</i>)	543 ± 260	63,7 ± 32,5	(Alves Fidelis <i>et al.</i> , 2013)
	Curauá (<i>A. erectifolius</i>)	1074 ± 118	43,6 ± 19,2	(Ferreira <i>et al.</i> , 2021)
	Curauá (<i>A. erectifolius</i>)	735.2 ± 150.7	28,7 ± 3,1	(Zukowski, Andrade Silva, de e Toledo Filho, 2018)
	Curauá (<i>A. erectifolius</i>)	760.0 ± 217.3	32,2 ± 8,1	(Silva, Mobasher, & Filho, 2009)
	Rami (<i>B. nivea</i>)	400 – 1000	44 – 128	(Karimah <i>et al.</i> , 2021)
	Algodão (<i>G. hirsutum</i>)	200 – 800	5,5 – 13	(Karimah <i>et al.</i> , 2021)

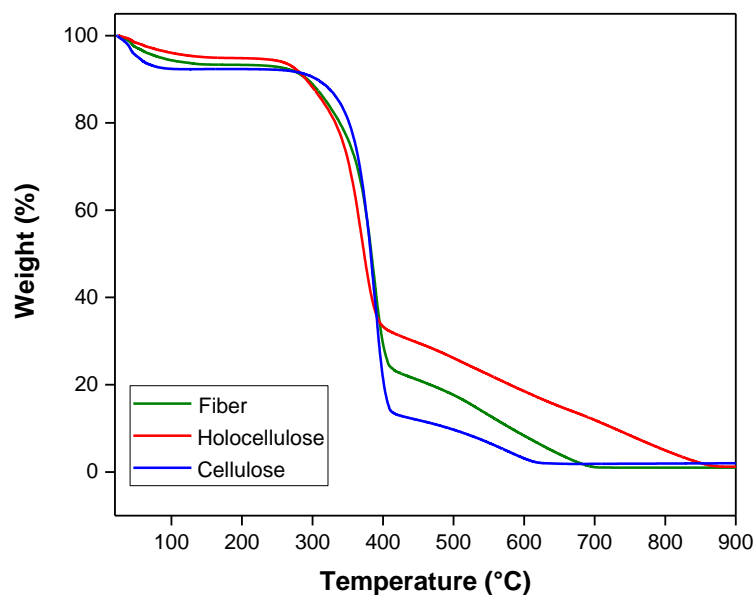
Juta (<i>C. capsularis</i>)	393 – 900	10 – 55	(Karimah <i>et al.</i> , 2021)
Sisal (<i>A. sisalana</i>)	341-423	6,3 – 14,7	(Spinacé <i>et al.</i> , 2009)
Kenaf (<i>H. cannabinus</i>)	930 – 1500	23 – 53	(Karimah <i>et al.</i> , 2021)
Abacaxi (<i>A. comosus</i>)	413 – 1627	34,5 – 82,5	(Karimah <i>et al.</i> , 2021)

Fonte: a autora.

4.6 ENSAIOS TÉRMICOS

TGA

O desenvolvimento de compósitos pela aplicação de materiais lignocelulósicos e polímeros normalmente é feito em extrusora utilizando temperaturas em torno de 200 °C (Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014). Nesta temperatura, algumas fibras apresentam degradação térmica, resultando em odor e escurecimento, além de uma redução nas propriedades mecânicas (Tserki *et al.*, 2005). Portanto, a análise térmica das fibras se faz necessária antes do desenvolvimento dos compósitos. Assim, as curvas termogravimétricas para as fibras, holocelulose e celulose do curauá podem ser observadas na Fig. 38.



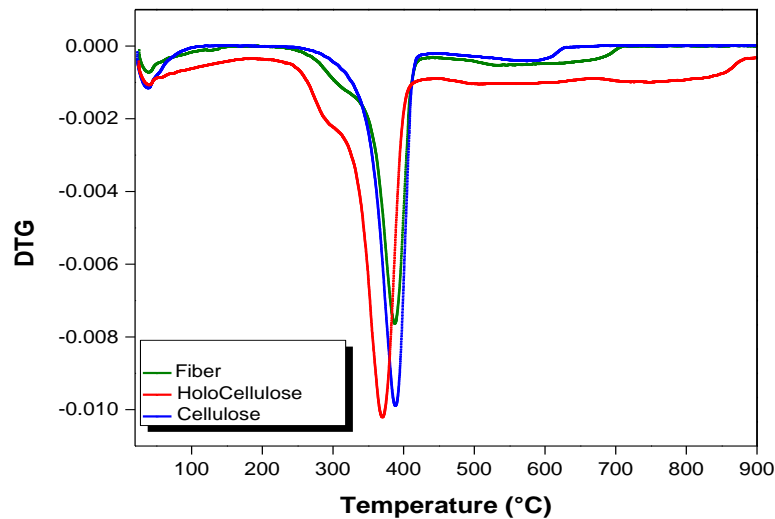


Figura 39: Análise termogravimétrica das fibras de curauá, e da holocelulose e celulose extraídas das fibras, a) TG e b) DTG. Fonte: a autora.

Ao analisar o resultado da Fig. 38, observa-se uma perda de umidade em aproximadamente 100 °C (Freitas, de *et al.*, 2019), sendo está menor nas fibras (6.45 %), provavelmente por estas terem passado pelo processo de secagem ao final da produção das fibras. A perda de massa relacionada à umidade nas fibras, foi similar ao teor de umidade calculado na mufla (Tabela 2). A degradação inicial (T_{onset}) da fibra ocorreu em aproximadamente 237 °C, a qual é referente à perda da hemicelulose (Barros, Silma de Sá *et al.*, 2021). O T_{onset} para a fibra do curauá foi superior aos apresentados para algumas madeiras (pinho – 234.6 °C e maple – 220.9 °C) e fibras (juta e cânhamo – 205.1 °C e kenaf – 219 °C (Yao *et al.*, 2008); ramie – 221 °C, sisal – 209 °C e buriti 92 °C (Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014)). Através do DTG, é possível observar uma pequena perda nessa região para as amostras de fibra e holocelulose, visto ter apresentado um teor de apenas 6.8% de hemicelulose (Tabela 6). Já na celulose extraída da fibra, não se observa esse processo térmico. Esses resultados mostram que a fibra de curauá pode ser extrusada com matrizes poliméricas em temperaturas superiores à normalmente utilizada (200 °C). Em seguida, é possível observar o pico de degradação da celulose com um máximo de decomposição (T_p) em 387 °C para as amostras fibra (verde) e celulose (em azul), superior à observada para outras fibras (Yao *et al.*, 2008) e também superior à fibra de curauá analisada por Poletto *et al.*, 2014 (344 °C). Por conseguinte, foi possível observar a degradação lenta da lignina (entre 420 e 712 °C). Como a estabilidade térmica da lignina é muito alta, ela é mais difícil de decompor (Barros, Silma de Sa *et al.*, 2021; Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014). Ao final da análise, restaram 1.04% de cinzas, um percentual diferente do observado em atmosfera antioxidante (0.36% - Tabela 3). Assim, é possível observar a alta estabilidade

térmica apresentada pelas fibras de curauá, a qual está relacionada ao seu alto índice de cristalinidade (Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014).

4.7 OUTRAS CARACTERIZAÇÕES

FTIR-ATR

As fibras de curauá produzidas neste trabalho, bem como a holocelulose e a celulose extraídas foram analisadas por infravermelho, onde os espectros podem ser observados na Fig. 40.

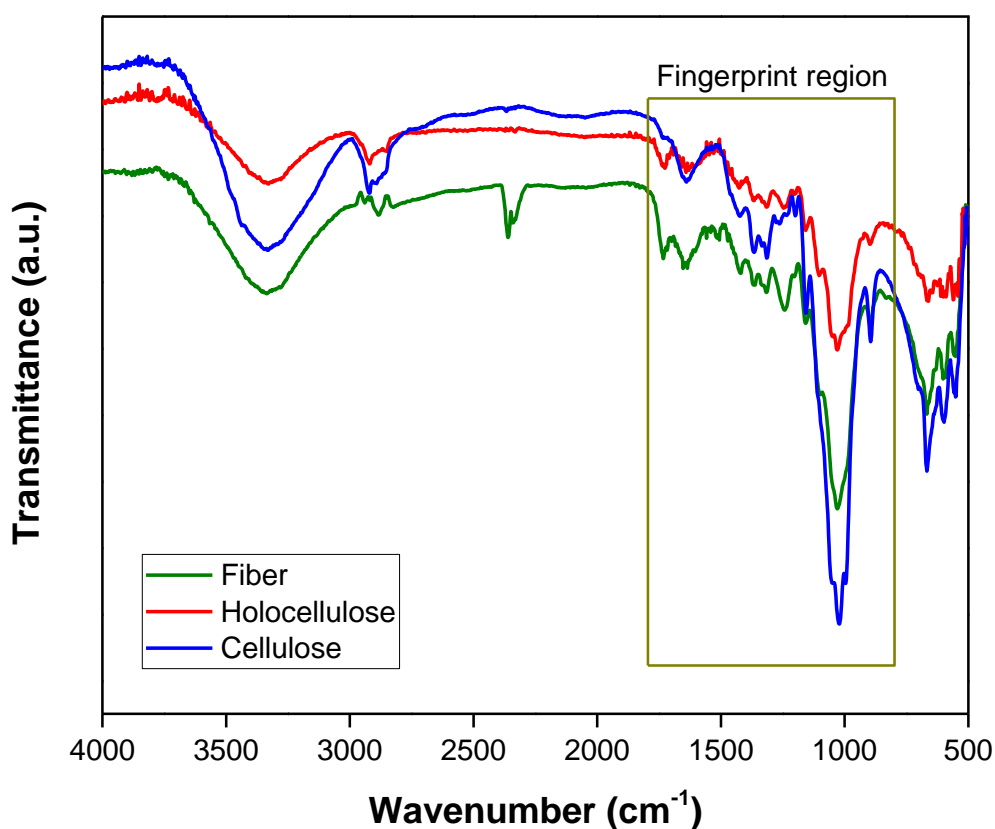


Figura 40: Espectros obtidos na região do infravermelho para as fibras das folhas do curauá, holocelulose e celulose extraídas das fibras. Destaque para a região de impressão digital de materiais lignocelulósicos.

Fonte: a autora.

Com base na Figura 40, é possível observar primeiramente uma grande similaridade entre os três espectros, principalmente entre a fibra do curauá (verde) e a holocelulose (vermelho),

corroborando os resultados obtidos na quantificação dos teores, onde observou-se que a fibra é principalmente composta pela holocelulose (aproximadamente 84%; i.e., somando os teores de hemicelulose (Tabela 6) e celulose (Tabela 7). Para as fibras, bandas características de materiais lignocelulósicos foram observadas (celulose: 3327, 2905, 1636, 1318, 1012 e 894 cm^{-1} ; lignina: 1603, 1510, 1423, 1364 e 1248 cm^{-1} ; hemicelulose: 1750 – 1700, 1154, 1021 e 894 cm^{-1}) (Barros, Silma de Sa *et al.*, 2021; Barros, Silma de Sá *et al.*, 2021; Kubovský, Kačíková e Kačík, 2020). A banda em torno de 1425 cm^{-1} está associada à quantidade de estrutura cristalina da celulose, enquanto a banda em 894 cm^{-1} é atribuída à região amorfa na celulose e a razão entre essas duas bandas pode ser definida como um índice empírico de cristalinidade proposto por Nelson & O'Connor, 1964. Neste contexto, Poletto *et al.*, 2014 avaliaram a cristalinidade de diversas fibras naturais e madeiras, onde o curauá apresentou um índice de cristalinidade superior ao apresentado pelas outras fibras.

XRD

Os difratogramas apresentados na Fig. 41 mostram picos característicos semicristalinos de celulose tipo I para a fibra do curauá e holocelulose, i.e. $2\theta = 15^\circ$ e $22,6^\circ$ (Souza *et al.*, 2018) e planos de (1-10), (110) e (200). A celulose apesar de apresentar características semicristalina também apresentou uma celulose do tipo II ($2\theta = 12^\circ$, $20,1^\circ$ e $21,5^\circ$), onde esses picos podem ser atribuídos aos índices de Miller de (1-10), (110) e (020) (Ilyas, Sapuan e Ishak, 2018). Observamos que o tratamento da holocelulose com hidróxido 17.5%, resultou em uma celulose tipo II. Vale ressaltar que cada fibra necessita de uma concentração diferente de hidróxido para gerar fibras de celulose tipo II: juta, bambu, agave, dentre outras, necessitam de uma concentração de 10 a 16%, o pinheiro necessita de 10% e o eucalipto de 15% (Carrillo-Varela, Pereira e Mendonça, 2018). Também ficou evidente que o pico em 20° ficou mais largo, evidenciando um menor grau de cristalização. Quanto a semelhança dos picos da fibra do curauá in natura com a holocelulose extraída podemos atribuir essa semelhança à alta porcentagem de holocelulose presente na fibra cerca de 83,94%, onde a mesma apresentou baixos teores de lignina e extrativos, resultados estes observados na análise lignocelulósica da fibra.

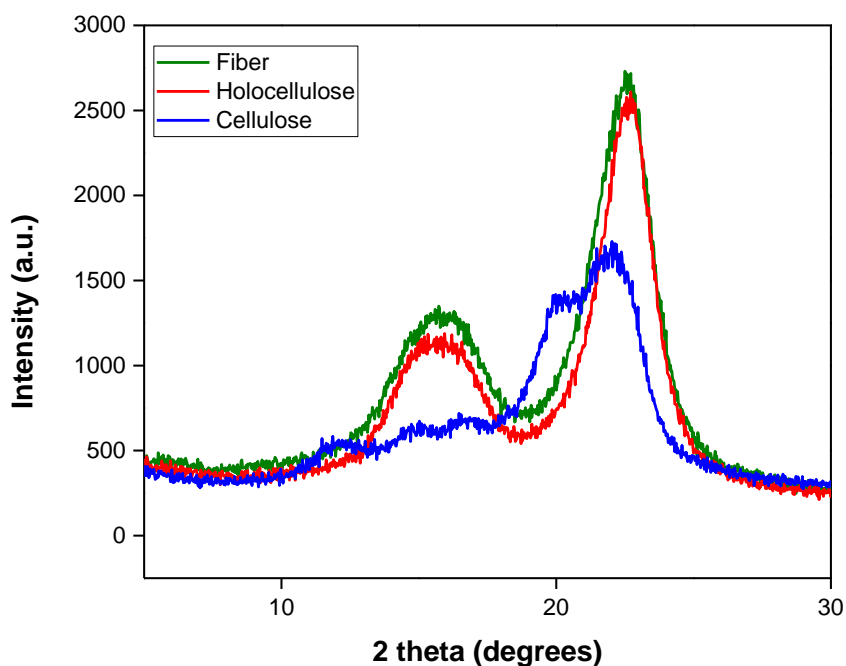


Figura 41: Difractogramas obtidos para as fibras das folhas do curauá, holocelulose e celulose extraídas das fibras.

Fonte: a autora.

A cristalinidade é um parâmetro de suma importância para as fibras, visto que está diretamente relacionada com a resistência mecânica, além de influenciar consideravelmente na estabilidade térmica das fibras (Karimah *et al.*, 2021; Poletto, Ornaghi e Zattera, 2014). Assim, uma maior cristalinidade da fibra poderia ser considerada como um fator de escolha das fibras durante a fabricação de compósitos, por exemplo. Por meio do cálculo de Segal, calculamos a cristalinidade da fibra do curauá *in natura*, a qual apresentou um índice de cristalinidade (CI) de 50.64% superior ao CI obtido por Poletto *et al.*, 2014 para as fibras de curauá (43.5%), juta (34.3%), kenaf (34.9%), e ramie (34.8%) ao aplicar essa mesma metodologia. Ao utilizar o cálculo de Hermans, a cristalinidade do curauá produzido neste trabalho se mostrou ainda maior (76.8%), superior à CI observada por Poletto *et al.*, 2014 para o curauá pela mesma metodologia (60.6%). Segundo Poletto *et al.* 2014, a metodologia de Segal considera apenas a parte da cristalinidade presente no plano (200), enquanto a de Hermans considera esse plano cristalográfico mais outros importantes planos em (1-10) e (110), o que torna a metodologia de Hermans mais confiável, embora Segal ofereça um bom parâmetro de comparação.

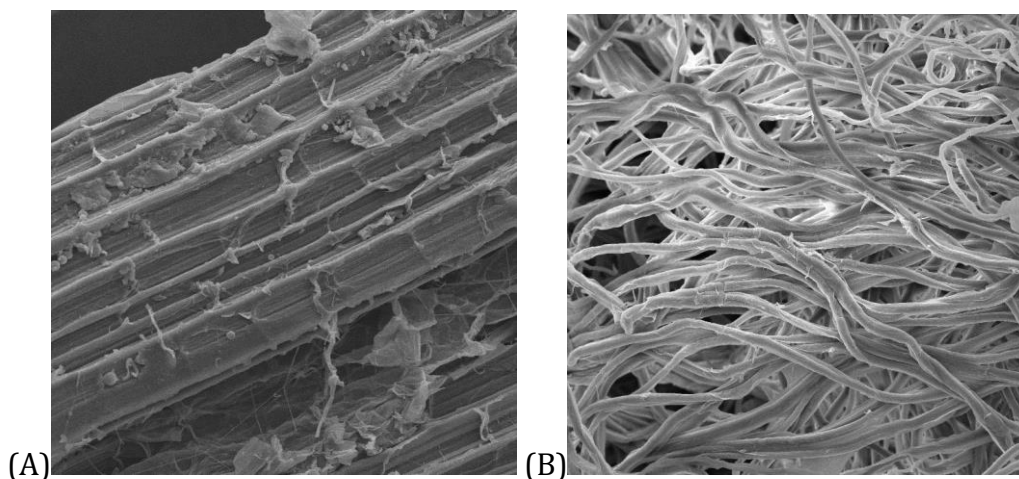


Figura 42: Microscopia das fibras do curauá produzidas in vitro (A) e da celulose extraída com alto percentual (77.17 ± 1.18 %) a partir das fibras (B).

Fonte: a autora.

Ao observar a morfologia das amostras (Figura 42), pode-se notar que a amostra in natura (Figura 42A) possui uma superfície mais compacta e lisa, o que pode estar relacionada à ceras, pigmentos, óleos e materiais amorfos. A literatura reporta que existem diversos métodos para modificação da superfície da fibra, tais como alongamento, calandragem e produção de fios híbridos podem influenciar a ligação mecânica da matriz polimérica (Jay Amarasekera et al., 2009; Spinacé et al., 2009). Após tratamento com agente oxidante (Figura 42B) foi possível observar um aumento na rugosidade superficial, e se pode mencionar que esse aumento da área superficial pode resultar em uma melhor adesão na interface da matriz polimérica na confecção do compósito, além de aumentar à tração e o alongamento na ruptura do composto (Spinacé et al., 2009).

4.8 COMPÓSITO

Após o teste realizado na indústria, foi validada a viabilidade técnica, ou seja, a fibra do curauá é factível para a produção de tampos para as garrafas térmicas. Foi também identificado o viés sustentável em fazer um uso adequado e correto para o resíduo industrial. A empresa em questão, produz aproximadamente 1,5t/mês desse material inerente ao processo, como peças fora do padrão de qualidade e decorrentes de refugos, galhos e aparas acumulados após a injeção das peças. Com o teste observou-se que a fibra do curauá é promissora para o desenvolvimento de outros produtos admitindo outros processos de fabricação, a saber, o processo de fabricação de painéis utilizados na construção civil e na indústria moveleira, entre outros.

CAPÍTULO 5

Processos de produção

Neste capítulo será descrito os dois processos de produção dos compósitos com a fibra do curauá com distintos materiais e processos produtivos para o desenvolvimento de dois produtos diferentes.

5.1 COMPÓSITO OBTIDO POR MEIO DA MISTURA DA FIBRA COM O POLÍMERO POLIPROPILENO QUE PRODUZ UMA TAMPA DE VEDAÇÃO PARA GARRAFA TÉRMICA.

Inicialmente, foi feita uma visita técnica à uma indústria, localizada no distrito industrial da cidade de Manaus – AM para verificar a possibilidade de triturar a fibra do curauá. Essa indústria, trabalha com a fibra de juta para a fabricação de tampas de vedação (peça inferior) para as garrafas térmicas. Esta indústria, pretende mudar de fibra devido ao resultado opaco e uma aparência de material reciclado diminuindo o valor comercial da garrafa térmica. Neste sentido, foi proposta uma nova visita na fábrica com o material coletado para um possível teste com a finalidade de substituir a fibra do agave pela fibra do curauá.

Na segunda visita à indústria em questão para a produção de um teste com as fibras do curauá (Figura 43A), foram levadas embalagens de polímeros (Polipropileno-PP) (Figura 43B) comercializados como recipientes para produtos alimentícios, como por exemplo, pote de margarina e potes de sorvete, coletadas com a ajuda de amigos e familiares. A finalidade seria juntar o material polimérico triturado com as fibras e resultar um novo material.

Após a análise das embalagens elas foram descartadas para a realização do teste pois havia resíduos de gordura do interior dos recipientes, assim como, restos de adesivo dos rótulos das embalagens, por fim, o técnico da indústria que acompanhou o experimento definiu a natureza das embalagens contaminadas, imprópria para o experimento em questão. Era necessário um processo específico de higienização e sanitização adequado feito pela própria indústria. Como também era relevante conhecer qual dos três tipos de polímeros de PP comercializados mais comumente, era produzida aquelas embalagens. Esta informação não foi informada nos rótulos. A indústria opera seguindo um protocolo que determina os materiais e o modo operacional, neste caso, ela trabalha apenas com PP homopolímero.



Figura 43: Fibra de curauá (A) e embalagens de PP pós-consumo trituradas (B).

Fonte: a autora.

Como substituição das embalagens descartadas foram utilizados os materiais descartados pela própria indústria (Figura 44 A e B), refugos, reaproveitamento de polímeros defeituosos, as aparas e produtos que estão fora da qualidade, este tipo de material compreende a uma tonelada por mês.

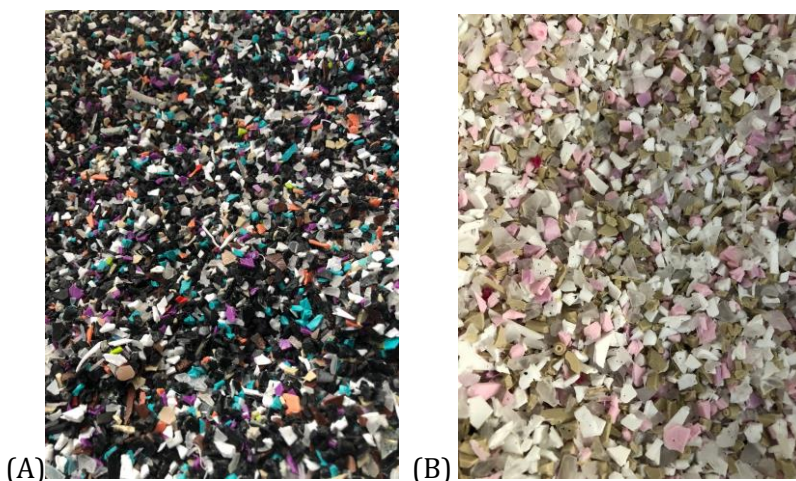


Figura 44: Resíduos industriais de PP homopolímero separados em (A) cores escuras e (B) cores claras.

Fonte: a autora.

Foram separados sete quilos do material de cor mais clara (Figura 44B) para o equipamento aglutinador (triturador de fibra) (Figura 45B). A princípio a fibra do curauá foi pesada (465 g) (Figura 45A) triturada por sete minutos, onde observou-se que ainda havia pedaços grandes da fibra (Figura 46A), sendo necessário um maior tempo de permanência no triturador. Assim, esta permaneceu por mais sete minutos, chegando a um tamanho satisfatório. Em seguida, foi adicionado o resíduo polimérico (Figura 46B).



(A)



(B)

Figura 45: Fibra de curauá sendo pesada (A) e equipamento aglutinador utilizado para mistura (B).

Fonte: a autora.



(A)



(B)

Figura 46: Amostra de fibra após 7 min. no aglutinador (A) e adição do PP ao aglutinador (B).

Fonte: a autora.

O material deve estar bem triturado, visto que as partes maiores de fibra interferem na extrusora, a qual seria a etapa seguinte. A partir da análise visual na Figura 46A, verificou-se a presença aparente das fibras, sendo este um fator indesejado para a indústria. Desse modo, foram retirados dois quilos do material e acrescentaram mais sete quilos do material polimérico, resultando em 2% de fibra na mistura (Figura 47).

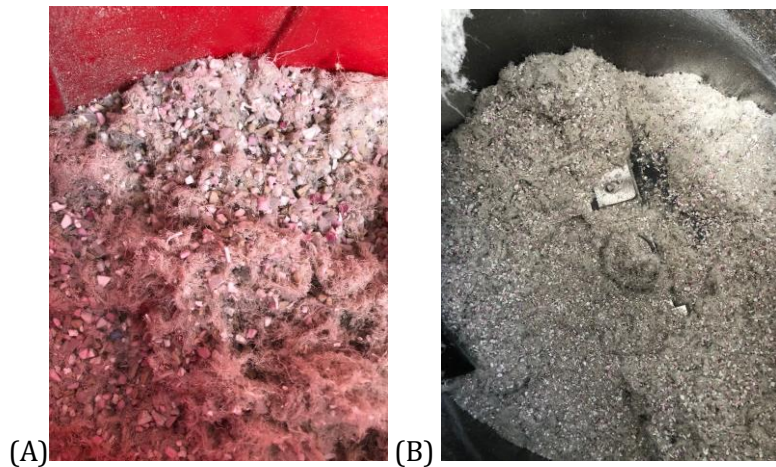


Figura 47: Amostras de PP e fibra aglutinadas.

Fonte: a autora.

Finalizado a trituração, o material foi colocado na extrusora, onde foi aquecido e modificou sua morfologia, a qual apresentava-se como uma massa (Figura 47) e, posteriormente, assumiu a forma de filamentos (Figura 48A). Os filamentos endureceram quando resfriados em água (Figura 48A) e seguiram para a máquina de corte (Figura 48B), passando por uma peneira (Figura 49B) que padroniza o tamanho dos pellets (peças menores).

De nove quilos de mistura obteve-se 697 g de pellets no tamanho padrão esperado (Figura 50A).



Figura 48: Filamento sendo resfriado e preparado para o corte (A) e equipamento responsável pelo corte (B).

Fonte: a autora.



Figura 49: Pellets fora do padrão (A) e processo de peneiramento dos pellets (B).

Fonte: a autora.

Por fim, foi colocada na máquina injetora (Figura 50B) para moldar a peça final. O resultado da peça produzida com a fibra do curauá foi satisfatório visualmente, superando as expectativas, tanto no brilho, cor e acabamento superficial. A peça com a fibra de juta tinha um aspecto de peça envelhecida, um fato que incomodava bastante o fabricante e, por isso, buscava outras fibras.



Figura 50: Pesagem dos pellets (A), operador alimentando a injetora (B).

Fonte: a autora.



Figura 51: Saída da dupla de peças da injetora (A), peças injetadas com fibra (B).

Fonte: a autora.

Vale a pena ressaltar que, após o teste validar a viabilidade técnica, concluiu-se que a fibra do curauá é factível para a produção de tampos de garrafas térmicas, atendendo às expectativas do fabricante quanto a cor, brilho, aparência de produto novo, sustentabilidade e resistência.

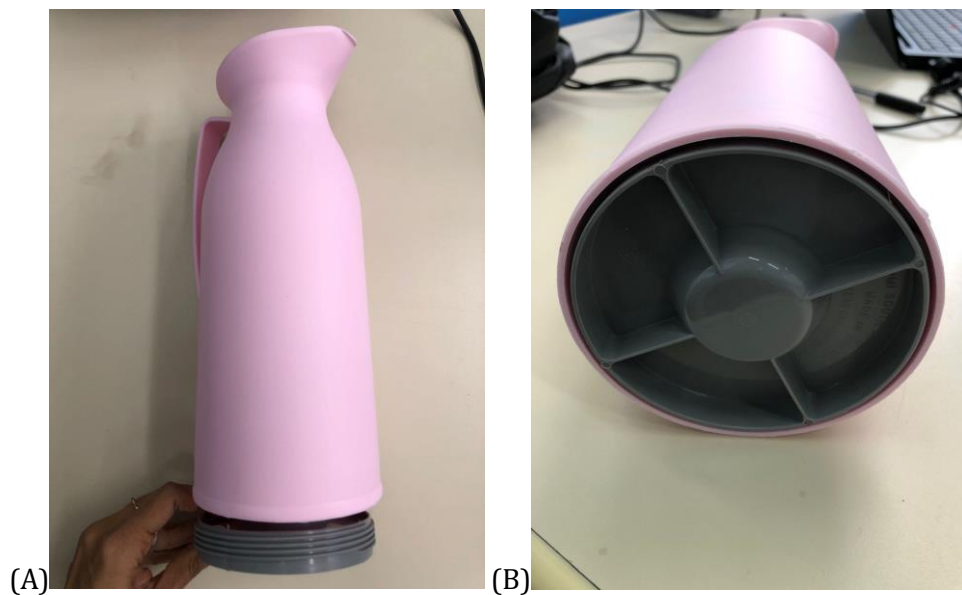


Figura 52: Vistas do componente aplicado ao produto.

Fonte: a autora.

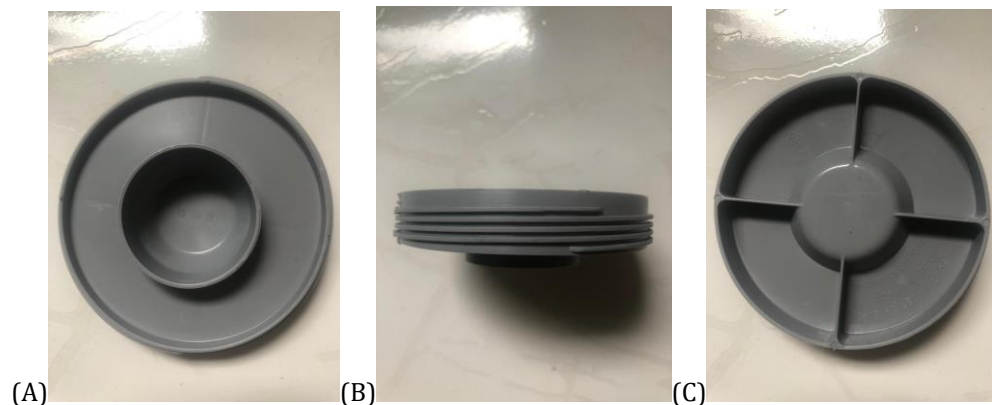


Figura 53: Vista superior (A), lateral (B) e posterior (C).

Fonte: a autora.

5.2 COMPÓSITO QUE RESULTA UM PAINEL PARA O EMPREGO DE SOLADO DE SAPATO.

5.2.1 Produção do painel

Esta seção foi realizada e escrita após o exame de qualificação. Neste momento, é apresentado um direcionamento e referências para a produção do painel que foi fundamentada pela norma NBR 14810/2006 - Chapas de madeira aglomerada - Parte 1, 2 e 3: Métodos de ensaio foram balizada pelas dissertações. Observamos o processo de produção pela dissertação de Quirino (2010), Estudo de matriz polimérica produzida com resina natural e fibra da semente de açaí (*Euterpe precatória*); e também advertimos a pesquisa de Santos (2013), Desenvolvimento e aplicação de compósitos à base de matriz polimérica reforçado com fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e resíduos de madeiras amazônicas. Neste contexto, inicialmente, foi empregado para a produção do painel 15% de resina – 7,5% de resina poliuterana a base de mamona bicomponente (poliol), e 7,5% de Pré-Polímero a base de petróleo (Isociato polifuncional) e foram pesadas 640 g de fibras de curauá com 50 mm de comprimento.

A seção seguinte houve um planejamento para a produção do painel, em contrapartida a prensa térmica (equipamento fundamental para a produção do compósito) apresentou um problema técnico e entrou em manutenção por tempo indeterminado, nos obrigando a mudar este planejamento da pesquisa. Dessa forma, buscamos um material com característica similar ao do compósito (característica planar), usando a madeira Pinus para a execução de modelos e protótipos e testar viabilidade técnica do solado a partir do compósito feito da fibra de curauá, resinas naturais e pré-polímero derivado de petróleo. O próximo item é um estudo preliminar do solado e suas

possibilidades formais diante do que o painel oferece por ser uma matéria-prima planar limitando a figuras geométricas e descartando as curvas e formas ondulares.

5.2.2 Estudo da forma do solado de sapato

Para iniciar o desenvolvimento do solado de sapato é necessário ressaltar que o pé humano se caracteriza como uma complexa estrutura que trabalha no suporte do corpo, recebendo e distribuindo cargas, de acordo com Dorneles (2011). No sapato, o solado é um dos elementos responsáveis por esta distribuição de cargas, acomodando os pés.

A anatomia dos pés é outro fator extremamente relevante e apresenta implicações dos pés com relação ao solado. Conforme NURKOVIĆ *et al.*, 2020 a distribuição dos dedos nos pés se apresenta de três tipos básicos: quadrados, egípcios e gregos (Figura 54) que por sua vez determina a forma do solado dos sapatos (Figura 55) trazendo a forma trapezoidal conjugada com semicírculo inserindo formas curvas e semicírculos aproximando para a forma anatômica do pé, ou seja, formas geométricas originando a forma anatômica do pé, como mostra a Figura 55 em uma vista superior. Quanto à vista lateral do pé a forma segue linhas ondulares (Figura 56)

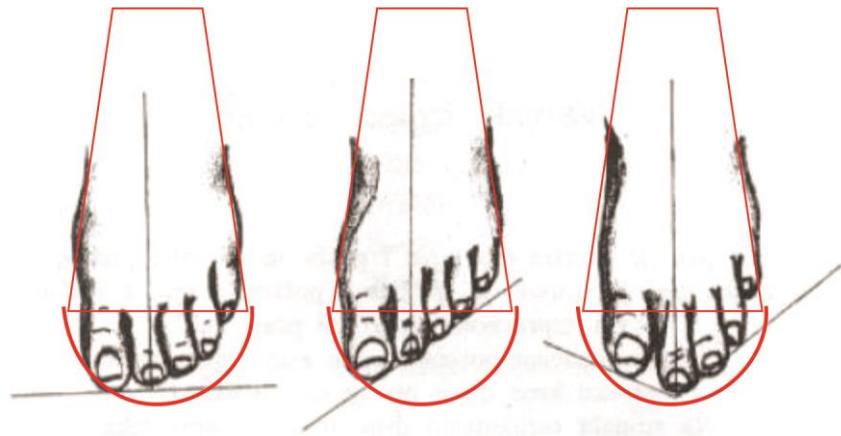


Figura 54: Estudo da forma dos solados.

Fonte: a autora.

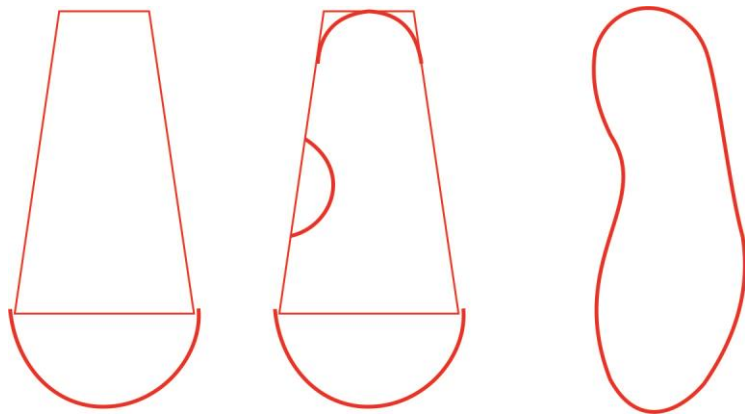


Figura 55: Formas geométricas originando a forma anatômica do pé (vista superior do pé).

Fonte: a autora.



Figura 56: Formas ondulares originando a forma anatômica do pé (vista lateral do pé).

Fonte: a autora.

Com base no estudo das formas são apresentadas algumas propostas de solados de sapatos (Figuras 57, 58 e 59).

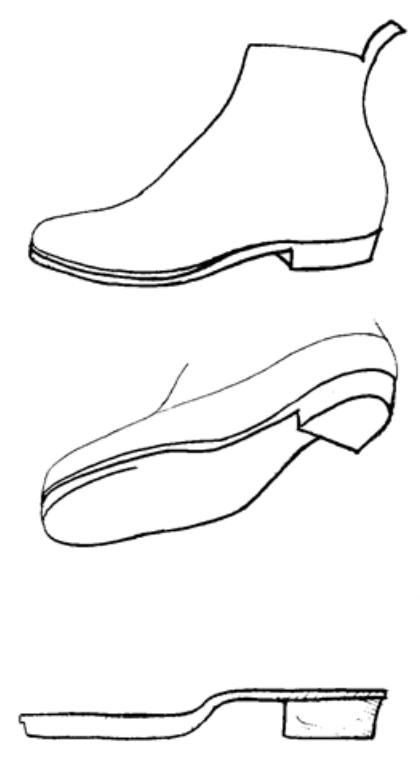


Figura 57: Primeira proposta de solado de sapato (vista lateral).

Fonte: a autora.

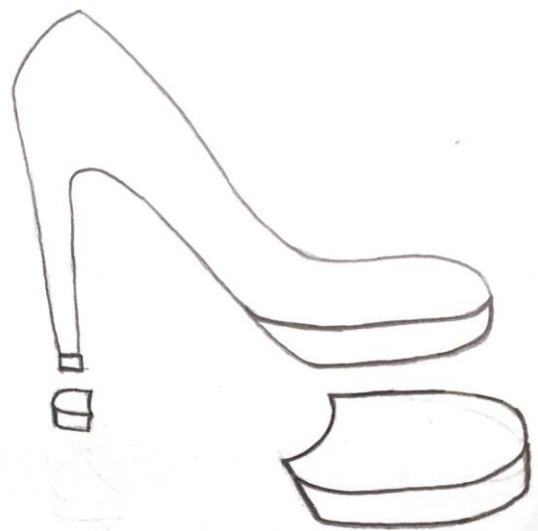


Figura 58: Segunda proposta de solado de sapato (vista lateral).

Fonte: a autora.

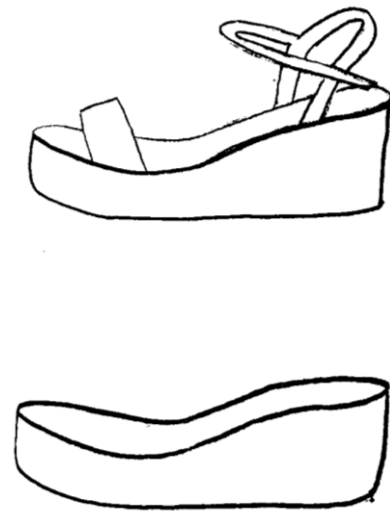


Figura 59: Terceira proposta de solado de sapato (vista lateral).

Fonte: a autora.

O solado foi produzido com painéis (planificados), sendo possível fazer ondulações sem o auxílio de um processo fabril. Como um material planificado apresentou-se como desafio, obter essas ondulações, optando-se pela sobreposição decrescente de painéis (peças), finalizando com o acabamento com ferramenta de marcenaria para nivelar as peças e alcançar as curvas desejadas. Exemplificando com a primeira (Figura 57) e terceira proposta (Figura 59), foi proposto um estudo prévio, de sobreposição dos painéis (Figura 60 e 61, respectivamente).



Figura 60: Primeira Proposta: sobreposição decrescente de painéis (vista lateral).

Fonte: a autora.

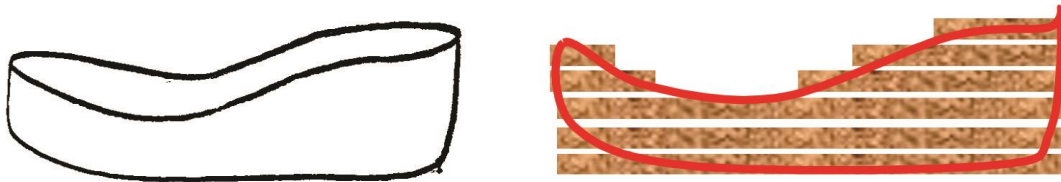


Figura 61: Terceira Proposta: sobreposição decrescente de painéis (vista lateral).

Fonte: a autora.

5.2.3 Fabricação dos modelos

Para iniciar o desenvolvimento dos modelos tridimensionais, foram feitos desenhos representativos (Figura 62 e 63), com o auxílio de software Corel Draw, de como seria a estruturação das placas e qual a maneira mais adequada de fazer os cortes e as curvas com as ferramentas de marcenaria.

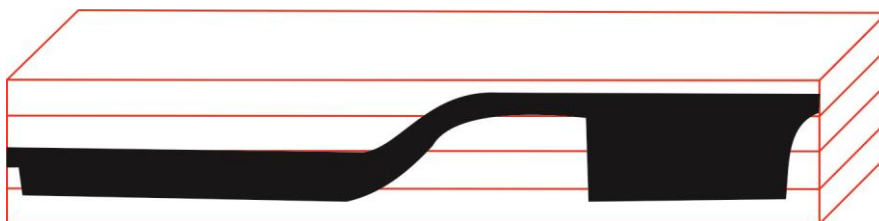


Figura 62: Representação para visualizar os cortes da proposta 1

Fonte: a autora

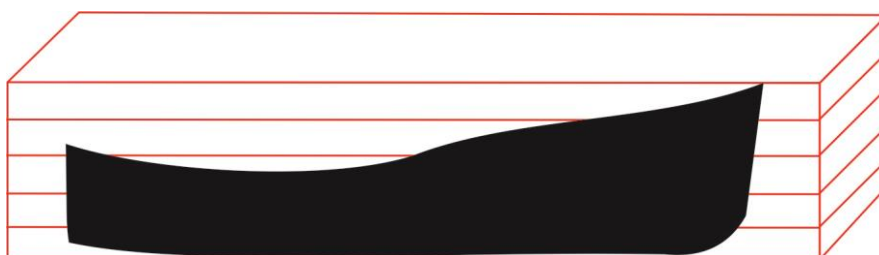


Figura 63: Representação para visualizar os cortes da proposta 3

Fonte: a autora

Depois de entender como seria o processo teórico, foi iniciada a fabricação do modelo tridimensional, utilizando madeira pinus.

Inicialmente, os blocos foram colados e prensados com o auxílio de grampos tipo sargento (Figura 64 A), depois a vista lateral do solado da proposta 1 foi colado ao bloco (Figura 64 B) afim de nortear as curvas que foram feitas com as ferramentas de marcenaria.



Figura 64: Blocos colados A e bloco com vista frontal B

Fonte: a autora

Na sequência, foram feitos pequenos cortes perpendiculares (Figura 65 A) ao desenho da peça, afim de dar a curvatura necessária.



Figura 65: Cortes perpendiculares A e processo de lixamento B

Fonte: a autora

Com auxílio de uma serra de corte elétrica, esses pequenos segmentos foram retirados e iniciou-se o processo de lixamento (Figura 65 B), finalizando o processo.

O modelo de solado da proposta 1, finalizado (Figura 66).



Figura 66: Modelo de solado da proposta 1 finalizado [Fonte: a autora](#)

O mesmo princípio que foi utilizado para o solado da proposta 1 foi mantido no solado da proposta 3, como pode ser observado na Figura 67.



Figura 67: Modelo de solado da proposta 3 finalizado

[Fonte: a autora](#)

Através da construção de modelos tridimensionais físicos, trouxeram vantagens para o ambiente do projeto, como prever algumas dificuldades ou destacar pontos positivos. A execução planejada foi executada com sucesso o que pode sugerir a utilização das mesmas técnicas e métodos para o solado feito do compósito em forma de placas.

Finalizada essa etapa, iniciamos o processo de transformar o modelo o mais real possível, utilizando um material semelhante ao couro, chamado courim para fazer o revestimento do solado, a palmilha e o cabedal (Figura 68).



Figura 68: Courim aplicado no solado (A) vista frontal (B)

fonte: a autora

Esse courim foi colado no modelo de solado com auxílio de cola de contato. Posteriormente foi colado o courim na palmilha e cabedal (Figura 69).



Figura 69: Cabedal com palminha e solado

Fonte: a autora

Segue o resultado do modelo completo de sapato finalizado em vistas (Figura 70).



Figura 70: Vista frontal (A), superior (B) e inferior (C)

Fonte: a autora

Este modelo tridimensional foi feito, de forma artesanal, afim de mostrar que seria possível executar todas as etapas de um sapato comum, com o solado feito a partir das fibras de curauá. Este solado poderia ser utilizado cru ou revestido de materiais comumente utilizados pela indústria de calçados como couro ou cordas.

CAPÍTULO 6

Conclusão

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões direcionadas ao estudo realizado durante a pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Com os problemas apresentados pelas indústrias de fibras normalmente utilizadas, a fibra de curauá aparece como uma alternativa. Mesmo assim, pouco tem sido investido na produção em larga escala dessa fibra. Neste trabalho, através de diferentes técnicas de caracterização, confirmamos que a produção do curauá *in vitro* através da cultura de tecidos é altamente vantajosa, visto que a partir de 1 única gema, é possível produzir em torno de 720 mudas. Além disso, a fibra produzida apresentou baixo teor de hemicelulose (6.8%), um bom resultado para produção de compósitos, visto que um alto teor pode atrair umidade e reduzir a interação com a matriz polimérica. Um alto teor de celulose (77.2%) também foi confirmado, o que possibilita aplicações seguras em compósitos, resultando em uma resistência termomecânica nestes materiais. Vale ressaltar que o teor de celulose obtido neste trabalho se mostrou superior aos teores encontrados em outros trabalhos com curauá produzido por técnicas convencionais. Observamos também que a fibra mostrou alto índice de cristalinidade (Segal = 50.64%; Hermans = 76.8%), o que se traduz em ótimas estabilidade térmica ($T_{onset} = 237 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e propriedades mecânicas singulares (resistência a tração = 2113 MPa e módulo elástico máximo = 151 Mpa), as quais também foram superiores aos valores apresentados pelas fibras das folhas de curauá plantado convencionalmente. Assim, os resultados mostram que é possível obter uma fibra de alta qualidade a partir do curauá produzido *in vitro*, favorecendo a indústria de fibra, bem como facilitando a produção de diversos compósitos.

No compósito formado por polipropileno reciclado e a fibra de curauá, o qual resultou uma tampa de vedação para garrafa térmica, além da viabilidade técnica, comprovada pelo experimento, também identificamos o viés sustentável em fazer um uso adequado e correto para o resíduo industrial, como também melhorando a qualidade do produto no aspecto visual aliado ao menor custo de produção. A indústria em questão, que utiliza o processo semelhante com a fibra de Juta, utilizar um pigmento escuro, afim de melhorar a aparência final do produto, com isto, modelo proposto gera economia em não utilizar pigmento de cor no material. O baixo custo agrada diretamente ao fabricante, mas também abrange a sustentabilidade no sentido de uso consciente dos recursos naturais. Sendo assim, o curauá apto para a aplicação em compósitos

Com os primeiros testes, observamos que a fibra do curauá é promissora para o desenvolvimento de outros produtos, visto que suas características se destacam dentre as demais fibras naturais mais convencionais, admitindo outros processos de fabricação e pode ser um outro caminho a ser pesquisado.

Através dos estudos e dos modelos tridimensionais em tamanho real feitos, observou-se que seria possível utilizar as mesmas técnicas para fazer o solado de sapato com o compósito a partir da fibra de curauá, resinas naturais e pré-polímero derivado de petróleo, abrindo caminhos e ampliando a aplicabilidade desta fibra nos mais diversos campos.

Sugestões para trabalhos futuros

Nesta pesquisa os resultados encontrados para a produção de compósitos feitos com a fibra de curauá, foram satisfatórios. Portanto, acreditasse que a fibra possui diversos pontos favoráveis que podem ser otimizados e aplicados em trabalhos complementares, as quais podem ser listados a seguir:

- Recomenda-se para pesquisas futuras que seja feito painel da fibra de curauá com resina natural e pré-polímero a base de petróleo. Variar a porcentagem de fibra nestes painéis e testar mecanicamente;
- Fazer aplicação dessas placas em produtos, como mobiliários;
- Avaliar um possível sinergismo entre fibras longa (curauá) e curtas (açai, por exemplo) em compósitos na forma de placas em relação à melhora das suas propriedades mecânicas;
- Fazer compósito da fibra de curauá com outro tipo de rejeito polimérico.

REFERÊNCIAS

- Alves Fidelis, M. E., Pereira, T. V. C., Gomes, O. da F. M., de Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2), 149–157. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>> Acesso em: 01/01/22.
- Andrady, A. L.; Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions Royal Society*, v. 364, n. 1526, p. 1977–1984.
- Azevedo, P. S., Santos, L. M. V., Santos, D. M. (2006). Análise de luminária de resíduos vítreos com foco no design sustentável. *Revista Liberato, Novo Hamburgo*, v. 17, n. 28, p. 119-252.
- Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Manalo, A. C., & Karunasena, W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design*, 47, 424–442. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>> Acesso em: 05/01/22
- Barros, Silma de Sá, Oliveira, E. da S., Pessoa Jr, W. A. G., Rosas, A. L. G., de Freitas, A. E. M., Lira, M. S. de F., ... Freitas, F. A. (2021). Waste açai (*Euterpe precatoria Mart.*) seeds as a new alternative source of cellulose: Extraction and characterization. *Research, Society and Development*, 10(7), 1–16.
- Barros, Silma de Sá., Pessoa Jr., W. A. G., Cruz Júnior, A., Borges, Z. V., Poffo, C. M., Regis, D. M., ... Manzato, L. (2021). Value aggregation of pine (*Araucaria angustifolia*) nuts agro-industrial waste by cellulose extraction. *Research, Society and Development*.
- Behrens, D. (1999). Curaua-Faser – eine Pflanzenfaser als Konstruktionswerkstoff? Untersuchungen zum Anbau der brasilianischen Bromelien-Art Curaua (*Ananas lucidus* Miller) und Prüfung der Blattfasern im Hinblick auf ihre technologische Nutzbarkeit - Schriftenreihe Agrarwisse (first edition). Berlin: Köster Verlag.
- Castro, D. O., Ruvolo-Filho, A., & Frollini, E. (2012). Materials prepared from biopolyethylene and curaua fibers: Composites from biomass. *Polymer Testing*, 31(7), 880–888. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.05.011>> Acesso em: 15/01/22
- Chang, W.R., Gronqvist, R., Leclercq, S., Myung, R., Makkonen, L., STRANDBERG, L., BRUNGRABER, R.J., MATTKE, U., THORPE, S.C. The role of friction in the measurement of slipperiness, Part 1: friction mechanisms and definition of test conditions *Ergonomics*, 44, pp. 1217-1232. 2001.
- Caixeta, A. S., Caixeta, F. C., Menezes Filho, F. C. M. (2018). Nano e microplásticos nos ecossistemas: impactos ambientais e efeitos sobre os organismos. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia*, v.15 n.27; p. 19.
- Carvalho, D. G., Baptista Neto, J. A. (2016). Microplastic pollution of the beaches of Guanabara Bay, Southeast Brazil. *Ocean & Coastal Management*, v. 128, p. 10-17.
- Castro, D. O., Ruvolo-Filho, A., Frollini, E. (2012). Materials prepared from biopolyethylene and curaua fibers: Composites from biomass. *Polymer Testing*, 31(7) 880-888.
- Castro, D. O.; Passador, F.; Ruvolo-Filho, A. & Frollini, E. (2016). Use of castor and canola oils in “biopolyethylene” curauá fiber composites. *Composites: Part A*, 95,22–30.
- Costa, U. O., Nascimento, L. F. C., Garcia, J. M., Bezerra, W. B. A., Fabio da Costa, G. F., Luz, F. S. da, ... Monteiro, S. N. (2020). Mechanical properties of composites with graphene oxide functionalization of either epoxy matrix or curaua fiber reinforcement. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13390–13401. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.035>> Acesso em: 11/06/21.
- Dasore, A.; Rajak, U.; Balijepalli, R.; Verma, T. N.; Ramakrishna, K. An overview of refinements, processing methods and properties of natural fiber composites, *Materials Today: Proceedings*, (In Press – Available on line 6 March 2021).
- Da Costa, C. R. (2013). Uma análise nos principais aspectos da construção calçadista para o desenvolvimento de um solado protótipo feito a partir de fibra de coco. 02 de abril de 2013. 177 pág. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo – USP.
- Da Cruz Demosthenes, L. C., Nascimento, L. F. C., Monteiro, S. N., Costa, U. O., Da Costa Garcia Filho, F., Luz, F. S. Da, ... Braga, F. O. (2020). Thermal and structural characterization of buriti fibers and their relevance in fabric reinforced composites. *Journal of Materials Research and Technology*. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.036>> Acesso: 30/01/22.
- Dames, K. D., Heise, G. D., Hydock, D. S., Smith, J. D. Obese adults walk differently in shoes than while barefoot. *Gait*

& Posture, 70, 79-83, May 2019.

Dangelo, J. G.; Fattini, C. A. Anatomia Humana Sistêmica e Segmentar. Rio de Janeiro: Atheneu, 2007.

de Lange, E. S., Balmer, D., Mauch-Mani, B., & Turlings, T. C. J. (2014). Insect and pathogen attack and resistance in maize and its wild ancestors, the teosintes. *New Phytologist*, 204(2), 329–341. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/nph.13005>> Acesso: 01/02/22.

Dorneles, P. P., Pranke, G. I., Meereis, E. C. W., Silveira, M. C., Mota, C. B. Estrutura, função e classificação dos pés: uma revisão. *EFDeportes.com, Revista Digital. Buenos Aires, Año 16, N° 161, Octubre de 2011*

Faria, A.U; Franchetti, S. M. M. (2010). Biodegradação de Filmes de Polipropileno (PP), Poli(3-hidroxiobutirato) (PHB) e Blenda de PP/PHB por Microrganismos das Águas do Rio Atibaia. *Polímeros*, volume 20, nº 2, p. 141-147.

Ferreira, S. R., Silva, F. de A., Lima, P. R. L., & Toledo Filho, R. D. (2017). 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*, 139, 551–561. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004>> Acesso em: 22/01/22.

Ferreira, S. R., Mendes de Andrade, R. G., Koenders, E., de Andrade Silva, F., de Moraes Rego Fairbairn, E., & Toledo Filho, R. D. (2021). Pull-out behavior and tensile response of natural fibers under different relative humidity levels. *Construction and Building Materials*, 308, 124823. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124823>> Acesso em 20/02/22.

Floyd, R. T.; Thompson, C. W. (2002). *Manual de Cinesiologia Estrutural*. Tradução: Isa F. Leal Ferreira. São Paulo: Manole.

Franklin, S; Grey, M.J; Heneghan, N; Bowen, L; LI, F. (2015). Barefoot vs common footwear: A systematic review of the kinematic, kinetic and muscle activity differences during walking. *Gait & Posture* 42. 230–239.

Fan, L., Linker, R., Gepstein, S., Tanimoto, E., Yamamoto, R., & Neumann, P. M. (2006). Progressive Inhibition by Water Deficit of Cell Wall Extensibility and Growth along the Elongation Zone of Maize Roots Is Related to Increased Lignin Metabolism and Progressive Stelar Accumulation of Wall Phenolics. *Plant Physiology*, 140(2), 603–612. Disponível em: <<https://doi.org/10.1104/pp.105.073130>> Acesso em: 02/02/22.

Furlanetto, L. (2019). Uso da biônica como ferramenta para a criação de sola de sapato antiderrapante para pessoas com dificuldade de locomoção em decorrência da idade. 03 de dezembro de 2019. 99 pág. Monografia. Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES.

Gato, A. M. G., Silva, S., Silva, E. L., Rodrigues, D. C., Ferreira, F. F., Pinheiro, E. N., Assunção, L. M., & Marinho, V. R. P. (2018). Desinfestação e introdução in vitro de *Ananas erectifolius* (L. B. Sm.). *Scientia Amazonia*, 7(2), 32–36.

Grieser, B. C; Frantz, J. (2018). Slip Resistance Assessment of Common Shoe Sole Materials on Selected Floor Surfaces. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 2018 Annual Meeting*.

Grüdtner, A. (2008). Intervenção fisioterapêutica no pós-operatório de tenorrafia do tendão extensor longo do hálux. Relato de caso. *Revista Digital - Buenos Aires - Año 13 - N° 120*.

Gruber, E.S.; Stadlbauer, V.; Pichler, V.; Resch-Fauster, K.; Todorovic, A.; Meisel, T. C.; Trawoeger, S.; Hollóczki, O.; Turner, S. D.; Wadsak, W.; Vethaak, A. D.; Kenner, L. (2022). To Waste or Not to Waste: Questioning Potential Health Risks of Micro- and Nanoplastics with a Focus on Their Ingestion and Potential Carcinogenicity. *Expo Health* Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12403-022-00470-8>> Acesso em: 14/04/22

G1 – Microplásticos estão presentes na água potável, mas riscos para a saúde são desconhecidos, diz OMS. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2019/08/21/microplasticos-estao-presentes-na-agua-potavel-mas-riscos-para-a-saude-sao-desconhecidos-diz-oms.ghtml>> Acesso em: 14/04/22.

Hillstrom, H.J.; Song, J.; Kraszewski, A. P.; Hafer, J. F.; Mootanah, R.; Dufour, A. B.; (Shingpui) Chow pt, B.; Deland III, J. T. (2013). Foot Type Biomechanics Part 1: Structure and Function of the Asymptomatic Foot. *Gait Posture*; 37(3): 445–451.

Hoareau, W., Trindade, W. G., Siegmund, B., Castellan, A., & Frollini, E. (2004). Sugar cane bagasse and curauá lignins oxidized by chlorine dioxide and reacted with furfuryl alcohol: characterization and stability. *Polymer Degradation and Stability*, 86(3), 567–576. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.07.005>> Acesso em: 22/10/21.

Jahan, F.; Soni, M. (2021). Effects of chemical treatment on mechanical properties of various natural fiber reinforced composite: A review. *Materials Today: Proceedings*.

- Jay Amarasekera, Santos, P. A. dos Giriolli, J. C., Moraes, G., Mano, B., & De Paoli, M.-A. (2009). The curauá challenge: optimizing natural fibres. *Plastics, Additives and Compounding*, 11(5), 12–17. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(09\)70134-5](https://doi.org/10.1016/S1464-391X(09)70134-5)> Acesso em: 11/10/21.
- Jonh, M. J.; Thomas, S. 2008. Review: Biofibres and biocomposites. *Carbohydrates Polymers*, Vol 71.
- Joseph, P. V., Rabello, M. S., Mattoso, L. H. C., Joseph, K., & Thomas, S. (2002). Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, 62(10–11), 1357–1372. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00080-5)> Acesso em: 10/10/21.
- Kavounoudias, A., Roll R., Roll J-P. (2001). Foot sole and ankle muscle inputs contribute jointly to human erect posture regulation. *J Physiol (Lond)*; 532(3):869–78.
- Karimah, A., Ridho, M. R., Munawar, S. S., Adi, D. S., Ismadi, Damayanti, R., Fudholi, A. (2021). A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 2442–2458. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014>> Acesso: 15/02/22.
- Kirakosyan, A., Kaufman, P., Warber, S., Zick, S., Aaronson, K., Bolling, S., & Chul Chang, S. (2004). Applied environmental stresses to enhance the levels of polyphenolics in leaves of hawthorn plants. *Physiologia Plantarum*, 121(2), 182–186. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2004.00332.x>> Acesso em: 03/03/22.
- Kubovský, I., Kačíková, D., & Kačík, F. (2020). Structural Changes of Oak Wood Main Components Caused by Thermal Modification. *Polymers*, 12(2), 485. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym12020485>> Acesso: 05/02/22.
- Kuranchie, C.; Yaya, A.; Bensah. Y. (2021). The effect of natural fibre reinforcement on polyurethane composite foams –A review. *Scientific African*, 11 (2021), e00722.
- Lameira, O. A., Lemos, O. F., Menezes, I. C., & Pinto, J. E. B. P. (2000). *Cultura de tecidos (manual)*. Belem.
- Landim, A. P. M.; Bernardo, C. O.; Martins, I. B.A.; Francisco, M. R.; Santos, M. B.; Melo, N. R. (2016). Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. *Polímeros*, 26(número especial), 82-92.
- Latif, R., Wakeel, S., Zaman Khan, N., Noor Siddiquee, A., Lal Verma, S., & Akhtar Khan, Z. (2019). Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(1), 15–30. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0731684418802022>> Acesso em: 13/11/21.
- Lazim, N., H.; Samat, N. (2019). The influence of irradiated recycled polypropylene compatibilizer on the impact fracture behavior of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites. *Adv Manuf Polym Compos Sci*, 40, pp. E24-E34.
- Leslie, H. A.; van Velzen, M. J. M.; Brandsma, S. H.; Vethaak, A. D.; Garcia-Vallejo, J. J.; Lamoree, M. H. 2022. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 107199
- Löbach, B. (2001). *Bases para a configuração do design industrial*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Lopattananon, N., Panawarangkul, K., Sahakaro, K., & Ellis, B. (2006). Performance of pineapple leaf fiber-natural rubber composites: The effect of fiber surface treatments. *Journal of Applied Polymer Science*. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/app.24584>> Acesso em: 11/11/21.
- Machado, E. L. (2002). *Economia de baixo carbono: petróleo e petroquímica*. São Paulo: EBC.
- Manzini, E.; Vezzoli, C. (2008). *O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais*. São Paulo: Edusp.
- Marinelli, A. L., Monteiro, M. R., Ambrósio, J. D., Branciforti, M. C., Kobayashi, M., Nobre, A. D. (2008). Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 18, nº 2, p. 92-99.
- Martel, W. de N. D. R., Salgado, I. P., & Silva, F. A. (2022). The Influence of Fiber Treatment on the Morphology, Water Absorption Capacity and Mechanical Behavior of Curauá Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 19(2), 642–657. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1758863>> Acesso em: 12/12/21.
- Mauro, C, E., de Borba, C, E. (2015). A influência da sustentabilidade no processo de design de produto. *Revista semanal da editora Abril Cultural*. Disponível em: <<https://ensur2008.paginas.ufsc.br/files/2015/09/%C3%81-influ%C3%Aancia-da-sustentabilidade-no.pdf>> Acesso em:19/08/22
- Mckeeon, P.; Hertel, J.; Bramble, D.; Davis, I. (2015). The

foot core system: a new paradigm for understanding intrinsic foot muscle function. *Br J Sports Med*; 49(290).

McAloone, T. C., Bey, N. (2009). *Environmental improvement through product development: A guide*. Danish Environmental Protection Agency.

Menin, M. (2009). *Antropometria das extremidades dos membros inferiores de obesos: parâmetros para o design ergonômico de calçados*. 89 pág. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Design (área de concentração: Desenho do Produto; linha de pesquisa: Ergonomia), da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação da Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho". Bauru.

Menezes, P. L. (2018). *Desenvolvimento e caracterização de um compósito polimérico reforçado com resíduos têxteis de tecido de juta e malha de poliéster*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

Mano, B. I. S., Spinacé, M. A. S. & De Paoli, M. A. (2006). *Compósitos de polipropileno com fibras de Curauá processados em extrusora mono ou dupla -rosca*. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 29. Campinas, SP.

Monteiro, S. N., Aquino, R. C. M. P., Lopes, F. P. D., de Carvalho, E. A. & D'almeida, J. R. M. (2006). *Comportamento Mecânico e Características Estruturais de Compósitos Poliméricos reforçados com Fibras Contínuas e Alinhadas de Curauá*. *Revista Matéria*, 11 (3), 197 – 203.

Monteiro, S. N.; Lopes, F. P. D.; Barbosa A.P.; Bevitori, A. B.; Silva, I. L. A. & Costa, L. L.; & (2011). *Natural Lignocellulosic Fibers as engineering materials – an overview*. *Metallurgical and Materials transactions A*, 42, 2963-2974.

Morais, J. P. S., Rosa, M. de F., & Marconcini, J. M. (2010). *Procedimentos para análise lignocelulósica (1a Edição)*. Campina Grande - PB: EMBRAPA ALGODÃO. Disponível em: <http://www.ghbook.ir/index.php?name=فرهنگ‌های‌رسانه&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chkhask=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component> Acesso em 29/01/22

M.R., S., Siengchin, S., Parameswaranpillai, J., Jawaid, M., Pruncu, C. I., & Khan, A. (2019). *A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization*. *Carbohydrate Polymers*, 207, 108–121. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.083>> Acesso em: 01/02/22.

Nelson, M. L., & O'Connor, R. T. (1964). *Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type. Part II. A new infrared ratio for estimation of crystallinity in celluloses I and II*. *Journal of Applied Polymer Science*, 8(3), 1325–1341. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/app.1964.070080323>> Acesso em: 22/02/22.

Neves, R. M., Lopes, K. S., Zimmermann, M. V. G., Poletto, M., & Zattera, A. J. (2019). *Characterization of polystyrene nanocomposites and expanded nanocomposites reinforced with cellulose nanofibers and nanocrystals*. *Cellulose*, 26(7), 4417–4429. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10570-019-02392-2>> Acesso em: 22/07/21.

Neves, P. Das, Cabral, M. R., Santos, V., Mafra, M. R. P., & Junior, H. S. (2021). *Technical Assessment of Leaf Fibers from Curauá: An Amazonian Bioresource*. *Journal of Natural Fibers*, 1–10. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1902897>> Acesso em: 01/01/22

Mesacasa, A. (2011). *Design sustentável e o desenvolvimento de produtos com identidade territorial*. *ModaPalavra e-periódico*, núm. 8. Florianópolis, Brasil.

Nogueira, B. P. (2018). *Análise mensal da CONAB sobre Juta/Malva e Sisal*. Brasília, DF. Disponível em: www.CONAB.br Acesso em: 11/11/21

Nurković, N., baždarević-rašidagić, A., Hadžibulić – Nurković, H., Rasidagić, F. (2020). *A simple method for determining foot deformity (jednostavne metode za procjenu deformiteta stopala)*. *Research in education and rehabilitation*. 3(1): 51-59.

Parizotto, A. V., Bubna, G. A., Marchiosi, R., Soares, A. R., Ferrarese, M. de L. L., & Ferrarese-Filho, O. (2015). *Benzoxazolin-2(3H)-one inhibits soybean growth and alters the monomeric composition of lignin*. *Plant Signaling & Behavior*, 10(2), e989059. Disponível em: <<https://doi.org/10.4161/15592324.2014.989059>> Acesso em: 10/12/21.

Park, J. Y. (2012). *Gauging the emerging plus-size footwear market an anthropometric approach*. *Clothing and Textiles Research Journal*, 31(1), 3–16.

Pé com dor. Disponível em: <<https://www.pessemdor.com.br/saude-e-qualidade-de-vida-a-relacao-com-os-pes-tornozelos-e-joelhos/tipo-de-pe/>> Acesso em: 25/11/21.

Pereira, P. H. F., De Freitas Rosa, M., Cioffi, M. O. H., De Carvalho Benini, K. C. C., Milanese, A. C., Voorwald, H. J. C., & Mulinari, D. R. (2015). *Vegetal fibers in polymeric composites: A review*. *Polimeros*. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1590/0104-1428.1722>> Acesso em: 12/07/21.

Pereira, F. D., Pinto, J. E. B. P., Rodrigues, H. C. A., Rosado, L. D. S., Beijo, L. A., & Lameira, O. A. (2006). Proliferação in vitro de brotos de curauá utilizando diferentes volumes de meio de cultura. *Plant Cell Culture & Micropropagation*, 2(2), 102–106.

Pimentel, M. G.; Borges, J. P. C.; Picanço, M. S.; Ghavam K. Resposta à flexão e análise de tenacidade de argamassas reforçadas com fibra de Curauá. *Revista Matéria*, v.21, n.1, pp. 18 – 26, 2016.

Pino, V., Ayala, J., Gonzalez, V., & Afonso, A. (2007). Determination of the alkyl- and methoxy-phenolic content in wood extractives by micellar solid-phase microextraction and gas chromatography–mass spectrometry. *Talanta*, 73(3), 505–513. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.04.013>> Acesso em 08/08/21.

Poletto, M., Ornaghi, H., & Zattera, A. (2014). Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties. *Materials*, 7(9), 6105–6119. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma7096105>> Acesso em: 11/11/21.

Queiroz Minillo, L., Cesar de Castro Cardoso, B., & Orteni, A. (2021). Design of nautical cleat for small-medium boats using hybrid curauá-glass fiber-reinforced epoxy. *Materials Today: Proceedings*, 34, 341–349. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.074>> Acesso em: 05/01/22.

Quirino, M. G. (2010). Estudo de matriz polimérica produzida com resina natural e fibra da semente de açaí (Euterpe precatória). 2010. 156p. Universidade Federal do Amazonas. Manaus.

Rajan, V. P.; Goel, S. (2021). Recyclability of polypropylene after exposure to four different environmental conditions. *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 169, 105494.

Rambo, M. K. D., Schmidt, F. L., & Ferreira, M. M. C. (2015). Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta*, 144, 696–703. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.TALANTA.2015.06.045>> Acesso em: 15/01/22.

Ramos, F. J. H. T. V.; Reis, F. H. M.; Grafova, I.; Grafov, A.; Monteiro, S. N. (2020). Eco-friendly recycled polypropylene matrix composites incorporated with geopolymer concrete waste particles. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 9, Issue 3, Pages 3084-3090.

Robbins, S., Waked, E. (1997). Balance and vertical impact in sports: Role of shoe sole materials. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 78 (5), 463-467.

Rodrigues, J.; Fujiyama, R.; Souza, J. A. (2015). Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais da Amazônia fabricados por infusão. *Revista Matéria*, v.20, n.4, pp. 946– 960.

Santos, F. R. S. Desenvolvimento e aplicação de compósitos à base de matriz polimérica reforçado com fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e resíduos de madeiras amazônicas. 2013. 134p. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2013.

Salgado, I. P.; Silva, F.A. (2021). Flexural behavior of sandwich panels combining curauá fiber-reinforced composite layers and autoclaved aerated concrete core. *Construction and Building Materials*, 286, 122890-122902.

Sanjay, M.R., Arpitha, G.R., Naik, L.L., Gopalakrishna, K.; Yogesha, B. (2016). Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. *Natural Resources*, 7, 108-114.

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. 2013. 134p. Universidade Federal do Amazonas. Manaus.

Satyanarayana, K. G., Guimarães, J. L., & Wypych, F. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.02.006>

Silva, G., Kim, S., Aguilar, R., & Nakamatsu, J. (2020). Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry. *Sustainable Materials and Technologies*, 23, e00132. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00132>

Silva, M. P. P. (2017). Sandália Andarilha: mobilidade e estilo para idosos. 138 pág. Trabalho de conclusão de curso, Curso de Desenho Industrial, da Escola de Belas Artes do Departamento de Desenho Industrial da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Silva, F. de A., Mobasher, B., & Filho, R. D. T. (2009). Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 721–730. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>> Acesso em: 01/02/22

- Silva, A. O.; Monsores, K. G. C.; Oliveira, S. S.; Weber, R. P.; Monteiro, S. N. (2018). Ballistic behavior of a hybrid composite reinforced with curauá and aramid fabric subjected to ultraviolet radiation. *J Mater Res Technol.* 7(4):584–591.
- Silva, G., Kim, S., Aguilar, R., & Nakamatsu, J. (2020). Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry. *Sustainable Materials and Technologies*, 23, e00132. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00132>> Acesso em: 23/11/21.
- Silva, T. A. L., & Tambourgi, E. B. (2011). Estudo da Estabilidade da Enzima Bromelina Extraída do Curauá roxo (*Ananas erectifolius*). *Scientia Plena*, 7(1), 1–5.
- Sisti, L.; Kalia, S.; Totaro, G.; Vanninia, M.; Negronia, A.; Zanarolia, G.; Celli, A. Enzymatically treated curauá fibers in poly(butylene succinate)-based biocomposites. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, (4), 4452-4458.
- Shih, K. S., Jhou, S. Y., Hsu, W.C., Hsu, W.C.J.W., Jeh, J. C., Hung, Y. (2020). A biomechanical investigation of athletic footwear traction performance: integration of gait analysis with computational simulation. *Appl. Sci. Basel (Basel)*, 10 (1672).
- Spahiu, T; Almeida, H; Asceno, R. M. T; Vitorino, L. (2021). Optimization of shoe sole design according to individual feet pressure. *Computer in Industry* 125. 103375.
- Spadetti, C. Filho, E. A. S., De Sena, G. L.; De Melo, C. V. P. (2017). Propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de Polipropileno pós-consumo reforçados com fibras de celulose. *Polímeros*, 27(número especial), p.84-90.
- Spinacé, M. A. S., Janeiro, L. G., Bernardino, F. C., Grossi, T., De Paoli, M. A. (2009) Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal x curauá. In: Congresso Brasileiro de Polímeros., 10, 2009, Foz do Iguaçu, PR. Anais.
- Soltan, D. G., das Neves, P., Olvera, A., Savastano Junior, H., & Li, V. C. (2017). Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior. *Industrial Crops and Products*, 103, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.016>
- Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., Rimašauskiene, R. (2019). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings* 21, 1559–1562.
- Shekar, H.S.; Ramachandra, M. (2018). Green composites: a review, *Mater. Today: Proc.* 5 (1). 2518–2526.
- Spadetti, C. Silva Filho, E. A., Sena, G. L., Melo, C. V. P. (2017). Propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de Polipropileno pós-consumo reforçados com fibras de celulose. *Polímeros*, 27(número especial), p.84-90.
- Spinacé, M. A. S., Janeiro, L. G., Bernardino, F. C., Grossi, T., De Paoli, M. A. (2009). Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal x curauá. In: Congresso Brasileiro de Polímeros., 10, Foz do Iguaçu, PR. Anais. 2009.
- Spinacé, M. A. S., Lambert, C. S., Fermoselli, K. K. G., & De Paoli, M.-A. (2009). Characterization of lignocellulosic curauá fibres. *Carbohydrate Polymers*, 77(1), 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.12.005>
- Sun, H., Guo, W., Wang, L. Lin, M. (2022). A data-driven adaptive design for achieving sustainable product. *Procedia CIRP*. Volume 109, 2022, Pages 316-321.
- TAPPI. T 203 cm-99. Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. 2009, 7 p.
- TAPPI. T 204 cm-97. Solvent extractives of wood and pulp. 1997, 4 p.
- TAPPI. T 211 om-02. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. 2002b, 5 p.
- TAPPI. T 222 om-02. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. 2002c, 5 p.
- TAPPI. T 413 om-93. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 900 °C. 1993, 4 p.
- TAPPI. T 421 om-02. Moisture in pulp, paper and paperboard. 2002a, 3 p.
- Tamargo, A.; Molinero, N.; Reinoso, J.J.; Rodriguez, V. A.; Portela, R.; Bañares, M. A.; Fernández, J. F.; Moreno-Arribas, M. V. 2022. PET microplastics affect human gut microbiota communities during simulated gastrointestinal digestion, first evidence of plausible polymer biodegradation during human digestion. *Sci Rep* 12, 528.
- Thomas, G. P. (2012). Recycling of Polypropylene (PP). Disponível em: <<https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=240>> Acesso em: 07/02/22.
- Toda Matéria. <<https://www.todamateria.com.br/ossos-do-pe/>> Acesso em: 21/11/21.

- Tserki, V., Matzinos, P., Kokkou, S., & Panayiotou, C. (2005). Novel biodegradable composites based on treated lignocellulosic waste flour as filler. Part I. Surface chemical modification and characterization of waste flour. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(7), 965–974.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.11.010>
- Vaughan, C. L., Davis, B. L., C O'Connor, J. (1999). *Dynamics of Human Gait* (2nd edition). Cape Town, South Africa. Kiboho Publishers.
- Valente, E. P; Paschoarelli, L. C. (2009). Design ergonômico: análise do conforto e desconforto dos calçados com salto alto. Paschoarelli, L.C., and Menezes, MS. *Design e ergonomia: aspectos tecnológicos* [online]. São Paulo: Editora UNESP; São Paulo: Cultura Acadêmica, 279 p.
- Valente, E. L. (2007). Análise da percepção de desconforto/conforto e antropometria em calçados femininos: uma abordagem do design ergonômico. 102 págs. Dissertação de mestrado. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Bauru.
- Veloso de Carvalho, V.; Pal, K.; Gomes de Souza Junior, F.; Toledo Filho, R. D.; Almeida, T. M.; Pereira, E. D.; Thode Filho, S.; Aboelkheir, M. G.; Costa, V. C.; Lima, N. R. B.; Maranhão, F. S. (2021). Polyaniline and magnetite on curauá fibers for molecular interface improvement with a cement matrix. *Journal of Molecular Structure*, 1233, 130101-130109
- Wang, C-S. (2010). An analysis and evaluation of fitness for shoe lasts and human feet. *Computers in Industry* 61. Taichung. 532–540.
- Wan, C. K., Lin, Y. (2022). Negotiating social value, time perspective, and development space in sustainable product design: A dialectics perspective. *Design Studies* Volume 81, 101121.
- Watz, M., Hallstedt, S. I. (2022). Towards sustainable product development – Insights from testing and evaluating a profile model for management of sustainability integration into design requirements. *Journal of Cleaner Production*. Volume 346, 131000.
- Watkins, M., Casamayor, L. J., Ramirez, M. Moreno, M., Faludi, J., Pigosso, D. C. A. (2021). Sustainable Product Design Education: Current Practice. *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation*. Volume 7, Issue 4, Pages 611-637.
- Yao, F., Wu, Q., Lei, Y., Guo, W., & Xu, Y. (2008). Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 93(1), 90–98.
Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.10.012>> Acesso: 25/01/22
- Zimmermann, T., Bordeanu, N., & Strub, E. (2010). Properties of nanofibrillated cellulose from different raw materials and its reinforcement potential. *Carbohydrate Polymers*, 79(4), 1086–1093. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.045>> Acesso: 18/01/22
- Zorn, G. (2007). Dossiê técnico Processo de fabricação do calçado. SENAI-RS Centro Tecnológico do Calçado.
- Zukowski, B., de Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2018). Design of strain hardening cement-based composites with alkali treated natural curauá fiber. *Cement and Concrete Composites*, 89, 150–159.
Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.006>> Acesso em: 05/02/22
- Zukowski, B., dos Santos, E. R. F., dos Santos Mendonça, Y. G., de Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2018). The durability of SHCC with alkali treated curauá fiber exposed to natural weathering. *Cement and Concrete Composites*, 94, 116–125. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.002>> Acesso em: 15/02/22.