



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

HAIANNY BEATRIZ SARAIVA LIMA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CHAMAS DE COMPÓSITOS
POLIÉSTER ISOFTÁLICO INSATURADO COM RESÍDUO DE LAMA
VERMELHA E FIBRA DE BAMBU**

Ananindeua, PA
2022

HAIANNY BEATRIZ SARAIVA LIMA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CHAMAS DE COMPÓSITOS
POLIÉSTER ISOFTÁLICO INSATURADO COM RESÍDUO DE LAMA
VERMELHA E FIBRA DE BAMBU**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do grau de bacharela em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

Coorientador: Me. Bruno Henrique Alves Mendes

Ananindeua, PA
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

L732a Lima, Haianny Beatriz Saraiva.
Avaliação da resistência à chamas de compósitos poliéster isoftálico insaturado com resíduo de lama vermelha e fibra de bambu / Haianny Beatriz Saraiva Lima. — 2022.
67 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Prof. Me. Bruno Henrique Alves Mendes
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2022.

1. Compósitos. 2. Fibras naturais. 3. Resíduo industrial. 4. Matriz polimérica. I. Título.

CDD 620.11

HAIANNY BEATRIZ SARAIVA LIMA

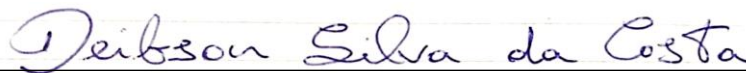
**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CHAMAS DE COMPÓSITOS
POLIÉSTER ISOFTÁLICO INSATURADO COM RESÍDUO DE LAMA
VERMELHA E FIBRA DE BAMBU**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do grau de bacharela em Engenharia de Materiais.

Data da defesa: 14/04/2022

CONCEITO: Exceleente

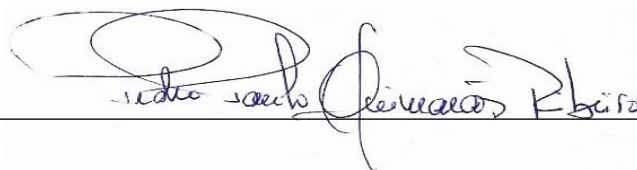
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Orientador)



Me. Eng. Bruno Henrique Alves Mendes
(PPGEQ/ITEC/UFPA - Coorientador)



Prof. Me. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro
(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Examinador Interno)



Me. Eng. Fábio de Andrade Pontes
(PRODERNA/ITEC/UFPA - Examinador Externo)

Ananindeua, PA
2022

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, sem ele nada, absolutamente nada, na minha vida seria possível.

Ao meu pai José Luis por todo ensino, suporte e lições de vida, sem ele também nada disso seria concreto.

A minha mãe Joelma Saraiva e meu irmão Ranon Luis por todo apoio e incentivo.

Ao meu gatinho que sempre me alegrou nos momentos difíceis.

Ao Jeovan Ramos por todo carinho e cuidado comigo.

Aos bons amigos que me ajudaram, principalmente ao Rodrigo Marinho que tornou a graduação mais leve e divertida.

Ao meu coorientador Me. Bruno Mendes, que foi fundamental não só como coorientador mas como um grande amigo fazendo com que os dias de trabalho fossem mais prazerosos, gratidão por todos os ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Deibson Silva da Costa, pelo apoio, disponibilidade e por sempre me ajudar desde o começo da graduação.

A Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Laboratório de Engenharia Química (LEQ), ao Laboratório de Física Experimental e Computacional (LFEC) e ao grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS) por todo apoio durante a pesquisa.

RESUMO

Foram fabricados materiais compósitos de matriz polimérica com inserção de fibras naturais de bambu e resíduo industrial de lama vermelha proveniente da indústria de beneficiamento da bauxita, levando em consideração a sustentabilidade, a grande disponibilidade de fibras vegetais na Amazônia e a problemática dos resíduos industriais que podem, através da má disposição, gerar grandes impactos ambientais. A produção seguiu o método de fabricação manual *hand lay-up* em molde de silicone com pressão, com percentual mássico de 5 % para as fibras naturais no tamanho de 30 mm, e de 20 % e 40 % para o resíduo industrial que passou pelo processo de beneficiamento obtendo granulometria de 325 Mesh da série Tyler. A matriz utilizada foi a resina poliéster isofitálica insaturada, com acelerador de cobalto na proporção de 1,5 % v/v e catalisador butanox M-50 na proporção de 1 % v/v. A análise micrográfica da fibra e do resíduo foi realizada através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com Sistema de Energia Dispersiva (EDS). Após etapa de confecção dos corpos de prova realizou-se os ensaios físicos de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente segundo as normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792. A taxa de propagação de chama foi determinada através do ensaio de flamabilidade horizontal (ASTM D 635) e por fim realizou-se o ensaio mecânico de resistência à flexão (ASTM D 790) com análise de superfície de fratura através do MEV. A análise microestrutural evidenciou particularidades dos reforços, sendo possível observar poros e rugosidades presente nas fibras, assim como a morfologia do resíduo e diferentes tamanhos de partículas. A Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) apresentou alguns elementos presentes no resíduo. Nos ensaios físicos observou-se um aumento na absorção de água e porosidade aparente conforme foram inseridos os reforços (fibra e resíduo). Nos ensaios de flamabilidade notou-se excelentes resultados no retardo à chama para os compósitos com a inserção do resíduo na matriz com destaque para a fração mássica de 40 % de lama vermelha que extinguiu a chama. Nos ensaios de flexão os compósitos obtiveram resultados superiores ao da matriz plena. Através da análise fractográfica notou-se a presença de trincas, poros, bolhas, além de mecanismo de deslocamento e arrancamento de fibras. Os materiais fabricados se candidatam em algumas aplicações, tais como divisórias de parede, painéis e materiais que não exijam elevado esforço mecânico com isso atribuindo utilidade a um resíduo que a princípio seria descartado degradando o meio ambiente.

Palavras-chave: Compósitos, Fibras naturais, Matriz polimérica, Resíduo industrial.

ABSTRACT

Polymeric matrix composite materials were manufactured with the insertion of natural bamboo fibers and industrial waste of red mud from the bauxite processing industry, taking into account sustainability, the wide availability of plant fibers in the Amazonia and the problem of industrial waste that can, through bad disposition, generate great environmental impacts. The production followed the manual manufacturing method *hand lay-up* in a silicone mold with pressure, with a mass percentage of 5 % for natural fibers in the size of 30 mm, and 20 % and 40 % for the industrial waste that passed through the process. of beneficiation obtaining granulometry of 325 Mesh from the Tyler series. The matrix used was unsaturated isophthalic polyester resin, with cobalt accelerator in the proportion of 1,5 % v/v and butanox M-50 catalyst in the proportion of 1 % v/v. The micrographic analysis of the fiber and residue was performed using a Scanning Electron Microscope (SEM) with Dispersive Energy System (EDS). After the preparation of the specimens, the physical tests of water absorption, apparent porosity and apparent specific mass were carried out according to ASTM D 570, ASTM D 2734 and ASTM D 792 standards. The flame propagation rate was determined through the horizontal flammability test (ASTM D 635) and, finally, the mechanical flexural strength test (ASTM D 790) was carried out with fracture surface analysis through MEV. The microstructural analysis showed particularities of the reinforcements, being possible to observe pores and roughness present in the fibers, as well as the morphology of the residue and different particle sizes. The Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) showed some elements present in the residue. In the physical tests, an increase in water absorption and apparent porosity was observed as the reinforcements (fiber and residue) were inserted. In the flammability tests, excellent results were noted in the flame retardancy for the composites with the insertion of the residue in the matrix, with emphasis on the mass fraction of 40 % of red mud that extinguished the flame. In the bending test the composites obtained better results than the full matrix. Through fractographic analysis, noted the presence of cracks, pores, bubbles, as well as a mechanism of displacement and fiber pullout. The manufactured materials are candidates in some applications, such as wall partitions, panels and materials that don't require high mechanical effort, thus attributing usefulness to a residue that in principle would be discarded, degrading the environment.

Keywords: Composites, Natural fibers, Polymer matrix, Industrial waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fatores que influenciam nas propriedades dos compósitos.....	17
Figura 2 - Fases de um compósito.....	18
Figura 3 - Cadeia poliéster isoftálica.....	20
Figura 4 - Divisão dos reforços	21
Figura 5 - Fluxograma e esquema simplificado do Processo Bayer	26
Figura 6 - Área de disposição de lama vermelha, Aughinish, Irlanda	28
Figura 7 - Área do reservatório de resíduos de alumínio - Hungria.....	28
Figura 8 - Casa de bambu	30
Figura 9 - Resina (a); acelerador (b) e iniciador (c)	33
Figura 10 - Fibras de bambu antes do corte (a); separadas em feixes (b) e pós corte (c)	34
Figura 11 - Fluxograma do beneficiamento do resíduo de lama vermelha	35
Figura 12 - Fluxograma simplificado da fabricação dos compósitos em molde de silicone...	36
Figura 13 - Molde de silicone com a mistura (a) e corpos de prova com fibras de bambu (b)	37
Figura 14 - Mistura de LV depositada no molde de silicone (a) e Corpos de prova com o resíduo de LV (b)	37
Figura 15 - Fluxograma com as etapas de fabricação dos compósitos híbridos	38
Figura 16 - Vazamento sobre as fibras (a) e corpos de prova híbridos finalizados (b).....	39
Figura 17 - Metalizadora (a) e Microscópio Eletrônico de Varredura (b)	40
Figura 18 - Dimensões dos corpos de prova (em mm) utilizado na realização dos ensaios físicos	41
Figura 19 - Aparato para obtenção da massa imersa.....	41
Figura 20 - Ensaio de Flamabilidade segundo UL-94, método A.....	42
Figura 21 - Dimensões dos corpos de prova (em mm) utilizado para realização dos ensaios de flexão	43
Figura 22 - Compósitos para a análise fractográfica	44
Figura 23 - Micrografia da fibra de bambu com magnificações de 3000x (a) e 1000x (b).....	45
Figura 24 - Micrografia da lama vermelha com magnificações de 2600x (a) e 3000x (b)	46
Figura 25 - Espectroscopia por Energia Dispersiva do resíduo de lama vermelha	47
Figura 26 - Gráfico comparativo dos resíduos de lama vermelha, fibra de bambu e híbridos em relação à matriz plena, através do ensaio de flamabilidade.....	52
Figura 27 - Gráfico da relação entre tensão de resistência à flexão e porosidade aparente	53

Figura 28 - Análise fractográfica do compósito com 40 % de lama vermelha com magnificação de 200x	54
Figura 29 - Análise fractográfica do compósito com fibra de bambu com magnificação de 100x	55
Figura 30 - Fractografia dos compósitos fibrosos com magnificações de 300x (a) e 500x (b)	56
Figura 31 - Análise fractográfica do compósito híbrido com magnificação de 100x	56
Figura 32 - Fractografia do compósito híbrido com magnificação de 300x	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Característica dos compósitos poliméricos	24
Tabela 2 - Composição química da lama vermelha em diferentes países	27
Tabela 3 - Massa específica dos colmos de bambu brasileiro	31
Tabela 4 - Quantidade dos compósitos produzidos	42
Tabela 5 - Resultados dos ensaios físicos para compósitos.....	47
Tabela 6 - Resultados do ensaio de Flamabilidade.....	49
Tabela 7 - Comparativo entre o presente trabalho com outros encontrados na literatura	50
Tabela 8 - Comparação dos resultados com outras literaturas	51
Tabela 9 - Dados obtidos a partir do ensaio e flexão dos compósitos.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
Al ₂ O ₃	Alumina
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Au	Ouro
b	Largura do corpo de prova
BPO	Peróxido de Benzoila
C	Carbono
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
CCF	Caulim Ferruginoso
CP'S	Corpos de Prova
DMA	Dimetil Anilina
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
F. B	Fibra de Bambu
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro (II, III)
FNT	Fibra de bambu não tratada
H ₀	Hipótese nula
H ₂ O	Água
HB	<i>Horizontal Burning</i>
K ₂ O	Óxido de Potássio
L	Distância entre os apoios
L	Comprimento útil do corpo de prova
LAMPS	Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
LFEC	Laboratório de Física Experimental e Computacional
LV	Lama Vermelha
M. F	Minério de Ferro
MEA	Massa Específica Aparente
MEK-P	Peróxido de Metil Etil Cetona
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

MgO	Óxido de Magnésio
M _i	Massa Imersa
MnO	Óxido de Manganês
MP	Matriz Plena
M _s	Massa Seca
M _u	Massa Úmida
Na	Sódio
Na ₂ O	Óxido de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
P	Carga em um determinado ponto na curva carga-deflexão
PA	Porosidade Aparente
Pd	Paládio
PI	Perdas por Ignição
PMC	<i>Polymer Matrix Composites</i>
RCU	Resíduo de Cobre
SI	Sem Ignição
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de Silício
t	Tempo
Ti	Titânio
TiO ₂	Óxido de Titânio
TRF	Tensão de Resistência à Flexão
TSD	<i>Tukey Significant Difference</i>
UFPA	Universidade Federal do Pará
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.1 Objetivos específicos	15
1.2 Composição do trabalho	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 Materiais compósitos.....	17
2.1.1 Fase matriz.....	18
2.1.1.1 Matrizes poliméricas	19
2.1.1.2 Resina poliéster isofitálica.....	20
2.1.2 Fase reforço	20
2.1.2.1 Reforço/Cargas	21
2.1.2.2 Reforço/Fibras	22
2.1.2.3 Híbridos	23
2.1.3 Compósitos poliméricos	23
2.1.3.1 Método de fabricação (<i>Hand Lay Up</i>).....	24
2.2 Resíduo do processo Bayer – Lama vermelha	25
2.2.1 O processo Bayer.....	26
2.2.2 Características da lama vermelha	27
2.2.2.1 Problemas com a disposição da lama vermelha	27
2.2.3 Compósitos reforçados com lama vermelha.....	29
2.3 Fibras de bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>)	30
2.3.1 Características gerais	30
2.3.2 Compósitos reforçados com fibras de bambu.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 Materiais.....	33
3.1.1 Resina e sistema catalítico.....	33
3.1.2 Fibra de bambu	33
3.1.3 Resíduo de lama vermelha.....	34
3.2 Métodos	34
3.2.1 Fibra de bambu	34
3.2.2 Resíduo de lama vermelha (Beneficiamento).....	34
3.2.3 Fabricação de compósitos.....	35

3.2.3.1	Fabricação dos compósitos fibrosos	36
3.2.3.2	Fabricação dos compósitos com resíduo de LV	37
3.2.3.3	Fabricação dos compósitos híbridos.....	38
3.2.4	Caracterização morfológica (MEV/EDS).....	39
3.2.5	Ensaio físicos	40
3.2.6	Ensaio de Flamabilidade (horizontal).....	41
3.2.7	Ensaio mecânico	43
3.2.7.1	Ensaio de Resistência à Flexão.....	43
3.2.7.1.1	Análise Fractográfica.....	43
3.3	Análise Estatística.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Caracterização morfológica.....	45
4.1.1	Caracterização morfológica das fibras de bambu (MEV)	45
4.1.2	Caracterização morfológica do resíduo de lama vermelha (MEV/EDS)	46
4.2	Ensaio físicos.....	47
4.3	Ensaio de flamabilidade dos compósitos	49
4.4	Propriedades mecânicas dos compósitos – Ensaio de Flexão	52
4.4.1	Análise fractográfica dos compósitos.....	54
4.4.1.1	Compósitos de lama vermelha.....	54
4.4.1.2	Compósitos com fibra de bambu	54
4.4.1.3	Compósitos híbridos	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
5.1	Conclusões	58
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento das indústrias traz a problemática dos resíduos industriais que é uma das principais formas de degradação do meio ambiente. Dentre os vários resíduos têm-se a lama vermelha, proveniente do beneficiamento da bauxita.

No panorama global, segundo a USGS (2020), a produção de bauxita no ano de 2019 foi de 370 milhões de toneladas. O Brasil ocupa o quarto lugar com cerca de 29 milhões de toneladas anuais, atrás da Austrália com cerca de 100 milhões, Guiné com 82 milhões e China com 75 milhões de toneladas. Segundo Komnitsas *et al.* (2004) durante o processo produtivo cada tonelada de alumina gera cerca de 0,3 a 2,5 t de lama vermelha em função da qualidade da bauxita.

Há um grande interesse em dar uma destinação nobre para esses resíduos evitando seu descarte em local potencialmente nocivo ao meio ambiente, como é o caso das grandes lagoas de sedimentação onde deposita-se a lama vermelha. Segundo Nunes (2015) esse resíduo apresenta grande potencial para carga em compósitos poliméricos contribuindo também para reduções de custos de produção. Desse modo pode-se relacionar o desenvolvimento das indústrias com a sustentabilidade.

De acordo com Auersvaldt *et al.* (2019) materiais de reforços geralmente são incorporados aos compósitos frágeis no intuito de melhorar suas propriedades. A fibra sintética é um desses reforços, porém não é muito atrativa quando se leva em consideração o ponto de vista ecológico, uma vez que há um grande volume de matéria prima mineral e química utilizado para sua produção assim como o resíduo gerado. Esse conjunto de fatores concede maior visibilidade para as fibras vegetais.

O bambu é uma matéria prima bastante visada, por suas excelentes características, entre elas a boa resistência à esforços de compressão e tração, sendo o percentual de fibras do bambu responsável pela resistência física, podendo ser considerado como um material alternativo de baixo custo (BARBALHO, 2018).

Com base na problemática dos resíduos industriais e levando em consideração os parâmetros de sustentabilidade, no presente trabalho foram fabricados compósitos de matriz polimérica com resíduo de lama vermelha e fibras de bambu, realizando caracterização física, mecânica e de flamabilidade no intuito de avaliar uma melhor destinação para o resíduo.

1.1 Objetivo geral

Confeccionar materiais compósitos de matriz polimérica com resíduo industrial de lama vermelha e fibra de bambu e avaliar sua resistência à chama e seu desempenho no ensaio de flexão.

1.1.1 Objetivos específicos

- Realizar análise microestrutural do resíduo de lama vermelha e fibra de bambu;
- Fabricar materiais compósitos com resíduo de lama vermelha e fibra de bambu;
- Analisar a melhor fração mássica (20 % e 40 % de resíduo) para o ensaio de flamabilidade;
- Avaliar as propriedades físicas (massa específica, porosidade aparente e absorção de água), mecânicas (resistência à flexão) e de resistência à chama dos compósitos;
- Realizar análises fractográficas dos compósitos após fratura proveniente do ensaio de resistência à flexão.

1.2 Composição do trabalho

A seção 1 apresenta uma introdução sobre o tema em conjunto com a justificativa para o uso do resíduo de lama vermelha e fibra de bambu como alternativa para a formulação de materiais compósitos. Nesta seção são apresentados objetivo geral e objetivos específicos.

A seção 2 apresenta a revisão da literatura que inclui as principais classificações e características dos materiais estudados, com ênfase em materiais compósitos, resíduo industrial de lama vermelha e fibra de bambu.

A seção 3 discorre sobre a metodologia aplicada à pesquisa, onde são descritos os materiais utilizados e os métodos experimentais com representações ilustrativas e esquemáticas.

A seção 4 descreve os resultados com enfoque na discussão dos dados, apresentados em forma de tabela e gráficos, a partir de caracterizações e ensaios.

A seção 5 apresenta as principais conclusões do trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros. Expõe-se no fim da seção as referências utilizadas na pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Materiais compósitos

De acordo Ventura (2009) os compósitos são provenientes das primeiras sociedades agrícolas e voltaram a surgir com o uso de estruturas compósitas para soluções de alguns problemas técnicos durante a segunda metade do século XX.

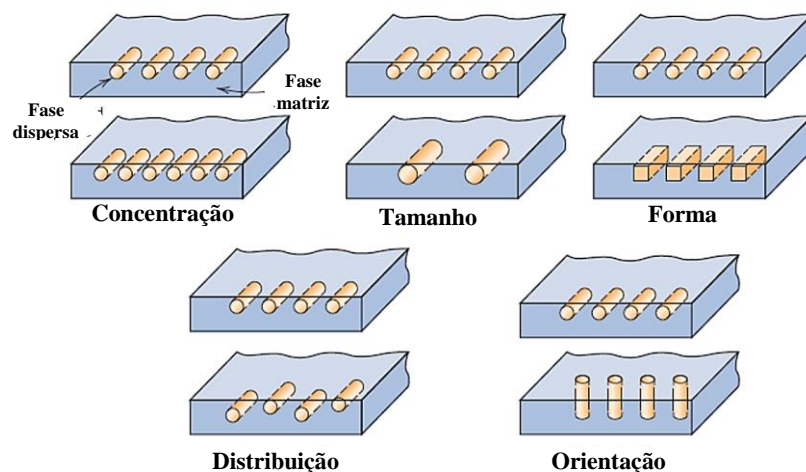
Com o passar do tempo houve um aumento na preocupação em relação as questões ambientais e redução de custos de fabricação, com isso abriu-se um espaço para o estudo da inserção de fibras atuando como reforços em materiais compósitos.

Callister Jr. (2016) descreve um compósito como qualquer material multifásico que apresenta uma proporção significativa das propriedades de ambas fases constituinte, dessa maneira é possível obter-se boas propriedades através da combinação de dois ou mais materiais diferentes.

Para Demar (2009), diversas aplicações tecnológicas exigem combinações de propriedades que não são adquiridas pelos materiais poliméricos, cerâmicos ou metálicos isoladamente. Desse modo é possível modificar um material que já existe através da incorporação de diferentes composições, não sendo necessário o desenvolvimento de um material inédito.

Os materiais compósitos apresentam duas fases, matriz e dispersa, e sua propriedade depende das suas fases constituintes, assim como sua quantidade relativa e geometria da fase dispersa conforme mostra a Figura 1 (CALLISTER Jr., 2016).

Figura 1 - Fatores que influenciam nas propriedades dos compósitos



Fonte: Callister Jr., (2016).

Os materiais compósitos apresentam muitas vantagens quando comparados com materiais a granel, entre elas a elevada resistência e rigidez em combinação com baixa densidade (CAMPBELL, 2010).

Segundo Santos (2017) as propriedades dos compósitos dependem da interface entre suas fases constituintes, desse modo deve-se ter uma boa interface para melhoria das combinações de propriedades envolvidas.

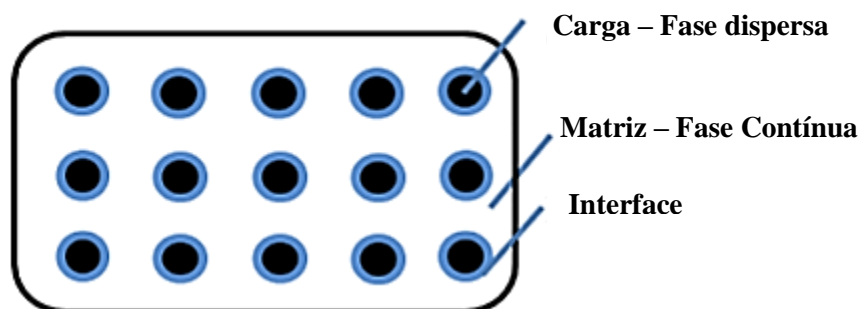
De acordo com Martins Neto (2010), a interação entre os componentes na região interfacial depende de fatores interdependentes como o grau de contato (molhabilidade) e forças coesivas (adesividade). Há uma dificuldade em combinar as distintas características químicas dos compósitos devido as diferentes naturezas das ligações químicas envolvidas e a diferença entre os coeficientes de expansão térmica.

2.1.1 Fase matriz

A matriz, segundo os estudos de Campbell (2010), pode ser denominada de fase contínua e, quando se têm um reforço fibroso, é responsável pela manutenção das fibras em relação a sua orientação e espaçamento. Askeland (2014) reforça que essa matriz pode atuar na transferência das tensões às fibras, o que pode evitar o aparecimento de trincas.

Além disso, um outro tipo de reforço, denominado carga, pode ser chamado de fase dispersa e também é responsável por suportar as forças aplicadas. A ligação entre a fase contínua (matriz) e fase dispersa tem o nome de interface e possui ligação direta com o desempenho mecânico no compósito (LOURENÇO, 2017). A Figura 2 exemplifica essas fases.

Figura 2 - Fases de um compósito



Fonte: Lourenço, 2017.

Um polímero, metal ou cerâmico, pode ser fase matriz de compósitos que possuem fibras em sua composição, sendo os metais e polímeros utilizados quando o objetivo é obter ductilidade e quando deseja-se obter melhora na tenacidade à fratura utiliza-se uma matriz cerâmica (CALLISTER Jr, 2016).

2.1.1.1 Matrizes poliméricas

A matriz polimérica é responsável por envolver o reforço, protegendo-o de ataques químicos e ambientais. Quando os compósitos são solicitados mecanicamente ocorre a transferência da carga para o reforço, desse modo a escolha da matriz é de fundamental importância e dependerá da aplicação que será submetida (SANTOS, 2017).

Segundo Yurdanova (2013), o termo "polímero" é frequentemente usado como um sinônimo para plástico, mas muitos outros tipos de moléculas biológicas e inorgânicas também são poliméricos.

Os polímeros podem ser classificados como:

- Os termoplásticos podem ser aquecidos e conformados várias vezes. Mallick (2007) descreve que as resinas termoplásticas possuem ligações secundárias, como as forças de Van der Waals e pontes de hidrogênio, mas com o emprego de calor e pressão as ligações intermoleculares das resinas termoplásticas podem ser quebradas e as moléculas se reorganizarem ocupando novas posições.
- Os polímeros termofixos são uma outra classificação dos polímeros. Para Yurdanova (2013) estes sofrem uma mudança química quando são aquecidos criando uma rede tridimensional.

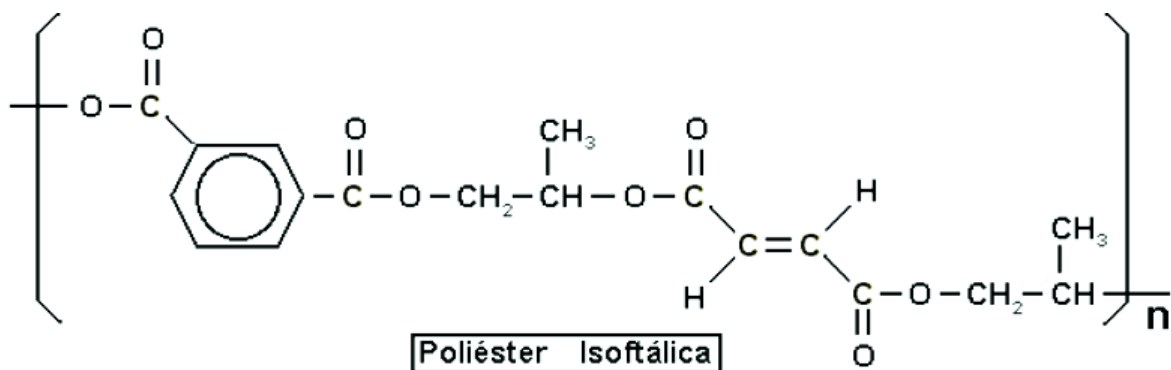
O poliéster insaturado é um dos polímeros mais utilizado em compósitos de matriz polimérica. Este é um termofixo com estrutura química diferente dos termoplásticos, já que além da típica ligação éster, ele possui também duplas ligações insaturadas capazes de reagir com monômeros vinílicos. As duplas ligações da resina e do monômero são quebradas pela ação de um catalisador e reagem novamente entre elas, o que origina um polímero com características termofixas (SAKAMOTO, 2018). De acordo com Costa (2012) é necessário a utilização do catalisador e um acelerador para que aconteça a reação química, pois a cura da resina ocorre em temperatura ambiente.

2.1.1.2 Resina poliéster isoftálica

Nas resinas isoftálicas o ácido isoftálico não forma anidrido cíclico, logo não sofre desvantagem de regeneração, podendo ser obtidos poliésteres de alto peso molecular, como mostra a Figura 3. As grandes cadeias, concedem ao produto final elevada resistência mecânica à medida que absorvem impactos de uma melhor forma, tornando-se polímeros de maior resistência química e térmica (SAKAMOTO, 2018).

Para Sanchez *et. al.* (2010) este polímero é muito utilizado justamente pelo seu baixo custo e as boas propriedades citadas anteriormente, entre elas pode-se contar também, com a facilidade de moldar-se em grandes dimensões e por ser estável termicamente e dimensionalmente.

Figura 3 - Cadeia poliéster isoftálica



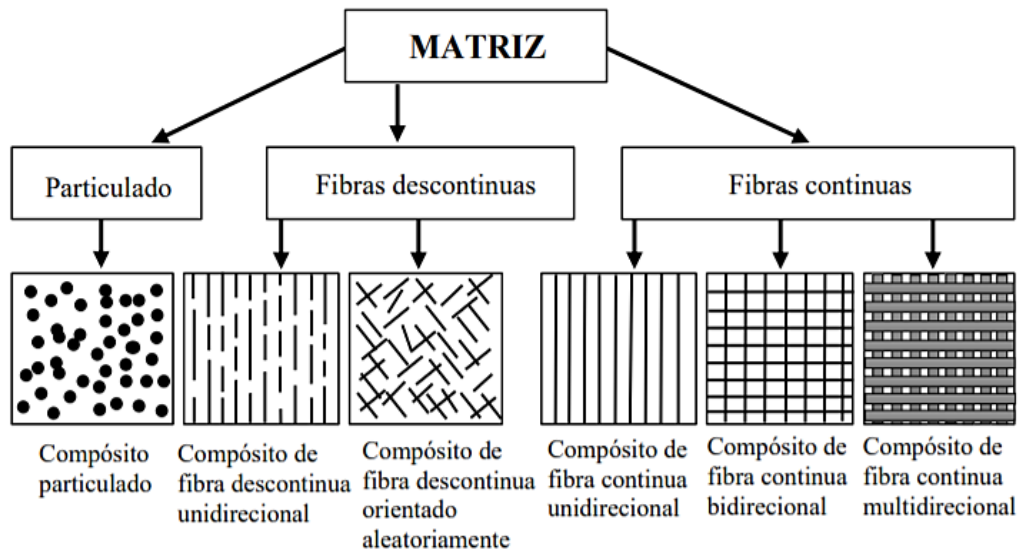
Fonte: Sakamoto, 2018.

2.1.2 Fase reforço

Um reforço é utilizado quando objetiva-se aumentar parâmetros como resistência ao calor, corrosão e condutividade (VENTURA, 2009). Segundo Campbell (2010), a quantidade e o tipo de reforço (fibra ou particulado) são responsáveis para a determinação de certas propriedades do material, proporcionando força e rigidez. Os compósitos que apresentam fibras descontínuas têm a resistência reduzida uma vez que o alinhamento das fibras costuma ocorrer de maneira aleatória. Esses compósitos tendem a ser mais baratos. Por outro lado, usa-se compósitos de fibras contínuas quando se deseja maior resistência e rigidez, no entanto seu custo tende a ser mais elevado.

O reforço pode ser dividido em três grupos: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas e compósitos de fibras contínuas. Essas fibras podem se classificar como alinhadas ou aleatórias, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Divisão dos reforços



Fonte: Panzera *et al*, 2005, adaptado.

2.1.2.1 Reforço/Cargas

A carga é encarregada por suportar as forças aplicadas ao compósito, sendo responsável pelo desempenho mecânico, para isso alguns fatores que antecipam sua escolha devem ser levados em consideração como baixa densidade, assegurar boa adesão com a matriz, facilidade em trabalhabilidade e baixo custo (LOURENÇO, 2017).

De modo geral, para Dalpiaz (2006) a resistência mecânica e até mesmo o módulo de elasticidade aumentam e a deformabilidade e a tenacidade diminuem com a redução do tamanho de partícula. Por isso, é indispensável o conhecimento em termos de distribuição granulométrica, uma vez que, partículas maiores tendem a aumentar a resistência a abrasão, porém possui efeitos contrários na deformabilidade.

As propriedades mecânicas dos compósitos dependem das características e interação dos elementos na estrutura e composição. Em falha de compósitos com partículas de enchimento o principal processo consumidor de energia é a deformação plástica da matriz, que é modificada pela presença da carga (PUKANSZKY *et al*, 1994). A interação polímero/matriz pode ser influenciado por diversos fatores, entre eles estão o tamanho da interface, força da

interação, anisotropia de enchimento, orientação e agregação das partículas (PUKANSZKY, 1990).

Lima (2007) concluiu que uma boa dispersão da carga mineral na matriz polimérica, quando bem homogeneizada, oferece maior área de superfície de interação carga mineral/polímero, melhorando características físicas e químicas do compósito quando comparado ao polímero puro.

2.1.2.2 Reforço/Fibras

É possível obter elevada resistência nos compósitos através da inserção de fibras. Para isso deve-se levar em consideração algumas características como o seu diâmetro, por exemplo. Pode-se dizer que quanto menor o diâmetro maior será a resistência e flexibilidade (CAMPBELL, 2010). Askeland (2014) justifica que os compósitos fibrosos exibem maiores limites de resistência à fadiga e módulo de Young. No entanto essas fibras podem ter seu desempenho prejudicado, logo parâmetros como comprimento, forma, orientação e composição das fibras devem ser avaliados (VENTURA, 2009).

Santos (2017) em relação a orientação das fibras, afirma que quando as fibras estão orientadas em direção ao sentido da carga aplicada (unidirecional), o compósito apresenta elevada resistência mecânica, todavia resulta em compósitos anisotrópico. Entretanto, quando as fibras estão dispersas de maneira aleatória resulta em um compósito isotrópico, e nesse caso as propriedades são iguais em todas as direções, porém nota-se que os compósitos têm sua resistência mecânica diminuída quando comparados aos compósitos com fibras alinhadas.

Um outro parâmetro a ser levado em consideração é a absorção de umidade. Em compósitos fibrosos quando há uma boa adesão fibra/matriz é possível diminuir a razão e quantidade de água absorvida (NÓBREGA, 2007).

Tendo em vista minimizar problemas ambientais, pesquisas sobre a produção de compósitos utilizando fibras naturais como reforços estão sendo desenvolvidas. Estas fibras segundo Ishizaki (2006) possuem baixos custos em comparação às fibras sintéticas, além disso, são excelentes fontes renováveis.

Mishra *et al.* (2003) reforça que além das vantagens apresentada por Ishizaki (2006), estas fibras também possuem baixa densidade, facilidade de separação, recuperação de energia e biodegradabilidade.

2.1.2.3 Híbridos

Entende-se por compósitos híbridos aqueles que utilizam mais de um tipo de reforço numa única matriz. Quirino (2010) exemplifica o híbrido vidro-carbono. Nesse compósito tem-se a união das melhores características de cada componente, as fibras de vidro são mais baratas, porém não possuem boa rigidez, por outro lado as fibras de carbono são caras, porém fortes e rígidas, além de fornecerem reforço de baixa densidade. Nota-se que esses dois materiais atuam superando um a carência do outro, seja em propriedade ou valor econômico. Uma boa vantagem dos compósitos híbridos é que quando submetidos à tensão de tração ocorre uma transferência da carga para o reforço, minimizando as repentinas falhas.

Entre as diversas aplicações dos materiais compósitos híbridos, destacam-se as realizadas na fabricação de componentes estruturais de baixo peso para transportes terrestres, aquáticos e aéreos, artigos esportivos e componentes ortopédicos (CALLISTER Jr., 2016).

2.1.3 Compósitos poliméricos

Para Callister Jr. (2016), os compósitos com matriz polimérica (*PMC – polymer-matrix composites*) possuem a resina polimérica como fase matriz e são usados em grande quantidade devido as propriedades apresentadas em temperatura ambiente e custo de fabricação. Esses materiais oferecem ótimas vantagens que de acordo com Hasnain *et al.* (2021) são: resistência à corrosão, flexibilidade de design, durabilidade, proporções leves e resistência.

Segundo Costa (2016), compósitos poliméricos possuem fase contínua polimérica e uma fase descontínua fibrosa atuando como reforço, essas fases se agregam físico-quimicamente através do processo de polimerização. A Tabela 1 apresenta algumas características dos compósitos poliméricos.

Tabela 1 - Característica dos compósitos poliméricos

Leveza	Devido ao peso específico das resinas e das fibras, os compósitos poliméricos apresentam um baixo peso específico.
Resistência Química	Materiais com excepcional inércia química, permitindo sua utilização em ambientes quimicamente agressivos.
Durabilidade	Material de alta durabilidade em consequência de sua composição e a ligação polimérica formada durante o processo de moldagem.
Resistência Mecânica	Apresenta boa resistência mecânica devido as suas características e a variedade de combinações que podem ser realizadas entre as resinas e o material de reforço.
Facilidade na Manutenção	Sujeitos a fáceis e simples técnicas de manutenção.
Flexibilidade Arquitetônica	Os compósitos têm grande vantagem sobre os materiais estruturais, devido a sua fácil modelagem às formas complexas.

Fonte: Martins Neto, adaptado, 2010.

2.1.3.1 Método de fabricação (*Hand Lay Up*)

Segundo os estudos de Santos (2017), para que o processamento do material tenha êxito deve-se levar em consideração os custos e a confiabilidade técnica de processamento empregada. Normalmente após o processamento os materiais compósitos não necessitam de tanto acabamento, sendo a usinagem pós-processo mínima, o que difere dos materiais metálicos que necessitam de uma adequação de geometria.

Hasnain *et al.* (2021) ressalta que nos dias atuais é possível desenvolver materiais compósitos com aplicação em turbinas para aeronaves e até mesmo produtos destinados às áreas biomédicas, focando em novas técnicas de fabricação como: laminação manual (*Hand Lay Up*); laminação à pistola (*Spray Up*); moldagem por injeção; moldagem por compressão; enrolamento (*Fillament Winding*) e Pultrusão.

Para se obter produtos moldados com resinas e reforços, pode-se utilizar uma técnica antiga denominada laminação manual, também chamada de laminação manual por moldagem aberta ou de contato. Esse processo é indicado para produzir peças independente dos parâmetros

de dimensão e espessura, limitando-se apenas a quantidade de peças da produção e ao número de moldes. O processo *hand lay-up* pode ser utilizado na produção de protótipos, gabaritos de controle, modelos, molde e peça com baixa demanda, sendo bastante requisitado para reparos e revestimentos (IPR, *s.d.*). A laminação manual é realizada em moldes com geometria variada e de diferentes materiais entre eles o silicone que proporciona facilidade na desmoldagem dos corpos de prova.

Para o endurecimento da resina utilizam-se os catalisadores, que também podem ser chamados de iniciadores, estes são responsáveis em promover a cura ou polimerização. Em contato com a resina o iniciador se decompõe pela ação de agentes como sais de cobalto ou amina, que geram radicais livres, e através disso o processo de polimerização se inicia, ocorrendo uma reação exotérmica, proporcionando o endurecimento do polímero sem a necessidade de uma fonte externa de calor. Os peróxidos orgânicos que mais são utilizados denominam-se MEK – Peróxido de Metil Etil Cetona (líquido) e o BPO – Peróxido de Benzoila (sólido ou pasta). Podem ser utilizados nos mais variados tipos de processos de produção à quente e frio, como Laminação Manual, Spray-up, Enrolamento Filamentar e Pultrusão (DIPROFIBER, 2020).

Se houver a necessidade de acelerar a cura da resina, pode-se adicionar aceleradores como o Dimetil Anilina (usado com o BPO) e o cobalto, usados em conjunto com o catalisador Mek V-50 (peróxido de metil-etil-cetona). A porcentagem do acelerador de cobalto varia de 0,3 % a 0,6 % em relação à quantidade usada de resina. Já no Dimetil Anilina (DMA) essa porcentagem varia de 0,3 % a 0,6 % em relação à quantidade de resina utilizada (SULFIBRA *s.d.*).

2.2 Resíduo do processo Bayer – Lama vermelha

A lama vermelha é um resíduo obtido através das indústrias de beneficiamento do alumínio, proveniente do processo Bayer, onde a bauxita é refinada passando por um processo químico e eletrolítico para produção de alumina (SILVA *et al.*, 2007).

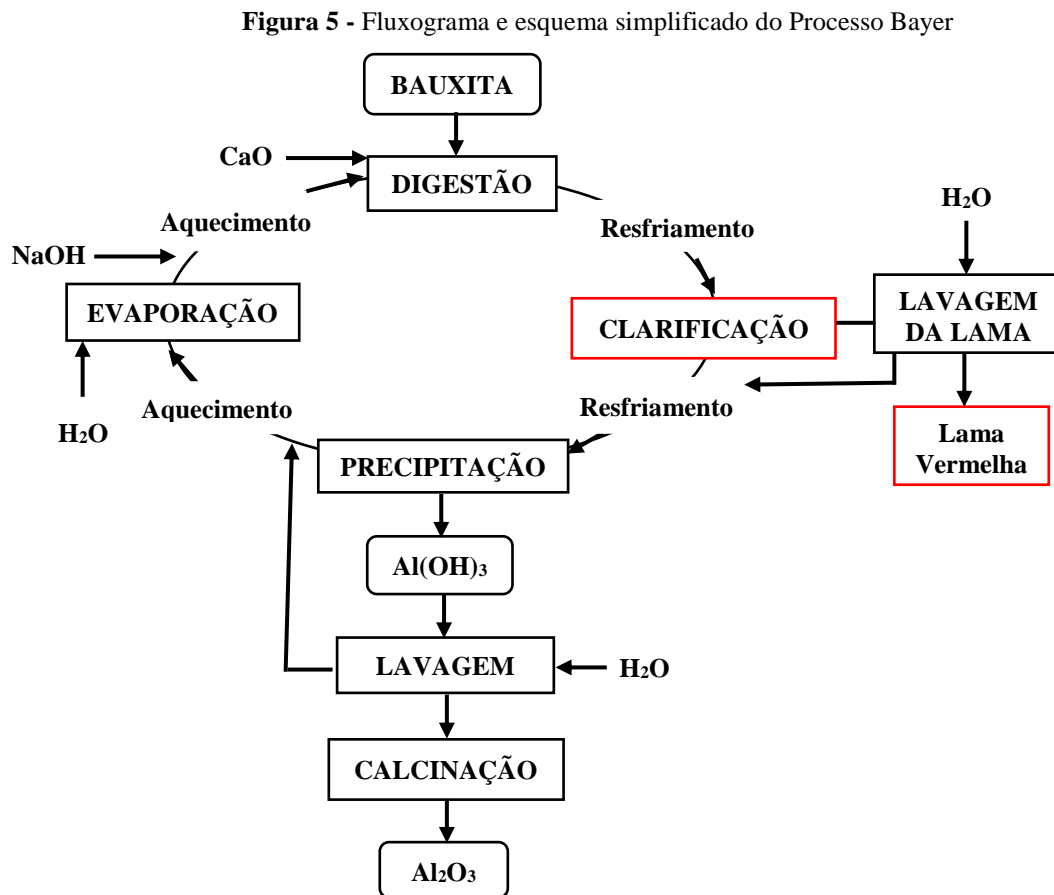
De acordo com a USGS (2020) a produção brasileira no ano de 2019 ocupou o quarto lugar com cerca de 29 milhões de toneladas anuais, atrás da Austrália com cerca de 100 milhões, Guiné com 82 milhões e China com 75 milhões de toneladas.

As fábricas de alumina depositam a lama vermelha (LV) em lagoas artificiais ou aterros. O resíduo passa por uma lavagem e filtragem afim de eliminar a água de processo e a soda

cáustica, se transformando em uma pasta grossa para então ser transportada até o local de descarte que é coberto por membranas para evitar a infiltração para o solo (HYDRO, 2016).

2.2.1 O processo Bayer

A produção de alumina através do processo Bayer pode ser esquematicamente apresentada de acordo com o fluxograma simplificado na Figura 5. De maneira geral mistura-se o concentrado de bauxita moída a uma solução de soda cáustica (NaOH) sob condições moderadas de pressão em reatores, com isso a bauxita se dissolve formando solução de aluminato de sódio (NaAlO_2) e as impurezas (lama vermelha) permanecem na fase sólida (SAMPAIO, ANDRADE e DUTRA, 2005).



Fonte: Buchner, W. *et al.*, 1989, adaptado.

O resíduo sólido insolúvel denominado lama vermelha ocorre durante o processo de clarificação. Essa é uma das etapas mais importantes do processo de obtenção de alumina, pois nela ocorre a clarificação do licor rico que é uma solução contendo elevada concentração de

hidrato de alumínio dissolvido, proveniente da lixiviação alcalina da bauxita no processo Bayer (LEANDRO, 2015).

2.2.2 Características da lama vermelha

Segundo Lima (2006), a lama vermelha é um resíduo marrom avermelhado, fino, com boas características físicas além de apresentar boa distribuição no tamanho das partículas.

Cunha (2015) ao comparar as composições químicas de diversos resíduos do processo Bayer, concluiu que dependem dos componentes da matéria prima e da condução do processo na refinaria. De acordo com a Tabela 2 é notório que o menor teor de Al_2O_3 é encontrado na lama vermelha chinesa, entretanto possui elevados teores de SiO_2 e de CaO . O autor justifica que há a possibilidade de que durante o processo consideráveis quantidades de $Ca(OH)_2$ foram utilizadas.

Tabela 2 - Composição química da lama vermelha em diferentes países

Composto	Austrália	China	Brasil
Fe_2O_3	34,05	9,46	46,60
Al_2O_3	25,45	7,17	14,36
SiO_2	17,06	17,75	16,57
Na_2O	2,74	3,23	2,43
TiO_2	4,90	2,41	4,34
MgO	1,86	1,51	0,08
CaO	3,69	38,69	2,62
K_2O	-	0,50	-
PI	-	16,38	-

PI - Perdas por ignição -

Fonte: Silva *et al.*, 2007, adaptado.

2.2.2.1 Problemas com a disposição da lama vermelha

A geração de resíduos industriais é um dos grandes problemas da sociedade, devido este ser uma das principais formas de degradação do meio ambiente. De acordo com Silva *et al.* (2007) a má disposição da lama vermelha pode ocasionar problemas tais como contaminação das águas superficiais e subterrâneas, poluição visual, poluição do ar por poeira e vários danos à fauna e flora.

Há uma necessidade em conceder uma destinação nobre para esse resíduo, levando em consideração os fatores ambientais e os custos econômicos, já que segundo Wang *et al.*, (2008), a disposição dessa LV precisa ser realizada em locais adequados, normalmente grandes lagoas de sedimentação, como mostra a Figura 6, construídas com técnicas de elevado custo para impossibilitar a ocorrência de lixiviação de componentes.

Figura 6 - Área de disposição de lama vermelha, Aughinish, Irlanda



Fonte: Wao, 2015.

Casos de acidentes ambientais causados pela má disposição do rejeito de lama vermelha são encontrados em vários países, como é o caso da cidade de Ajka localizada na Hungria, o acidente ocorreu no dia 04 de outubro de 2010, e foi considerado a pior catástrofe industrial da história da cidade. A Figura 7 mostra a área do reservatório de resíduos de alumínio que cedeu e liberou um grande fluxo de lama vermelha.

Figura 7 - Área do reservatório de resíduos de alumínio - Hungria



Fonte: Veja, 2011.

2.2.3 Compósitos reforçados com lama vermelha

Queiroz (2019), ao realizar os ensaios de flexão para os compósitos de lama vermelha utilizando 5 % de fibras metálicas encontrou excelentes resultados utilizando frações de 5 % e 20 % do resíduo, alcançando valores de 69,64 MPa e 70,61 MPa respectivamente. Notou-se que a fibra metálica atuou como reforço efetivo para o aumento da resistência à flexão. Nos ensaios de tração o autor encontrou o melhor resultado na composição híbrida de 20 % de lama vermelha e 5 % de fibra metálica com o valor de 23,98 MPa. Durante o ensaio percebeu-se que o aumento do resíduo proporcionou um aumento na resistência à tração.

Oliveira *et al.* (2020) fabricou compósitos poliméricos tendo como carga a lama vermelha, realizando ensaio de flamabilidade o autor utilizou variações de frações mássicas de 10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 %, notou-se um maior destaque na redução dos valores de velocidade da chama para a fração de 40 % que alcançou o valor de 10,73 mm/min.

Moraes *et al.* (2019) ao realizar os ensaios de flamabilidade em compósitos poliméricos com o resíduo de lama vermelha nas proporções em massa de 5 %, 15 %, 25 % e 35 %, notou que após inserção do resíduo houve uma melhora no desempenho do teste de resistência à chama, aumentando o tempo de queima à medida que aumentou o percentual de resíduo no compósito. Nos ensaios de resistência à flexão, utilizando as mesmas frações mássicas do ensaio de flamabilidade, notou que a composição com o melhor desempenho foi a de 25 % com cerca de 49,32 MPa.

Segundo os estudos de Zhang *et al.* (2011) compósitos poliméricos reforçados com lama vermelha utilizando frações de 0 % a 15 % obtiveram um aumento na resistência à tração, porém quando a concentração do resíduo foi de 20 % a resistência à tração diminuiu, isso é justificado pelo maior número de agregado do particulado em percentual maior de 15 %, aumentando ainda mais o conteúdo lama vermelha para 30 % em peso, resultou em aglomeração excessiva e pobre dispersão contribuindo ainda mais para redução da resistência à tração.

Costa (2016) ao fabricar compósitos poliméricos com resíduo de caulim para o ensaio de flexão nas frações mássicas de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % obteve bons resultados para a fração de 10 % chegando ao valor de 75,09 MPa, no entanto este valor ainda está bem abaixo à matriz plena com 98,54 MPa. Por outro lado, ao fabricar compósitos com 10 % de resíduo de lama vermelha o autor teve um aumento na resistência à flexão chegando ao valor de 94,92 MPa.

2.3 Fibras de bambu (*Bambusa vulgaris*)

Há uma crescente preocupação com o uso dos recursos naturais do planeta, apesar da evolução tecnológica grande parte dos produtos, principalmente os vegetais, estão tendo pouco aproveitamento de sua massa, ocasionando o acúmulo de resíduos industriais podendo gerar impactos ambientais e econômicos. O bambu tem chamado bastante atenção no quesito sustentabilidade por ser altamente renovável e apresentar excelentes características físicas, químicas e mecânicas, além disso pode ser considerado um bom isolante térmico e acústico (RIBAS, 2016). A Figura 8 mostra o bambu em uma aplicação da construção civil.

Figura 8 - Casa de bambu



Fonte: Fernandadg, 2019.

A relação entre a eficácia do bambu aos esforços mecânicos pode variar independente de ser da mesma espécie, sendo influenciado pela umidade, clima, idade e densidade. Estudos visando a utilização do bambu como reforço de uma matriz apresentam bons resultados, porém trata-se de um material natural, logo a heterogeneidade presente nas características físicas e morfológicas e até mesmo o alto grau de higroscopicidade, podem atuar de maneira contrária apresentando incompatibilidade entre componente matriz/fibra (AUERSVALDT. *et al.* 2019).

2.3.1 Características gerais

O bambu possui características autossustentáveis por ter a capacidade de regeneração pós corte, além disso é uma matéria prima de baixo custo, com uma grande diversidade de aplicações (RIBAS, 2016). De acordo com Oliveira (2013) ele apresenta uma série de vantagens como alta resistência a tração, boa resistência a compressão e flexibilidade, no entanto também

apresenta desvantagens, principalmente em inflamabilidade já que ele pode ser consumido pelo fogo com muita rapidez.

Delgado (2011) concluiu que o bambu possui boas propriedades físicas e químicas, rápido crescimento, fácil cultivo e manejo, podendo ainda ser utilizado como substituinte da madeira e do aço em construção civil. Além disso, o bambu também atua como sequestrador de carbono tornando-o um material eco-eficiente.

De acordo com Berndsen *et al.* (2010) os valores de densidade para as diversas espécies de bambu podem variar entre 0,5 e 0,90 g/cm³, inclusive dentro da mesma espécie. A Tabela 3 mostra a massa específica dos colmos de bambu brasileiro.

Tabela 3 - Massa específica dos colmos de bambu brasileiro

ρ (g/cm ³)			ρ (g/cm ³)
Base	Meio	Topo	
0,72	0,75	0,76	0,74

Fonte: Mota, *et al.*, 2017.

2.3.2 Compósitos reforçados com fibras de bambu

Teles *et al.* (2012), fabricou compósitos poliméricos com fibra de bambu, variando seu comprimento em 5 mm, 10 mm e 15 mm, no molde de silicone e realizou o ensaio de resistência à flexão, o compósito que apresentou o melhor resultado foi o que possuía fibras de 5 mm de comprimento com o valor de 0,399 MPa.

Barbosa (2018) fabricou compósitos híbridos com resíduo industrial de caulim flint variando seu percentual (frações de 10 %, 20 % e 30 %) e fibras de bambu com fração mássica de 3 % variando seu tamanho (15 mm e 30 mm), o melhor resultado obtido nas análises mecânicas foi de 20 % de caulim, com 3 % de fibras de bambu no tamanho de 30 mm, com o valor de 33,75 MPa.

Mendes (2019) concluiu, através da fabricação de compósitos com percentuais de fibras de bambu sem tratamento que variaram entre 1 %, 3 % e 5 % no tamanho de 30 mm, que a fração mássica de 5 % apresentou excelentes resultados no desempenho mecânico, com ganhos em resistência superiores à 70 %, chegando ao valor de 28,98 MPa. Além disso na fabricação dos compósitos híbridos utilizando 20 % de caulim ferruginoso com as mesmas frações usadas na fabricação dos compósitos fibrosos. Mendes também obteve bons resultados utilizando 5 %

de fibra de bambu, chegando ao valor de 25,11 MPa, valores estes superiores ao da matriz plena (poliéster insaturado) com 16,59 MPa.

Costa (2016) fabricou compósitos de matriz polimérica com fibras naturais utilizando a fração de 5 % para as fibras de sisal, malva e juta. Ao comparar com o valor da matriz plena de 98,54 MPa, notou que todos os compósitos com fibras naturais obtiveram um aumento significativo na resistência à flexão, chegando a 163,87 MPa para compósitos utilizando fibras de sisal.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

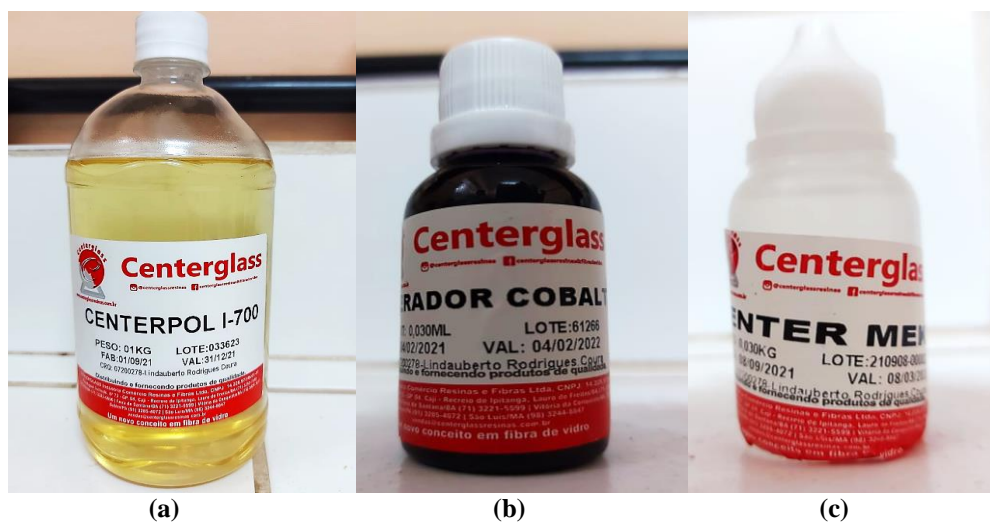
3.1 Materiais

Os compósitos foram produzidos na Usina de Materiais, no Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

3.1.1 Resina e sistema catalítico

A matriz utilizada no desenvolvimento deste trabalho é composta por um polímero termofixo (resina poliéster isoftálica insaturada). Para o sistema catalítico utilizou-se o acelerador de cobalto (CAT MET) na proporção 1,5 % (v/v) e como iniciador de cura o BUTANOX M-50 (MEK-P) utilizado na proporção 1 % (v/v). A Figura 9 apresenta os materiais sendo eles: resina (a); acelerador (b) e iniciador (c).

Figura 9 - Resina (a); acelerador (b) e iniciador (c)



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

3.1.2 Fibra de bambu

O bambu da espécie *Bambusa vulgaris* foi cedido pela Universidade Federal do Pará. A fibra foi extraída manualmente e utilizada *in natura*.

3.1.3 Resíduo de lama vermelha

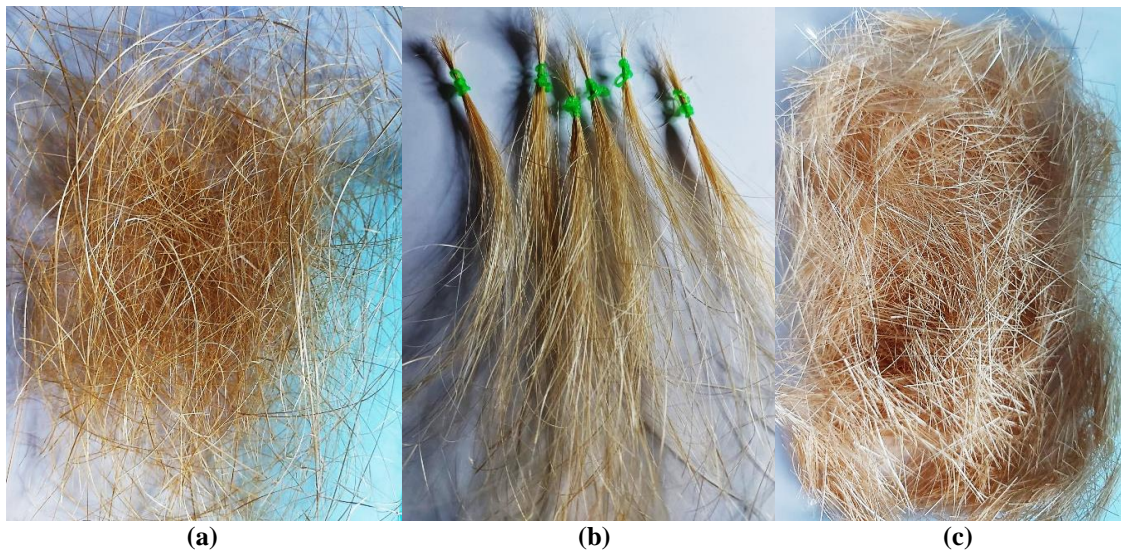
A lama vermelha foi obtida através das indústrias locais do estado do Pará (Hydro Alunorte) e passou por um processo de beneficiamento. Para os testes de flamabilidade determinou-se a massa do resíduo utilizado para a fabricação nas frações de 20 % e 40 %.

3.2 Métodos

3.2.1 Fibra de bambu

Inicialmente os colmos do bambu foram cortados e armazenados em recipientes com água para retardar a degradação, em seguida as fibras foram extraídas manualmente para o corte que seguiu o tamanho de 30 mm. Durante a extração notou-se maior concentração de fibras nas cascas do bambu. A Figura 10 apresenta as fibras de bambu recém extraídas (a), separadas em pequenos feixes para facilitar a etapa de corte (b) e após a etapa de corte (c).

Figura 10 - Fibras de bambu antes do corte (a); separadas em feixes (b) e pós corte (c)

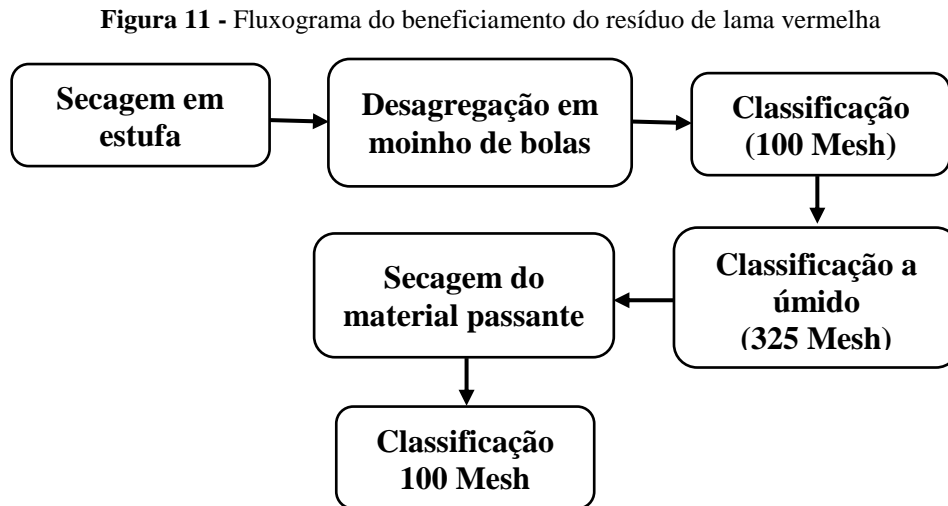


Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

3.2.2 Resíduo de lama vermelha (Beneficiamento)

A lama vermelha (LV) bruta foi seca na estufa com temperatura de 100 °C durante 24 horas, em seguida foi desagregada em um moinho de bolas por aproximadamente 30 minutos, para então realizar a classificação em peneira de 100 Mesh da série Tyler (tamanho da abertura

0,147 mm) e o peneiramento a úmido em peneira de 325 Mesh (0,044 mm). Por fim, secou-se o material passante para ser realizado novamente a sua desagregação e classificação em peneira de 100 Mesh (0,147 mm). A Figura 11 apresenta um fluxograma com as principais etapas desse processo.



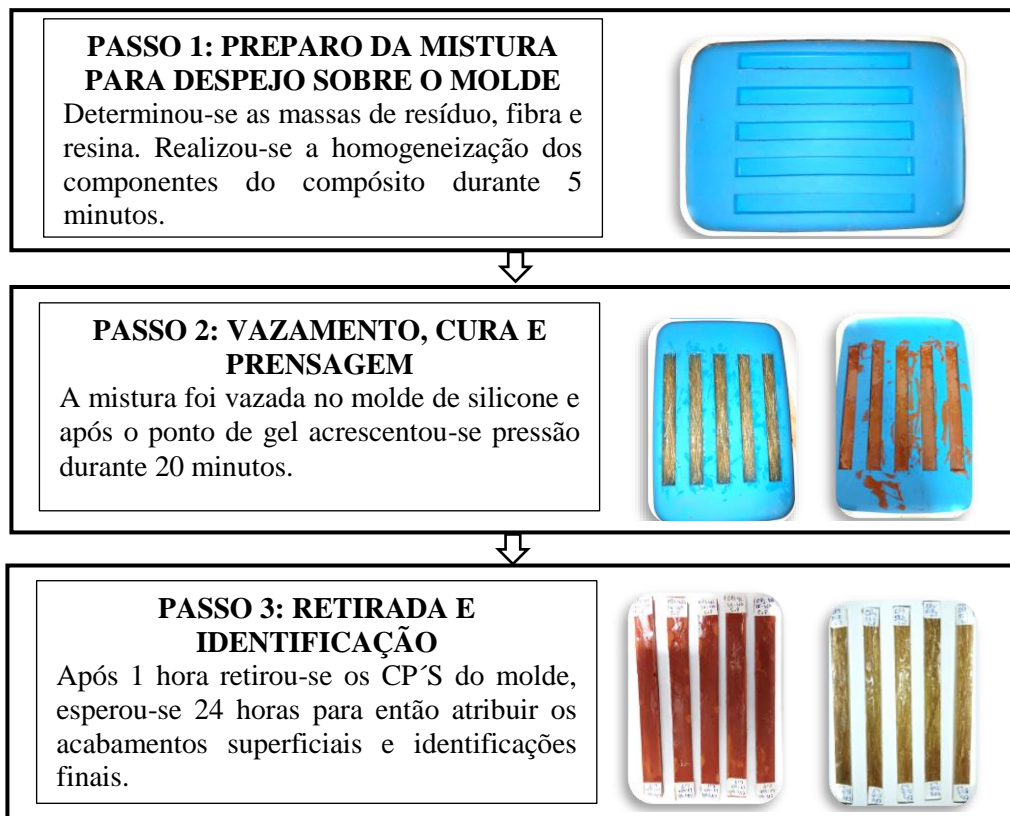
Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

3.2.3 Fabricação de compósitos

A fabricação dos compósitos seguiu três grandes passos: o primeiro consistiu no preparo da mistura para vazamento sobre o molde de silicone, nessa etapa as massas de resíduo, fibra e resina foram determinadas. Utilizando uma estufa a 105 °C realizou-se a retirada de umidade do resíduo e da fibra durante 20 minutos e então efetivou-se a homogeneização dos componentes do compósito durante 5 minutos; o segundo passo consistiu no vazamento da mistura, o aguardo da cura e posteriormente a prensagem do compósito, nesta etapa a mistura homogeneizada é vazada no molde, esperou-se o ponto de gel para então acrescentar a pressão de aproximadamente 30 N durante 20 minutos e no terceiro passo aguardou-se 1 hora para retirada dos corpos de prova (CP'S) do molde para armazenamento em local plano por 24 horas para polimerização completa, após isso aos CP'S foram atribuídos acabamentos superficiais, através de lixas com granulometria de 320 Mesh, e identificações finais.

A Figura 12 apresenta um fluxograma simplificado com as principais etapas de fabricação dos compósitos em molde de silicone.

Figura 12 - Fluxograma simplificado da fabricação dos compósitos em molde de silicone



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

3.2.3.1 Fabricação dos compósitos fibrosos

Os compósitos com fibras de bambu, seguiram as seguintes etapas de fabricação: primeiramente estipulou-se a fração mássica de 5 % e tamanho de 30 mm utilizando como base as pesquisas de Mendes (2019) e Barbosa (2018), em seguida pesou-se resina, cobalto, butanox e as fibras que foram levadas à estufa por aproximadamente 105 °C no tempo de 20 minutos para retirada de umidade, as fibras foram dispostas no molde de silicone de maneira alinhada e foi realizado a mistura da resina e catalisadores durante 5 minutos para vazar sobre as mesmas, aguardou-se o ponto de gel e acrescentou-se a pressão de aproximadamente 30 N durante 20 minutos. Esperou-se cerca de 1 hora para retirada dos corpos de prova que foram armazenados em uma superfície plana durante 24 horas.

A Figura 13 (a) apresenta o molde de silicone com a mistura e a Figura 12 (b) os corpos de prova retirados do molde.

Figura 13 - Molde de silicone com a mistura (a) e corpos de prova com fibras de bambu (b)



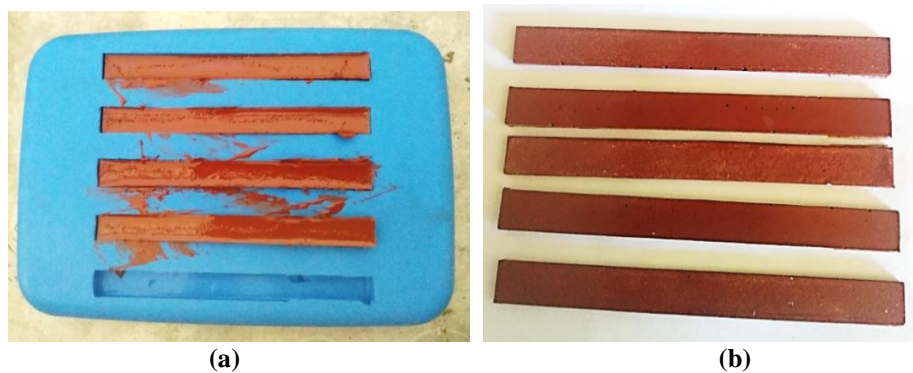
Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

3.2.3.2 Fabricação dos compósitos com resíduo de LV

Para a fabricação dos compósitos com resíduo de lama vermelha as proporções de resina, cobalto e butanox foram medidas e o resíduo foi pesado e levado à estufa por aproximadamente 105 °C durante 20 minutos. A mistura manual de resina, cobalto, resíduo e iniciador durou cerca de 5 minutos. Após essa etapa a mistura foi vazada no molde de silicone, aguardou-se o ponto de gel para então acrescentar a pressão de aproximadamente 30 N durante 20 minutos, após 1 hora os corpos de prova foram retirados e armazenados em um recipiente plano por 24 horas no intuito de evitar possíveis deformações.

Todos os corpos de prova foram lixados superficialmente para os devidos acabamentos e identificados. A Figura 14 (a) apresenta o molde de silicone e a Figura 14 (b) os corpos de prova produzidos.

Figura 14 - Mistura de LV depositada no molde de silicone (a) e Corpos de prova com o resíduo de LV (b)



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

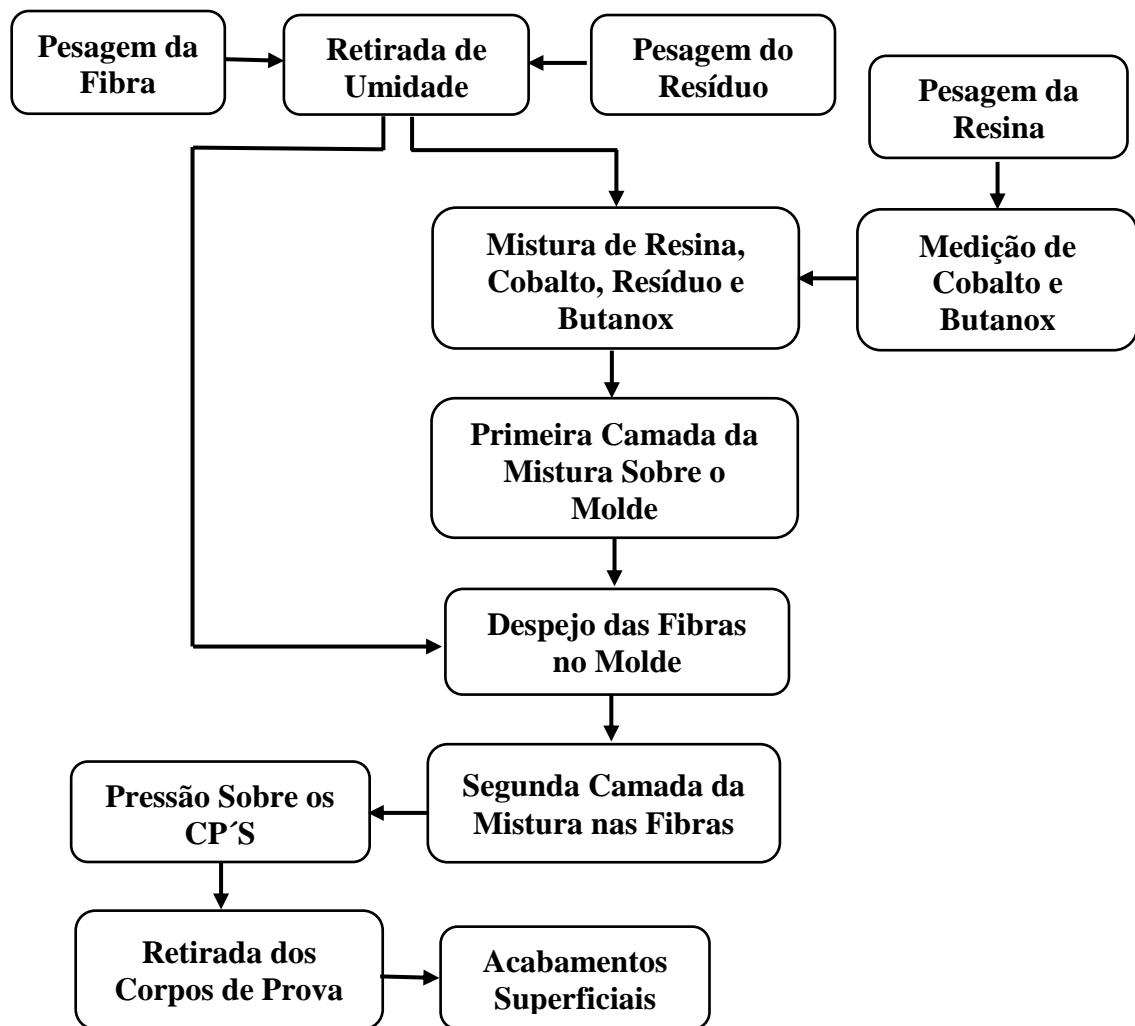
Para os testes de flamabilidade determinou-se a massa do resíduo a ser utilizada para a fabricação nas frações de 20 % e 40 %. No entanto, levando em consideração os resultados

obtidos no ensaio de flamabilidade, optou-se por utilizar a fração mássica de 40 % nos compósitos híbridos.

3.2.3.3 Fabricação dos compósitos híbridos

A fabricação dos compósitos híbridos é apresentada na Figura 15 através de um fluxograma com as principais etapas do processo de trabalho.

Figura 15 - Fluxograma com as etapas de fabricação dos compósitos híbridos



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

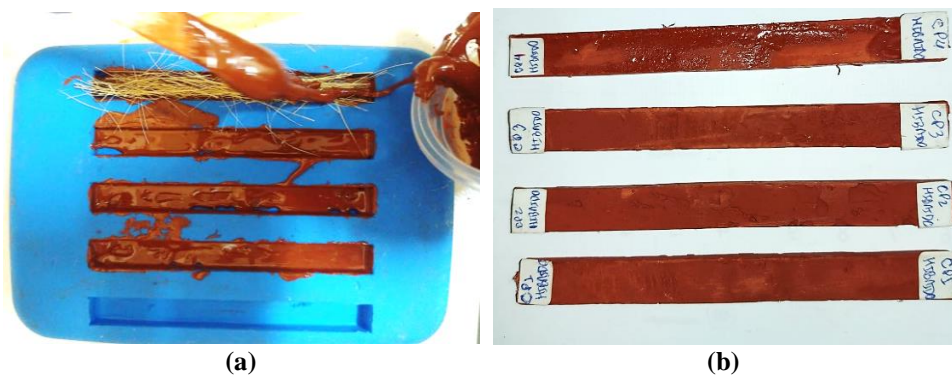
A fabricação seguiu as mesmas etapas dos compósitos com fibras e com resíduo isoladamente, utilizou-se a pressão de aproximadamente 30 N sobre os corpos de prova a fim de melhorar a molhabilidade entre resíduo/fibra. Efetivou-se a pesagem da fibra e resíduo e

retirou-se a umidade presente através de uma estufa, com aproximadamente 105 °C durante 20 minutos.

Para a mistura com o resíduo de LV, resina e catalisadores foram pesados. No entanto o vazamento foi realizado em camadas: adicionou-se a primeira camada da mistura no molde, logo após as fibras foram despejadas e uma segunda camada da mistura foi inserida. Aguardou-se o ponto de gel e adicionou-se uma superfície plana com 3 kg para realizar pressão de 30 N sobre os corpos de prova.

Após 1 hora os CP'S foram retirados e colocados em um local plano durante 24 horas para polimerização completa e por fim realizou-se os acabamentos superficiais através de lixas com granulometria de 320 Mesh. A Figura 16 (a) apresenta a realização do vazamento em camadas e a Figura 16 (b) os CP'S finalizados.

Figura 16 - Vazamento sobre as fibras (a) e corpos de prova híbridos finalizados (b)



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

3.2.4 Caracterização morfológica (MEV/EDS)

Realizou-se a caracterização morfológica através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), no Laboratório de Física Experimental e Computacional (LFEC) do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Pará.

As amostras foram colocadas em um porta amostra com uma fita dupla de carbono, como trata-se de materiais orgânicos foi necessário realizar a metalização com Ouro (Au) e Paládio (Pd) visando aumentar a condutividade elétrica e evitar o carregamento das imagens que é produzido pela acumulação de elétrons na amostra (nuvem de elétrons).

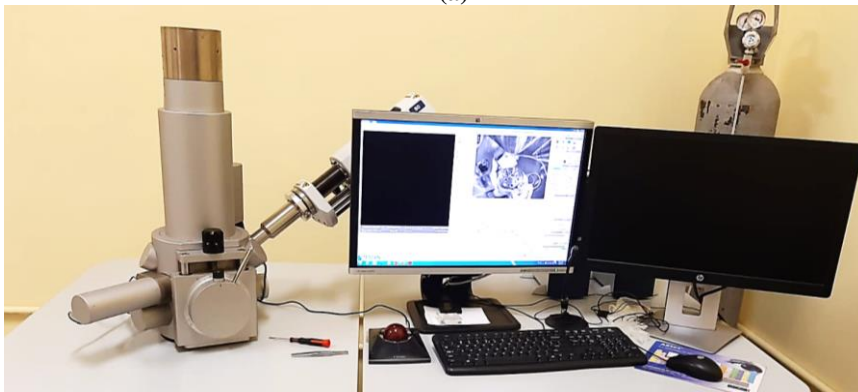
A metalização foi realizada com o auxílio da máquina de revestimento por pulverização catódica (metalizadora) da marca Quorum SC7620 Sputter Coater mostrado na Figura 17 (a) e teve a duração de 2 minutos, corrente elétrica de 5 mA e pressão de 1 mBar/Pa. Após a etapa

de metalização as amostras foram inseridas no equipamento MEV da marca TESCAN modelo VEGA3 com sistema de Energia Dispersiva (EDS) mostrado na Figura 17 (b). Para termos de análise qualitativa utilizou-se a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) para analisar os elementos presente na lama vermelha.

Figura 17 - Metalizadora (a) e Microscópio Eletrônico de Varredura (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

3.2.5 Ensaios físicos

Os ensaios físicos de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) foram realizados seguindo as normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D792, de acordo com as Equações (1), (2) e (3), onde M_u é a massa úmida, M_s massa seca e M_i massa imersa.

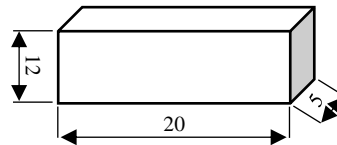
$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

$$PA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (2)$$

$$MEA (g/cm^3) = \frac{M_s}{M_s - M_i} \times \rho_{H_2O} \quad (3)$$

Os corpos de prova cortados conforme as dimensões da Figura 18 foram secos em uma estufa com temperatura de 105 °C por 24 horas para identificar a massa seca, após isso foram imersos em água destilada por 24 horas para definir a massa úmida. Afim de obter a massa imersa foi necessário utilizar um aparato instalado na balança analítica mostrado na Figura 19.

Figura 18 - Dimensões dos corpos de prova (em mm) utilizado na realização dos ensaios físicos



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

Figura 19 - Aparato para obtenção da massa imersa

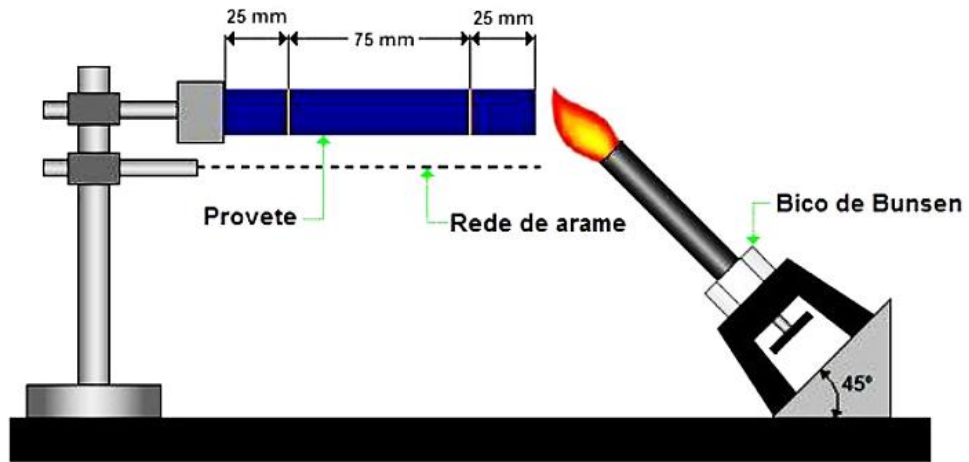


Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

3.2.6 Ensaio de Flamabilidade (horizontal)

Para os ensaios de flamabilidade utilizou-se como base as normas IEC 60695-11-10 e ASTM D 635, efetuando o ensaio na posição horizontal. Nesse método é usado um Bico de Bunsen a 45° para direcionar chama no corpo de prova durante 30 segundos. Os corpos de prova são marcados conforme a Figura 20.

Figura 20 - Ensaio de Flamabilidade segundo UL-94, método A



Fonte: Caetano, 2019.

No ensaio registrou-se o tempo necessário para a combustão atingir a marca de 25 mm e o tempo necessário para atingir a marca de 75 mm. Por fim, para os CP'S que não atingiram essa marca registrou-se seu tempo de queima e o comprimento danificado. A Tabela 4 apresenta a quantidade de corpos de prova fabricados para o ensaio.

Tabela 4 - Quantidade dos compósitos produzidos

Compósitos	Quantidade
Matriz Plena	5
20 % - LV	10
40 % - LV	10
5 % Fibra de bambu	5
Híbridos	5

Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

A taxa de propagação de chama foi calculada através da Equação (4), onde L é o comprimento útil do corpo de prova em milímetros (mm) e t é o tempo em segundos (s) que a chama leva para percorrer o comprimento útil.

$$Taxa = \frac{60 L}{t} \text{ (mm/min)} \quad (4)$$

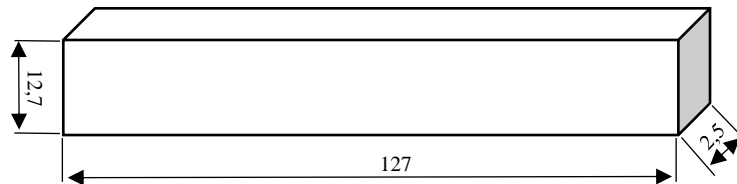
3.2.7 Ensaio mecânico

3.2.7.1 Ensaio de Resistência à Flexão

Para os ensaios de flexão foram fabricados 5 (cinco) corpos de prova de cada fração utilizada juntamente com a matriz plena, utilizou-se uma pressão de aproximadamente 30 N sobre os CP'S no intuito de melhorar a interação entre as fases constituintes e minimizar defeitos.

Utilizou-se a norma ASTM D 790 que compreende a determinação das propriedades de flexão de plásticos não reforçados e reforçados, incluindo compósitos de alto módulo e materiais isolantes elétricos na forma de barras retangulares. Essa norma utiliza um sistema de carregamento de 3 (três) pontos aplicados a uma viga simplesmente suportada. As propriedades flexurais determinadas por esses métodos de teste são úteis para fins de controle de qualidade e especificação (ASTM D790, 2017). Os corpos de prova para o ensaio de flexão foram fabricados nas dimensões apresentadas na Figura 21.

Figura 21 - Dimensões dos corpos de prova (em mm) utilizado para realização dos ensaios de flexão



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

A Equação (5) apresenta o cálculo da Tensão de Resistência à Flexão (TRF) realizado em um ensaio de três pontos. Onde P: Carga em um determinado ponto na curva carga-deflexão (N); L: Distância entre os apoios (mm); B: Largura do corpo de prova (mm) e h: Altura do corpo de prova (mm).

$$TRF = \frac{3PL}{2Bh^2} \quad (5)$$

3.2.7.1.1 Análise Fractográfica

A análise fractográfica permite determinar a sequência dos eventos ocorridos durante o processo de fratura e identificar o estado de tensões atuantes no momento da falha, assim como

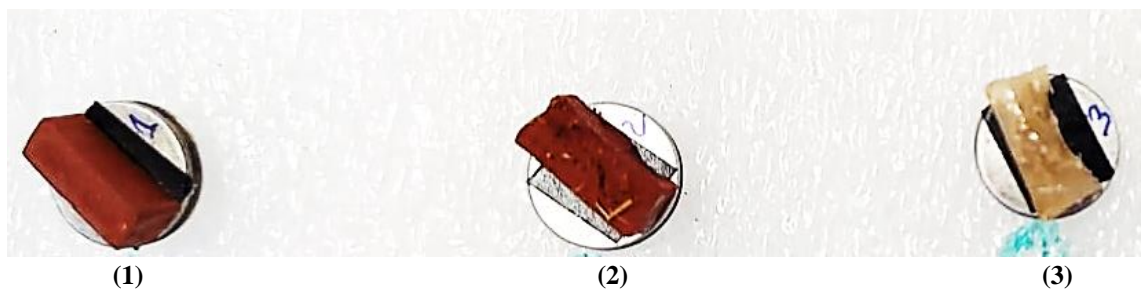
condições ambientais, defeitos do material e outras anomalias que podem contribuir para o início, crescimento e término da fratura. Uma sequência de operações básicas deve ser seguida, como: classificação do tipo de falha, mapeamento da trinca e análise química da superfície da fratura, respectivamente (REZENDE, 2007).

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um dos mais utilizados para a análise fractográfica, devido suas propriedades como resolução e profundidade de campo que ajudam a revelar as particularidades topográficas das superfícies de fratura. A fratura simples é a separação de um material em duas ou mais partes em retorno a imposição de uma tensão de natureza estática em temperaturas relativamente baixas. O tipo de fratura depende do mecanismo de propagação da trinca (CALLISTER Jr., 2016).

Realizou-se a análise fractográfica dos compósitos, que sofreram rompimento durante o ensaio de flexão, através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN modelo VEGA3, localizado no Laboratório de Física Experimental e Computacional (LFEC) do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Pará.

Os compósitos foram inseridos em um porta amostra, utilizou-se uma fita dupla face de carbono para fixá-los. Para efetivar as análises das micrografias utilizou-se uma tensão de aceleração de 5 kV. A Figura 22 apresenta os compósitos fraturados sendo eles: compósito de lama vermelha (1); compósito híbrido (2) e compósito com fibra de bambu (3).

Figura 22 - Compósitos para a análise fractográfica



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

3.3 Análise Estatística

Os resultados obtidos nos ensaios de flamabilidade, físicos e de flexão foram analisados estatisticamente pela análise de variância (ANOVA) de fator único por meio do software *Past 3.2* com 95 % de confiança, com base na análise para os resultados que tiveram o valor $p < 0,05$ a hipótese nula (H_0) foi rejeitada, sendo necessário complementar com a aplicação do teste de Tukey (TSD) para comparação entre as médias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

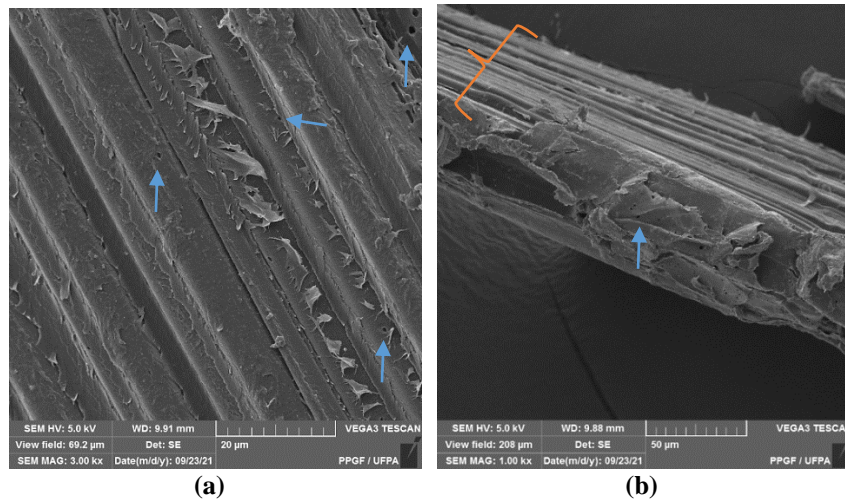
4.1 Caracterização morfológica

4.1.1 Caracterização morfológica das fibras de bambu (MEV)

Através da caracterização notou-se que as fibras de bambu apresentam muitas áreas rugosas com poucas áreas lisas além de alguns poros (seta azul). A rugosidade da fibra é fundamental pois auxilia na adesão interfacial com a matriz, é nessa região que ocorrerá a transferência da sollicitação mecânica da matriz para o reforço (LI, MAI e YE, 2000; MARTINS e JOEKES, 2002).

A fibra está recoberta por uma parede celular que se repete ao longo das fibrilas, assim como componentes não celulósicos: pectina, hemicelulose e lignina citados no trabalho de Sathishkumar *et al.* (2013). As micrografias podem ser visualizadas nas Figuras 23 (a) e 23 (b) com magnificações de 3000x (a) e 1000x (b).

Figura 23 - Micrografia da fibra de bambu com magnificações de 3000x (a) e 1000x (b)



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

Na micrografia constatou-se a presença de feixes de fibras (chave laranja) e não fibras soltas, de acordo com Tomazello Filho e Azzini (1987), essa é uma das principais características das fibras de bambu. Esse fato também pode ser associado ao método de extração manual e pela ausência de um tratamento químico que, segundo os estudos de Mendes (2019) e Gehlen (2014), atua na retirada da camada de lignina e hemicelulose contribuindo no desfibramento, tornando

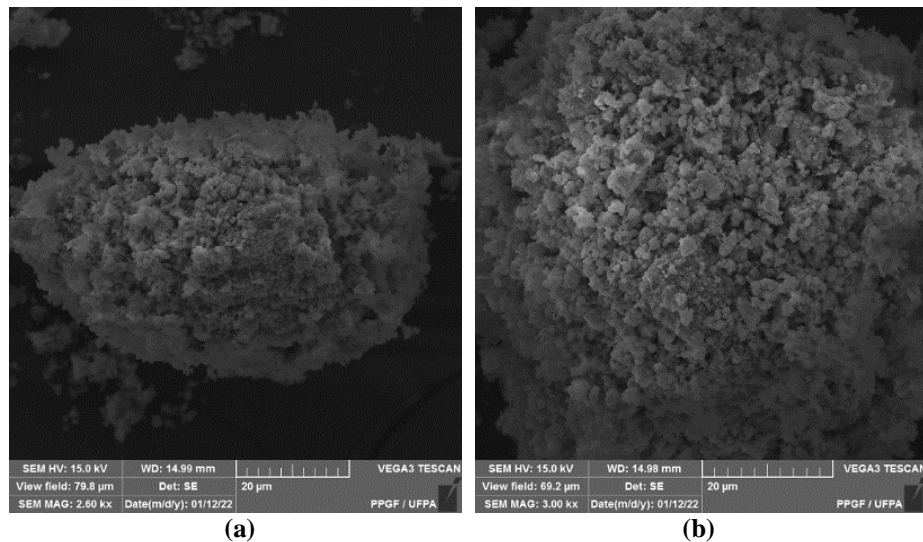
as fibras mais rugosas melhorando a adesão entre fibra/matriz e consequentemente impactando de forma positiva nas propriedades mecânicas dos compósitos.

4.1.2 Caracterização morfológica do resíduo de lama vermelha (MEV/EDS)

Através das micrografias constatou-se a presença de partículas de tamanhos e formas irregulares. De acordo com Çoban *et al.* (2016) partículas de tamanhos irregulares podem atribuir bons resultados aos compósitos pois proporcionam melhor sinergia.

A lama vermelha se apresenta praticamente na forma de aglomerados porosos onde identificou-se partículas menores aglomeradas em torno de partículas maiores. De acordo com Cunha (2015) a intensa aglomeração das partículas pode dificultar a adesão matriz/lama vermelha e também, segundo Mendes (2019), podem impactar no desempenho do material frente a solicitações mecânicas, já que a sua presença favorece a concentração de trincas, aumento da porosidade e a presença de vazios. As Figuras 24 (a) e 24 (b) mostram as micrografias da lama vermelha com magnificações de 2600x (a) e 3000x (b).

Figura 24 - Micrografia da lama vermelha com magnificações de 2600x (a) e 3000x (b)

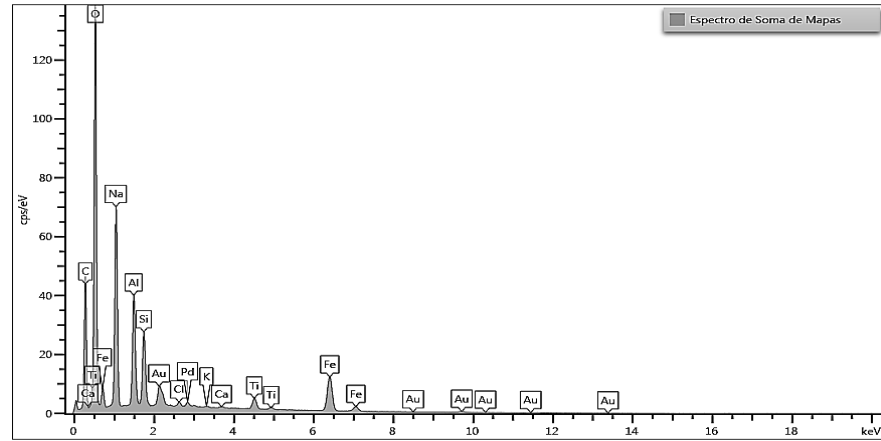


Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

Para analisar os elementos constituintes da lama vermelha, realizou-se a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), onde foram identificados um quantidade significativa dos seguintes elementos: Alumínio (Al), Ferro (Fe), Silício (Si), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Sódio (Na), Carbono (C), Ouro (Au) e Paládio (Pd), no entanto vale ressaltar que esses três últimos elementos (C, Au e Pd) foram identificados devido a preparação de amostra onde utiliza-se uma

fita dupla de carbono e metalização com ouro e paládio. A Figura 25 apresenta o gráfico com os elementos identificados.

Figura 25 - Espectroscopia por Energia Dispersiva do resíduo de lama vermelha



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

4.2 Ensaios físicos

A realização da caracterização física dos compósitos fabricados seguiu os padrões estabelecidos através das normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792. Segundo Costa (2016) essa caracterização disponibiliza informações fundamentais do material e pode ter influência em propriedades como estabilidade térmica e dimensional, peso específico, propriedades mecânicas e durabilidade. A Tabela 5 apresenta os resultados para Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) dos compósitos saturados com o resíduo de lama vermelha, fibras de bambu e híbridos (resíduo/fibra).

Tabela 5 - Resultados dos ensaios físicos para compósitos

Composição (%)	Absorção de Água (%)	Porosidade Aparente (%)	MEA (g/cm ³)
Matriz Plena	0,4856 (± 0,1956)	0,5789 (± 0,2329)	1,1927 (± 0,0105)
40 % - LV	0,5086 (± 0,1215)	0,8874 (± 0,2112)	1,7452 (± 0,0041)
5 % F.B	0,9035 (± 0,1381)	1,0684 (± 0,1618)	1,1828 (± 0,0020)
Híbrido	2,4601 (± 0,3171)	4,1888 (± 0,5473)	1,7025 (± 0,0108)

Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

Com base nos resultados apresentados é possível constatar um aumento da massa específica aparente quando o particulado é acrescentado, isso acontece devido a massa específica do resíduo (2,13 g/cm³) ser maior que a da matriz (1,15 g/cm³), estando de acordo

com a regra da mistura, onde segundo Callister Jr. (2016) cada fase que constitui o compósito contribui para as suas propriedades efetivas.

Por outro lado, a matriz plena apresentou percentual de absorção de água e porosidade aparente inferior ao do compósito com 40 % de lama vermelha. Moraes (2019) justifica esse fato pela elevada hidrofília do resíduo e o método de fabricação empregado. Notou-se também um aumento desses parâmetros nos compósitos com 5 % de fibra de bambu, de acordo com Costa (2016) isso pode ser explicado devido as fibras vegetais apresentarem um alto grau hidrofílico e a matriz plena apresentar caráter hidrofóbico. Nos compósitos híbridos esse percentual aumentou significativamente, isso porque como visto anteriormente tanto o resíduo quanto as fibras são hidrofílicos, além disso é provável que o método de fabricação manual tenha contribuído para o surgimento de defeitos como vazios e trincas no material.

Os resultados dos ensaios físicos foram analisados estatisticamente através da Análise de Variância (ANOVA) de fator único com confiança de 95 % e complementou-se com a análise de Tukey (TSD) no intuito de comparar os possíveis pares de médias.

De acordo com a análise de variância a inserção do resíduo de lama vermelha apresentou efeito significativo para a massa específica aparente, com probabilidade de significância de $1,383E-25$, rejeitando a hipótese nula. Com base na análise de Tukey de médias (par a par), onde é definido quais frações são diferentes entre si, notou-se que a matriz plena e a fração fibra 5 % foram iguais entre elas e diferente das demais, isso pode ser justificado pelo fato da massa específica da resina e da fibra de bambu serem próximas com cerca de $1,15 \text{ g/cm}^3$. O compósito com 40 % de resíduo apresentou a maior massa específica, isso ocorreu provavelmente porque a massa específica do resíduo é alta, segundo Cunha (2015) com cerca de $2,13 \text{ g/cm}^3$, gerando impacto significativo na densidade do corpo de prova final.

A análise de variância para a absorção de água e porosidade aparente teve probabilidade de significância de $6,99E-12$ e $3,819E-11$ respectivamente, rejeitando mais uma vez a hipótese nula. Através da análise de Tukey constatou-se que estatisticamente apenas o compósito híbrido se difere dos demais. Isso ocorre provavelmente pela quantidade de vazios existentes no material, concordando com Fang *et al.* (2013) onde segundo ele a absorção de água pode ocorrer conforme a presença de poros e por meio da interface entre fases que pode ser prejudicada devido à molhabilidade incompleta.

O aumento da porosidade aparente nos compósitos híbridos pode ser associado à formação de defeitos como vazios e bolhas a medida em que a matriz foi saturada pela fibra e resíduo. Esse efeito pode ter sido gerado segundo Costa (2016) pela dificuldade de impregnação da interface fibra/resina/carga.

4.3 Ensaio de flamabilidade dos compósitos

A Tabela 6 apresenta as taxas de queima dos compósitos com resíduo de lama vermelha, compósitos fibrosos e híbridos (resíduo/fibra) obtidas através do ensaio de flamabilidade que atendeu a norma ASTM D 635.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de Flamabilidade

Composição	Taxa (mm/min)
Matriz Plena	27,3 ($\pm 0,54$)
20 % - LV	13,03 ($\pm 0,11$)
40 % - LV	SI
5 % F. B	33,48 ($\pm 0,25$)
Híbrido	SI

Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

O compósito com fração mássica de 20 % de resíduo de lama vermelha propagou a chama, porém com velocidade reduzida quando comparado à matriz plena, já os compósitos com 40 % de LV e híbrido (resíduo/fibra) apagaram a chama antes que a mesma atingisse a linha de 75 mm, definida pela norma, sendo classificados como sem ignição (SI). A partir disso pode-se supor que a velocidade de propagação da chama tende a reduzir conforme o resíduo foi inserido na matriz polimérica. Segundo Ribeiro (2013), dificultando a propagação da chama e facilitando a sua extinção.

De acordo com Ullah *et al.* (2014) a incorporação de particulados inorgânicos, com baixa flamabilidade, pode atuar na redução da quantidade de material combustível disponível para a propagação, o que explicaria a progressiva redução na taxa de queima em função do aumento no teor de particulado.

A lama vermelha segundo Antunes *et al.* (2011) contém em sua composição química alguns óxidos (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , CaO , Na_2O , MnO , MgO), sendo metade da composição constituída por óxidos de alumínio e óxidos de ferro. Algumas pesquisas envolvendo óxidos metálicos constataram retardância de chamas para materiais como MnO e Fe_2O_3 . De acordo com Utstester (2010) o hidróxido de alumínio, material retardador de chama, é excelente para o meio ambiente e não produz gases tóxicos, já o óxido de magnésio metálico após ser aquecido liberando água, pode absorver calor e assim, atingir o objetivo de retardador de chama.

A Tabela 7 apresenta dados dos ensaios de flamabilidade de alguns compósitos de matrizes poliméricas encontrados nas literaturas, comparando com os compósitos de 20 % e 40

% de lama vermelha e híbrido estudados neste trabalho juntamente com a matriz plena. Almeida (2020) utilizou 30 % de minério de ferro (M. F), Mendes (2019) fabricou compósitos com fração mássica de 30 % de caulim ferruginoso (CCF), Oliveira *et al.* (2020) utilizou 40 % do resíduo de Lama vermelha (LV) e Santos (2020) fabricou compósitos com 40 % de resíduo de cobre (RCU).

A Tabela também faz um comparativo com o compósito híbrido de 20 % de caulim ferruginoso (CCF) com 5 % de fibra de bambu não tratada (FNT - 5) encontrado no trabalho de Mendes (2019), compósitos híbridos de 30 % de caulim (CA) com 5 % de fibras de juta e com 5 % de fibra de malva encontrados no trabalho de Costa (2016) e compósitos híbridos de 30 % de lama vermelha (LV) com 5 % de fibra de sisal apresentados no trabalho de Oliveira (2020).

Tabela 7 - Comparativo entre o presente trabalho com outros encontrados na literatura

Composição	Taxa (mm/min)	Fonte
Matriz Plena	27,3 (\pm 0,54)	Este trabalho
20 % - LV	13,03 (\pm 0,11)	Este trabalho
40 % - LV	SI	Este trabalho
Híbrido	SI	Este trabalho
30 % M. F	0,61 (\pm 0,14)	Almeida (2020)
CCF – 30	12,83 (\pm 0,33)	Mendes (2019)
40 % LV	10,73	Oliveira <i>et al.</i> (2020)
RCU – 40	22,31	Santos (2020)
CCF 20 / FNT – 5	15,15 (\pm 0,27)	Mendes (2019)
30 % CA / 5 % Juta	11,29	Costa (2016)
30 % CA / 5 % Malva	10,50	Costa (2016)
30 % LV / 5 % Sisal	14,31	Oliveira <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

Através do comparativo apresentado notou-se que a inserção de resíduo na matriz polimérica é muito eficaz no ensaio de flamabilidade, apresentando resultados excelentes na taxa de queima.

De acordo com as literaturas é possível notar uma melhora em relação ao retardo da chama com a inserção dos resíduos de caulim e de lama vermelha que segundo Costa (2016) pode ter atuado como um aditivo com baixo grau de retardo à chama no material, além disso os resíduos de caulim apresentam silicatos hidroxílicos com a presença de água na parte interna o que pode ter contribuído para que o material apresentasse resistência à chama.

Cunha (2015) fez uma suposição onde relacionou a redução da chama em compósitos, com efeitos de fenômenos físicos promovidos pelo envolvimento da porção interna da matriz e as partículas micrométricas de lama vermelha. Essa suposição teve como colaboração os

estudos de Tibiletti *et al.* (2011) que investigou as nano partículas de alumina “tri-hidratada” e partículas de alumina submicrométricas como carga em compósitos poliméricos e concluiu que a sinergia entre os dois componentes é atribuída à uma barreira física, desse modo os efeitos sinérgicos atuam reduzindo a flamabilidade provocada pelos efeitos físicos que resultam da grande área de superfície específica de nano partículas de óxido.

O compósito com 5 % de fibra de bambu apresentou a maior taxa de propagação de chama com cerca de 33,48 mm/min, em relação a matriz plena. De acordo com Oliveira (2013) o bambu pode ser consumido pelo fogo rapidamente principalmente se o teor de umidade interna estiver reduzido.

Os dados obtidos para os compósitos com a fibra de bambu (F. B) juntamente com a matriz plena fazendo um comparativo com os compósitos de fibras de sisal e malva utilizados no trabalho de Costa (2016) e compósitos de sisal e juta utilizados no trabalho de Oliveira *et al.* (2020), podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação dos resultados com outras literaturas

Composição	Taxa (mm/min)	Fonte
Matriz Plena	27,3 (\pm 0,54)	Este trabalho
5 % F. B	33,48 (\pm 0,25)	Este trabalho
5 % Fibra de sisal	17,34	Costa (2016)
5 % Fibra de malva	18,54	Costa (2016)
5 % Fibra Sisal	21,67	Oliveira <i>et al.</i> (2020)
5 % Fibra Juta	18,93	Oliveira <i>et al.</i> (2020)

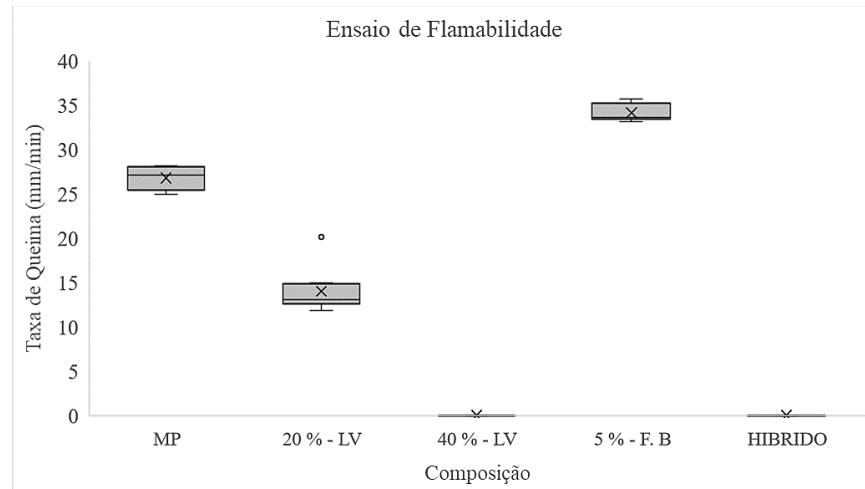
Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

Apesar da elevada taxa de propagação os compósitos fibrosos produzidos neste trabalho e os encontrados na literatura se classificaram dentro de normas como a HB (*horizontal burning ou teste de flamabilidade horizontal*), que considera um material adequado quando apresenta taxa inferior a 40 mm/min.

Através do Software livre PAST, realizou-se a análise de variância para as frações que apresentaram valores na taxa de queima (MP, 20 % - LV e 5 % F.B), durante a análise notou-se uma diferença significativa entre as composições com probabilidade de significância de 1,538E-12.

A Figura 26 apresenta o gráfico comparativo da matriz plena com os compósitos de lama vermelha (20 % e 40 %), compósitos com 5 % de fibra de bambu e híbrido (resíduo/fibra) com suas respectivas taxas de queima, onde pode ser constatada a diferença entre os resultados obtidos.

Figura 26 - Gráfico comparativo dos resíduos de lama vermelha, fibra de bambu e híbridos em relação à matriz plena, através do ensaio de flamabilidade



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

4.4 Propriedades mecânicas dos compósitos – Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão seguiu a norma ASTM D 790 de três pontos, a caracterização mecânica relacionado a resistência à flexão da matriz polimérica plena e os compósitos de lama vermelha, fibra de bambu e híbrido estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados obtidos a partir do ensaio e flexão dos compósitos

Composição (%)	Resistência à Flexão (MPa)
Matriz Plena	25,81 (\pm 5,15)
40 % - LV	28,80 (\pm 5,32)
5 % F. B	35,93 (\pm 5,04)
Híbrido	38,20 (\pm 5,50)

Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

Com base na análise de variância (ANOVA fator único) realizada através do Software livre *Past 3.2*, com 95 % de confiança, a probabilidade de significância foi de 0,0183 sendo $p < 0,05$ foi possível realizar o teste de Tukey (par a par) onde notou-se que apenas a composição híbrido se difere das demais que são estatisticamente iguais, resultado esse proveniente do elevado desvio padrão que girou em torno de 14 % para matriz plena e compósito de lama vermelha, 18 % para compósito fibroso e 20 % para compósito híbrido.

No entanto em termos de valores absolutos levando em consideração apenas os resultados das médias apresentadas na Tabela 11 nota-se um aumento da resistência quando há

a inserção de fibra, atuando assim como um reforço efetivo dentro da matriz, apresentando resultados superiores ao da matriz plena (MP) com cerca de 25,81 MPa e compósitos com resíduo de lama vermelha com cerca de 28,80 MPa.

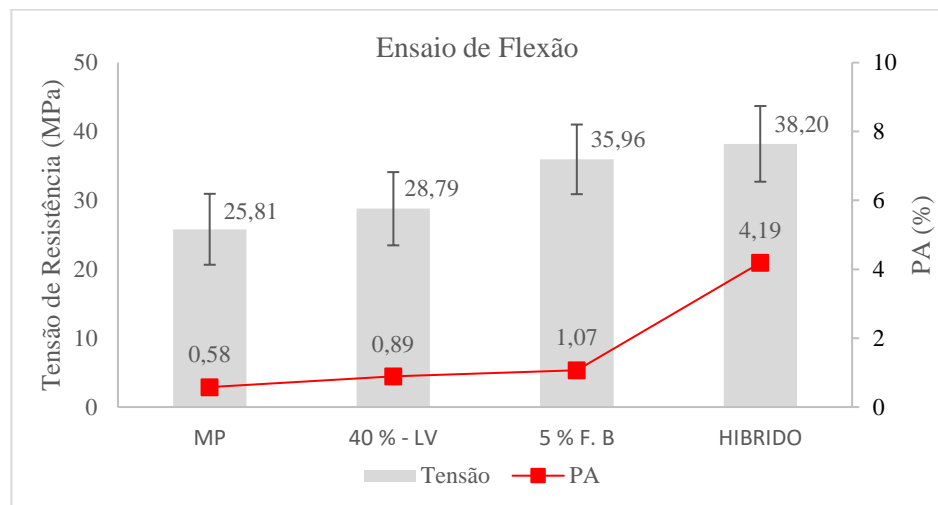
De acordo com Costa (2016), quando há uma inserção de determinados resíduos na matriz polimérica pode-se gerar defeitos, porosidades, vazios e outros fatores que prejudicam a resistência a flexão. Segundo Rocha (2012), os poros que se formaram durante o processo de usinagem podem ter atuado como concentradores de tensão e conseqüentemente nucleadores de trincas, facilitando assim, a redução da resistência a flexão dos compósitos com a inserção do resíduo.

O compósito híbrido foi o que exibiu o melhor resultado com cerca de 38,20 MPa, esse aumento da resistência pode estar relacionado com a boa dispersão do resíduo na matriz e até mesmo uma boa molhabilidade das fibras com a mistura de resina e resíduo.

O segundo melhor desempenho na resistência à flexão foi do compósito com a inserção das fibras de bambu, de acordo com Costa (2016) de maneira geral as fibras naturais melhoram a resistência dos compósitos. Esse fato tem relação com a interação na interface fibra/matriz e com a disposição dessas fibras que durante a fabricação do compósito foram colocadas de maneira alinhada, logo como o carregamento de flexão é aplicado transversalmente ao sentido das fibras essas fibras tentem a atuar como obstáculo para a ruptura do compósito.

A Figura 27 apresenta um gráfico da relação da tensão de resistência à flexão com a porosidade aparente.

Figura 27 - Gráfico da relação entre tensão de resistência à flexão e porosidade aparente



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

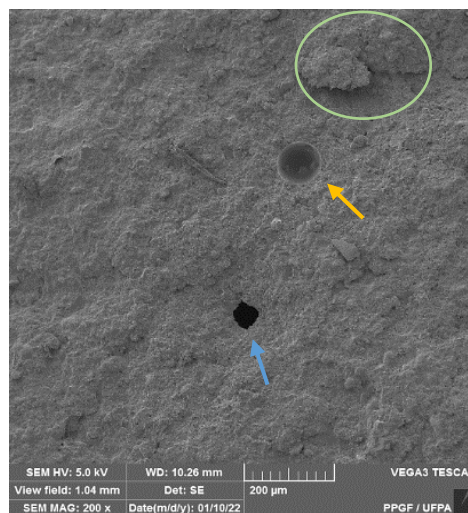
Através do gráfico apresentado na Figura 28 observa-se que a inserção das fibras nos compósitos foi fundamental para o aumento na resistência à flexão, o gráfico faz a combinação da tensão de resistência à flexão com a porosidade aparente, onde é possível notar que mesmo apresentando um aumento significativo na porosidade os compósitos fibrosos e híbridos apresentaram desempenho superior ao da matriz plena e dos compósitos com resíduo de lama vermelha na resistência à flexão.

4.4.1 Análise fractográfica dos compósitos

4.4.1.1 Compósitos de lama vermelha

Ao analisar a superfície de fratura do compósito com 40 % de lama vermelha, observou-se uma superfície rugosa, uma possível faceta de clivagem (círculo verde), além da presença de bolhas (seta amarela) e poros (seta azul). As bolhas de acordo com Rodrigues *et al.* (2010), podem ter sua origem através do processo de cura e podem ter contribuído na redução da resistência do material. A Figura 28 apresenta o resultado da análise fractográfica do compósito com o resíduo de lama vermelha utilizando magnificação de 200x.

Figura 28 - Análise fractográfica do compósito com 40 % de lama vermelha com magnificação de 200x



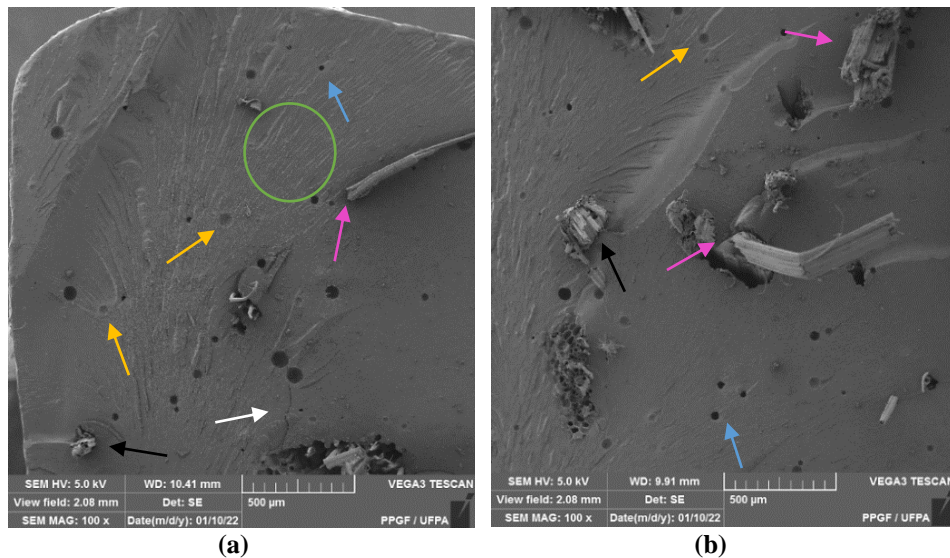
Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

4.4.1.2 Compósitos com fibra de bambu

As Figuras 29 (a) e 29 (b) apresentam os resultados da análise fractográfica dos compósitos com 5 % de fibra de bambu com magnificação de 100x. Através da micrografia é

possível notar diversos mecanismos tais como: fibras rompidas (seta preta) que de acordo com Santos (2021) representam uma boa adesão entre os componentes e podem atribuir melhoras na resistência dos compósitos. Há também presença de trincas (seta branca), poros (seta azul), bolhas (seta amarela), fibras sacadas da matriz (seta rosa) e estrias radiais (círculo verde) que segundo Rodrigues (2010) podem indicar a origem da trinca, característica de fratura frágil.

Figura 29 - Análise fractográfica do compósito com fibra de bambu com magnificação de 100x



(a)

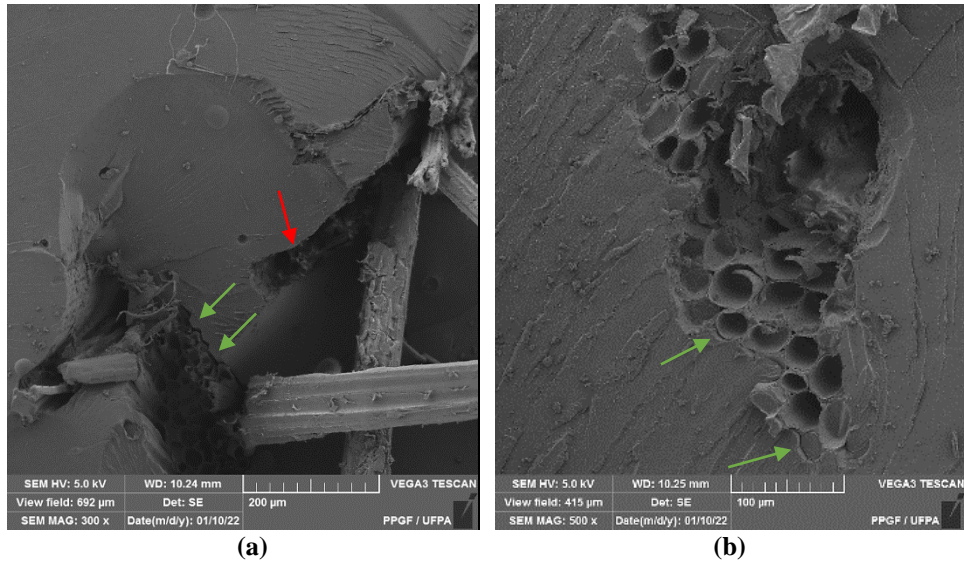
(b)

Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

Na Figura 30 (a) é possível observar o mecanismo de deslocamento de fibras (seta vermelha), além de vazios em torno de um feixe de fibras (seta verde) que segundo Mendes (2019) ressalta a incompatibilidade entre as fases.

Na Figura 30 (b) pode-se observar com maior precisão a seção transversal de um feixe de fibras, onde nota-se a presença de vazios em torno do feixe (seta verde) exemplificando mais uma vez a incompatibilidade entre as fases citada por Mendes (2019).

Figura 30 - Fractografia dos compósitos fibrosos com magnificações de 300x (a) e 500x (b)

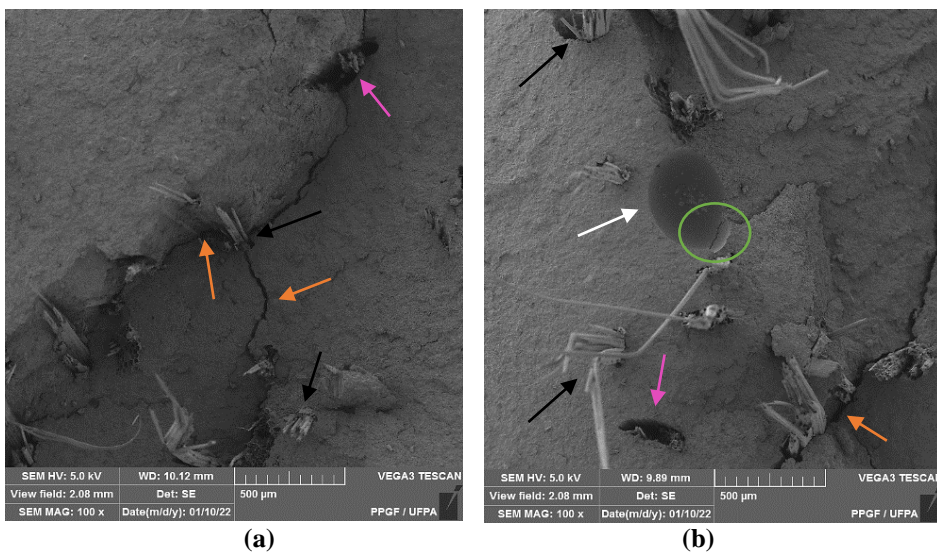


Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

4.4.1.3 Compósitos híbridos

As Figuras 31 (a) e 31 (b) apresentam a superfície de fratura do compósito híbrido com magnificação de 100x. Observa-se uma superfície rugosa composta por uma grande quantidade de fibras arrancadas da matriz (seta preta), que podem ter sido responsáveis pelo surgimento de trincas (seta laranja), vazios supostamente causados pelo arrancamento (*pull-out*) das fibras (seta rosa) e a presença de bolha (seta branca) que pode ter atuado com nucleador de trinca (círculo verde).

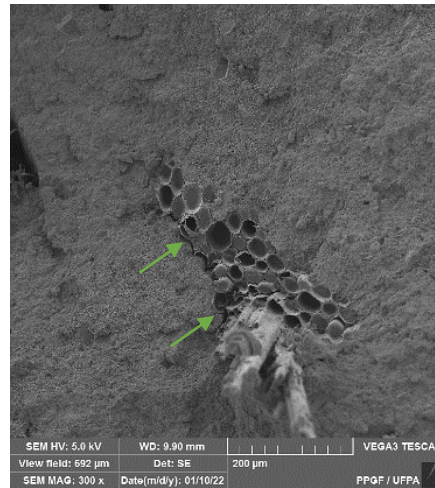
Figura 31 - Análise fractográfica do compósito híbrido com magnificação de 100x



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

Assim como nos compósitos fibrosos, nos híbridos foram encontrados vazios em torno do feixe de fibras (seta verde) indicando mais uma vez a incompatibilidade entre as fases. A Figura 32 apresenta a micrografia do feixe de fibras encontrado ao longo do compósito híbrido com magnificação de 300x.

Figura 32 - Fractografia do compósito híbrido com magnificação de 300x



Fonte: Elaborado pela Autora, 2022.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Os compósitos de matriz polimérica com a adição de resíduo industrial de lama vermelha e fibras de bambu apresentaram boas características de retardo a chama e resistência à flexão.

O estudo da avaliação da microestrutura da fibra e resíduo foi eficiente, evidenciando características que podem ter influenciado no desempenho mecânico do material. A análise química pontual através da espectroscopia de energia dispersiva da lama vermelha permitiu a identificação de elementos presentes no resíduo tais como: Alumínio (Al); Ferro (Fe); Silício (Si); Cálcio (Ca); Titânio (Ti) e Sódio (Na), alguns deles importantes no retardo da chama.

Nas propriedades físicas notou-se um aumento na absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) em relação a matriz plena, por outro lado a massa específica aparente (MEA) apresentou aumento significativo para os compósitos com a inserção resíduo de lama vermelha.

Através do ensaio de flamabilidade horizontal os compósitos foram classificados conforme a norma ASTM D 635 com características de retardo à chama, destacando-se os compósitos com 40 % de resíduo de lama vermelha e compósitos híbridos (resíduo/fibra) que apagaram a chama classificando-se como sem ignição (SI).

No ensaio mecânico de resistência à flexão constatou-se um aumento na resistência chegando ao valor de 38,20 MPa para os compósitos híbridos, valor esse superior ao da resina plena com cerca de 25,81 MPa.

A análise fractográfica apresentou características que estão relacionadas a resistência mecânica como o mecanismo de deslocamento de fibras, bolhas, trincas, estrias radiais e entre outras características fundamentais na determinação das falhas.

Os compósitos com resíduo de lama vermelha apresentaram grande eficácia quanto ao retardo da chama, a inserção das fibras de bambu foi fundamental para o aumento da resistência mecânica, viabilizando sua utilização. Os compósitos fabricados são bons candidatos em aplicações tais como: painéis; divisórias de paredes e materiais que não exijam elevado esforço mecânico, dessa forma reduzindo seu descarte e evitando a degradação do meio ambiente.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar tratamentos químicos nas fibras de bambu visando melhorar suas propriedades;
- Fabricar corpos de prova com fibras de bambu tratadas e não tratadas variando seus percentuais, tamanhos e orientações para comparar os resultados;
- Realizar sedimentação gravitacional para o resíduo de lama vermelha com o objetivo de obter granulometrias menores;
- Fabricar compósitos híbridos (resíduo/fibra), com os melhores resultados apresentados pelos compósitos fibrosos, variando o percentual de carga para analisar sua influência;
- Fabricar e analisar as propriedades dos compósitos com outra matriz polimérica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. R. **Reaproveitamento do resíduo de minério de ferro em compósitos de matriz polimérica**. 2020. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2020.
- ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, FT da; NAVARRO, G. R. B. Caracterização da lama vermelha brasileira (resíduo do refino da bauxita) e avaliação de suas propriedades para futuras aplicações. In: **International Workshop Advances in Cleaner Production**. 2011.
- ASKELAND, D. R. **Ciência e engenharia dos materiais**. Tradução Solange Aparecida Visconti. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- ASTM D 2734** – Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2009.
- ASTM D 570** – Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. Annual Book of . ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1998.
- ASTM D 635** – Standard Test Method for Rate of Burnin or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position, 2018.
- ASTM D 790** – "Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2017.
- ASTM D 792** – Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.
- AUERSVALDT, B. L.; LAY, L.A.; MIRANDA, T. Incorporação de Fibras Vegetais de Bambu ao Concreto em Substituição à Fibras Sintéticas. In: **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, 2019, Ponta Grossa. 2019.
- BARBALHO, N.; GARCIA, D. V.; SILVA, J. R. Aplicação do MatLab em Análise de Resistência Mecânica de Compressão Axial do Bambu no Concreto. **Unisanta Science and Technology**, v. 7, n. 2, 2018.
- BARBOSA, K. S. L. **Incorporação de fibras curtas de bambu (*bambusa vulgaris*) e resíduo industrial de caulim em compósitos de matriz polimérica: resistência à tração e fractografia**. 2018. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.
- BERNDSEN, R. S. *et al.* Propriedades físicas do bambu-mossô (*Phyllostachys pubescens*) em diferentes idades e posições do tronco. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n.1, p. 183-192, 2010.

BUCHNER, W.; SCHIELBS, R.; WINTER, G.; BUCHEL, K.H.; **Industrial Inorganic Chemistry**, VCH Publishers: New York, 1989, p. 247-255.

CAETANO, M. Flamabilidade: Ensaio de resistência à chama. **CTB**, 2019. Disponível em: <[CALLISTER Jr., W. D; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9ª Ed., Rio de Janeiro: LTC, 2016.](https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-termicas/flamabilidade/ensaios-de-resistencia-a-chama/#:~:text=Este%20ensaio%20pode%20efectuar%2Dse,chama%2020%20%C2%B1%201%20mm).>. Acesso em: 15 Set. 2021.</p>
</div>
<div data-bbox=)

CAMPBELL, F. C. Introduction to Composite Materials. In: _____. *Structural composite materials*. **ASM International**, 2010. p. 1-10. Disponível em: <http://www.asminternational.org/documents/10192/22833166/05287G_Sample_BuyNow.pdf/0804e1ca-913c-4c5b-909a-c5c12989d780> Acesso em: 25 Mai. 2021.

CATALISADORES (iniciadores de cura). **Diprofiber composites**. 2020. Disponível em:<<https://diprofiber.com.br/catalisadores/>>. Acesso em 27 jul. 2021.

CATALISADORES e aceleradores. **Sulfibra compósitos**. [s.d.]. Disponível em:<https://sulfibrafloripa.com.br/?page_id=165>. Acesso em 27 jul. 2021.

ÇOBAN, O.; BORA, M.O.; SINMAZCELIK, T. **Effect of Mixed Size Particles Reinforcing on the Thermal and Dynamic Mechanical Properties of Al₂O₃/PPS Composites**. *Polym. Compos.*, v. 37, p. 3219–3227, 2016.

COSTA, D. S. da. **Caracterização de materiais compósitos de matriz poliéster e fibras de bambu, sisal e vidro e híbridos bambu/sisal, bambu/vidro e sisal/vidro**. 2012. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

COSTA, D. S. da. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

CUNHA, E. J. de S. **Influência do uso de resíduos do processo Bayer nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de base polimérica reforçados com fibra de curauá (*ananas locidus*. Mill)**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais, Belém, 2015. 152 f.

DALPIAZ, G. **Estudo do efeito de cargas minerais em compósitos poliméricos particulados em matriz de polipropileno**. 2006. 160 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DELGADO, P. S. **O bambu como material eco-eficiente: caracterização e estudos exploratórios de aplicações.** 2011. P 81. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2011.

DEMAR. **Departamento de engenharia.** EEL – Escola de Engenharia de Lorena. USP - Universidade de São Paulo. 2009. Disponível em: <http://www.isca.in/rjcs/Archiver/vol2/i6/15.ISCA-RJCS-2012-069_Done.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2021.

FANG, H.; ZHANG, Y.; DENG, J.; RODRIGUE, D. Effect of Fiber Treatment on the Water Absorption and Mechanical Properties of Hemp Fiber/Polyethylene Composites. **J. Appl. Polym. Sci.** v. 127, p. 942–949, 2013.

FERNANDADG. **Como fazer uma casa de bambu.** 2019. Disponível em: <<https://dicasdearquitetura.com.br/como-fazer-uma-casa-de-bambu/>>. Acesso em: 11 Dez. 2021.

GEHLEN, L. R. **Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açai e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado.** Curitiba, 2014.

HASNAIN, Md; NAYAK, A.; ALKAHTANI, S.. **Polymeric and Natural Composites: Materials, Manufacturing and Biomedical Applications.** Springer, 2021.

HUNGRIA: um ano após o vazamento de lama tóxica. **Veja.** 2011. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/galeria-fotos/hungria-um-ano-apos-o-vazamento-de-lama-toxica/>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

HYDRO DO BRASIL. Bauxita e alumina - ponto de partida para a produção de alumínio, 2016. Disponível em: < <https://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/> > . Acesso em: 29 jul. 2021.

IEC 60695-11-10 ed 2.0. Fire hazard testing. Part 11-10: Test flames – 50 W horizontal and vertical flame test methods.

ISHIZAKI, M. H. *et al.* Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 3, p. 182-186, 2006.

KOMNITSAS, K., BARTZAS, G., PASPALIARIS, I., “Efficiency of limestone and red mud barriers: laboratory column studies”, **Minerals engineering**, n. 17, pp. 183-194, 2004.

LEANDRO, M. **Estudo da formação e influência do tricálcio aluminato (TCA) no processo de clarificação do licor rico.** 2015. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos - Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

LIMA, F. S. S. **Utilização da lama vermelha e do resíduo caulínico na produção de pigmento pozolânico para argamassas e concretos de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2006. 268 p.

LIMA, A. B. T. **Aplicações de cargas minerais em polímeros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LI, Y.; MAI, Y.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technol.** n. 60, p. 2037-2055, 2000.

LOURENÇO, L. M. G. **Caracterização física e mecânica de compósitos híbridos de matriz polimérica**. 2017. 97 p. Mestrado em Engenharia de Conceção e Desenvolvimento de Produto – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria, 2017.

MALLICK, P. K. **Fiber - reinforced composites: materials, manufacturing, and design**. 3ª Ed. CRC Press, Taylor and Francis Group, New York, 2007.

MARTINS Neto, A. J. **Desempenho Mecânico de Compósitos Híbridos de Fibras Naturais e Poliéster não Saturado**. 2010, 89f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.

MARTINS, M. A.; JOEKES, I. **Tire Rubber–Sisal Composites: Effect of Mercerization and Acetylation on Reinforcement**. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Instituto de Química, p.2507-2515, 2002.

MENDES, B. H. A. **Estudo da influência da incorporação de resíduo de beneficiamento de caulim nas propriedades de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de bambu (*bambusa vulgaris*)**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

MICROSCOPIA eletrônica. **LMic – Laboratório de Microscopia e Microanálises**, 2021. Disponível em: < <https://lmic.degeo.ufop.br/microscopia-eletr%C3%B4nica>>. Acesso em 02 jul. 2021.

MISHRA, S.; MOHANTY, A.; DRZAL, L. *et al.* Studies on mechanical performance of biofibres/glass reinforced polyester hybrid composites. **Composites Science and Technology**. Pp. 1377-1385, 2003.

MOLDAGEM Hand Lay-Up. **IPR - INDÚSTRIA DE PLÁSTICO REFORÇADO**, [s.d.]. Disponível em: <<https://ipr.ind.br/site/moldagem-hand-lay-up/>>. Acesso em 27 jul. 2021.

MORAES, M. H. M. de M. *et al.* Caracterização mecânica e resistência à chama de compósitos poliméricos com adição de resíduos de lama vermelha e caulim. **Atena Editora**, p. 74 – 84, 2019.

MORAES, M. H. M. de M. **Caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica com adição de resíduos sólidos industriais**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, 2019.

MOTA, I. O. *et al.* Estudo das propriedades físicas e mecânicas do bambu brasileiro (*bambusa vulgaris vittata*) para aplicação na construção de sistemas hidráulicos alternativos de distribuição de água à baixa pressão. **Revista de estudos ambientais**, n. 19, p. 19-26, 2017.

NÓBREGA, M. M. S. **Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá *Neoglaziovia variegata*: caracterização mecânica e sorção de água.** 2007. 123 p. Doutorado em Engenharia de Processos - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2007.

NUNES, K. S. **Influência da lama vermelha e fibra de curauá ananas lucidus, mill, nas propriedades físicas e mecânicas em compósitos de poliéster isofitálico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processo) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2015. 54 p.

OLIVEIRA, L. S. de. *et al.* Compósitos produzidos com resíduo de lama vermelha e fibras naturais: análise de flamabilidade. **Brazilian Journal of Development**, p. 1-8, 2020.

OLIVEIRA, L. F. A. de. **Conhecendo bambus e suas potencialidades para uso na construção civil.** 2013. 90 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PANZERA, T.H., STRECKER, K, SABARIZ, A.L.R., *et al.*, “**Investigation of the incorporation of rubber wastes in polymeric composites using full factorial design**” In: 11th International Conference on Nonconventional Materials and Technologies - Nocmat, 2005, Bath - UK.

PUKANSZKY, B.. **Influence of interface interaction on the ultimate tensile properties of polymer composites.** In: Composites, Vol. 21, pp. 255-262, 1990.

PUKANSZKY, B.; BELINA, K.; ROCKENBAUER, A., *et al.* **Effect of nucleation, filler anisotropy and orientation on the properties filler of PP composites.** In: Composites, Vol. 25, N° 3, pp. 205-214, 1994.

QUEIROZ, D. P. de. *et al.* Uso de fibras metálicas e lama vermelha em compósitos poliméricos híbridos. In: **ABM WEEK**, 74. 1-3 out. 2019, São Paulo. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br>>. Acesso em: 04 nov. 2021.

QUIRINO, M. G. **Estudo de matriz polimérica produzida com resina natural e fibra da semente de açaí (Euterpe precatória).** 2010. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2010.

REZENDE, M. C. **Fractografia de Compósitos Estruturais.** Divisão de Materiais/IAE/CTA, São José dos Campos- SP, 2007.

RIBAS, R. P. **Bambu: Planta de Grande Potencial no Desenvolvimento Sustentável.** 2016. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/8957594-Bambu-planta-de-grande-potencial-no-desenvolvimento-sustentavel-resumo.html>>. Acesso em: 11 Set. 2021.

RIBEIRO, L. M. Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (palf). **Holos**, vol 1, 2013.

ROCHA, A. C. L. “**Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados com Resíduos Siderúrgicos das Ligas Fe-Mn e Fe-Si-Mn: Caracterização Mecânica**” TCC, Universidade Federal do Pará - Marabá, 2012.

RODRIGUES, J. da S.; FUJIYAMA, R. T. e OLIVEIRA, D. R. C. de. Análise fractográfica de compósitos de matriz poliéster e resíduo da indústria madeireira. In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, VI. 1-10 ago. 2010, Paraíba. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/37650664-Analise-fractografica-de-compositos-de-matriz-poliester-e-residuos-da-industria-madeireira.html>>. Acesso em: 14 jan. 2022.

SAKAMOTO, C.. Poliéster insaturado. **Silaex**, 23 Mar. 2018. Disponível em: <<http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>>. Acesso em: 23 Jul. 2021.

SAMPAIO, J.A.; ANDRADE, M.C.; DUTRA, A.J.B. Bauxita. In: **Rochas & Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

SANCHEZ, E. M. S. *et al.* Compósito de Resina de Poliéster Insaturado com Bagaço de Cana-de-Açúcar: Influência do Tratamento das Fibras nas Propriedades. **Polímeros**, São Paulo, v. 20, n. 10, p. 10-20, 2010.

SANTOS, A. J. G dos. *et al.* Determinação de propriedades mecânicas de tração de compósitos híbridos reforçados utilizando fibras de bambu tratadas em solução NaOH e lama vermelha, **Brazilian Applied Science Review**. P.8- 9 , 2021.

SANTOS, D. G. dos. **Estudo termo-hídrico e caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra vegetal**: simulação 3d e experimentação. 2017. 172 p. Programa de pós-graduação em engenharia de processos - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.

SANTOS, J. G. dos S. **Caracterização de material compósito incorporado com fibras de bambu (*bambusa vulgaris*) e resíduos sólidos industriais para utilização como componente estrutural para a construção civil**. 2020. 178 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia - Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

SATHISHKUMAR, T.P.; NAVANEETHAKRISHNAN, P.; SHANKAR, S.; RAJASEKAR, R. Investigation of chemically treated longitudinally oriented snake grass fiber-reinforced isophthallic polyester composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 32, n. 22, p. 1698–1714, 2013.

SILVA, F. E. B., *et al.* “Lama Vermelha da Indústria de Beneficiamento de Alumina: Produção, Características, Disposição e Aplicações Alternativas”. **Revista Matéria**, Vol. 12, 2007, pp. 322 – 338.

TELES, J. G. P. *et al.* Propriedades de flexão de materiais compósitos forçados com fibras de bambu e sisal. In: **ABM WEEK**, 67. p. 772 – 782, 2012, São Paulo. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br>>. Acesso em: 15 nov. 2021.

TIBILETTI, L., LOUGUET, C., FERRY, L., COUTELEN, P., MAS, A., ROBIN, J., Termal degradation and fire behaviour of unsaturated polyesters filled with metallic oxides. **Polym Degrad Stab**, v. 96, n. 1, p. 67 – 75, 2011.

TOMAZELLO FILHO, M.; AZINI, A. **Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica de colmos de *Bambusa Vulgaris*** SCHRAD. IPEF, n.36, p. 43-50. 1987.

U.S.G. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. **Bauxite and Alumina**. Relatório. Ano base 2019. Estados Unidos da América, 2020. 31 p.

UL 94. Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances.

ULLAH, S.; AHMAD, F.; SHARIFF, A. M.; BUSTAM, M. A. Synergistic effects of kaolin clay on intumescent fire retardant coating composition for fire protection of structural steel substrate. *Polymer Degradation and Stability*, v. 110, p. 91-103, 2014.

UTSTESTER. Classificação de material retardador de chama. 2010. Disponível em: <https://pt.utstesters.com/blog/flame-retardant-material-classification_b47>. Acesso em: 24 jul. 2021.

VALADARES, E. Introdução aos microscópios eletrônicos de varredura e tunelamento, **Revista Brasileira de Ensino de Física**. Vol. 14, 1992.

VENTURA, A. M. F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. Departamento de Engenharia Química e Biológica, Instituto Superior Técnico, campus alameda, Lisboa - Portugal, 2009.

WANG, S. *et al.* **Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes**. Cap. 72, 2008, pp.1621-1635.

WAO - World Aluminium Organization. **Bauxite Residue Management Best Practice**, 2015. Disponível em: <bauxite.worldaluminium.org/fileadmin/user_upload/Bauxite_Residue_Management_-_Best_Practice_English_Compressed.pdf>. Acesso em: 11 Dez. 2021.

YURDANOVA, V. N. **Is Plastic the Problem, or Recycling**. 2013. Universidade Federal da Sibéria.

ZHANG, Y. *et al.* Red mud/polypropylene composite with mechanical and thermal properties. **Journal of Composite Materials**, v. 45, n. 26, p. 2811-2816, 2011.