



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DORIVANE COHEN FARIAS

**COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) E LAMA
VERMELHA: efeito do tratamento químico na resistência à tração dos compósitos**

Ananindeua/PA
2019

DORIVANE COHEN FARIAS

**COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) E LAMA
VERMELHA: efeito do tratamento químico na resistência à tração dos compósitos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará – UFPA, Campus Universitário de Ananindeua, como requisito para obtenção do título de bacharela em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Me. Eng. Alessandro José Gomes dos Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

**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)**

F224c Farias, Dorivane Cohen
Compósitos híbridos com fibras de bambu (*Bambusa vulgaris*)
e lama vermelha : efeito do tratamento químico na resistência à
tração dos compósitos / Dorivane Cohen Farias. — 2019.
62 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Alessandro José Gomes dos Santos
Coorientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ciência
e Tecnologia, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade
Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

1. Análise Mecânica. 2. Fibras Naturais. 3. Materiais
Compósitos. 4. Resíduo Industrial. I. Título.

CDD 620.118

DORIVANE COHEN FARIAS

**COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) E LAMA
VERMELHA: efeito do tratamento químico na resistência à tração dos compósitos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará - UFPA, Campus Universitário de Ananindeua, como requisito para obtenção do título de bacharela em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mineral.

Data de aprovação 25/06/2019

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Me. Eng. Alessandro José Gomes dos Santos
(FACET/UFPA/Campus Ananindeua - Orientador)

Deibson Silva da Costa

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
(FEMat/ UFPA/Campus Ananindeua - Coorientador)

André Wilson da Cruz Reis

Prof. Me. Eng. André Wilson da Cruz Reis
(PRODERNA/ITEC/UFPA – Examinador interno)

Miriane Alexandrino Pinheiro

Bel. Miriane Alexandrino Pinheiro
(PPGEQ/ITEC/UFPA – Examinador interno)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me permitir concluir mais essa etapa.

A minha família em especial aos meus pais Jonas Farias, Maria Cohen e a minha tia Nilcivane de Oliveira por todo incentivo.

Aos meus amigos de Ciência e Tecnologia 2016, principalmente ao João Victor de Oliveira, Nayla Silva e a Larissa Esquerdo pelo companheirismo e ajuda ao longo do curso.

Ao Naom Ricardo Nunes pela ajuda na confecção das placas dos compósitos.

Ao meu orientador Alessandro José Gomes dos Santos pela orientação no decorrer do trabalho.

Ao meu coorientador professor Deibson Silva da Costa pelas dicas, correções e incentivo no decorrer do trabalho.

Aos professores do curso de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Ao Bruno Henrique Mendes pela ajuda no tratamento químico das fibras.

Ao Emerson do Laboratório de Ensaios Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA pela disponibilidade e ajuda nos ensaios de tração.

Ao técnico Inaldo pela ajuda na análise do MEV.

Ao Laboratório de Engenharia Química da UFPA, pela disponibilidade de seus equipamentos, pois sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Ao bosque universitário da Universidade Federal do Pará pelo fornecimento dos colmos para extração das fibras.

A Hydro pelo fornecimento do resíduo.

A banca por aceitar avaliar este trabalho.

E por fim, não menos importante, a todos, que de forma direta ou indireta contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

(WALTER S. LANDOR).

RESUMO

A vasta área da ciência e da engenharia de materiais apresentam uma grande diversidade de aplicações, entre elas, destaca-se a produção de compósitos poliméricos incorporados com uma grande variedade de materiais de fontes naturais, de fácil acessibilidade, de grande abundância e considerados sustentáveis. Neste trabalho, foram produzidos compósitos de matriz polimérica incorporados com lama vermelha e compósitos híbridos com lama vermelha e fibras de bambu tratadas quimicamente e não tratadas, para análise mecânica de tração e fractográfica. A matriz polimérica utilizada foi à resina poliéster isoftálica insaturada juntamente com acelerador de cobalto (1,5 % v/v) e catalisador (1 % v/v). Os colmos de bambu foram coletados no Campus Profissional I (um) da Universidade Federal do Pará. As fibras foram extraídas manualmente, cortadas nos comprimentos de 15 mm e submetidas a tratamentos químicos em solução alcalina com 5 % de hidróxido de sódio (NaOH). A lama vermelha, proveniente da empresa Hydro Alunorte, foi peneirada manualmente em peneira de granulometria 100 mesh e caracterizada por meio da Difração de Raios – X (DRX). Os compósitos seguiram o processo de fabricação pelo método de laminação manual (*hay lay-up*). As proporções de lama vermelha inseridas nos compósitos foram de 10 %, 20 %, 30 % e 40 %. Para os compósitos híbridos foram inseridas as seguintes proporções: 3 %/10 %, 3 %/20 %, 3 %/30 % e 3 %/40 % (Fibra/Resíduo). Sendo confeccionados 10 (dez) corpos de prova para cada série fabricada. Os compósitos produzidos foram analisados quanto sua resistência à tração de acordo com a norma ASTM D3039. As análises fractográficas foram realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Como melhor resultado para compósitos com incorporação de resíduo teve-se a proporção 20 % com um limite de 36,63 MPa. Para compósitos híbridos com inserção de fibras não tratadas e resíduo, o melhor limite de resistência à tração foi de 36,25 MPa para a proporção de 3 % de fibras e 10 % de resíduo, já para compósitos híbridos com inserção de fibras tratadas e resíduo, o melhor resultado foi para proporção 3 %/10 % com um limite de 35,30 MPa. A fractografia realizada nas morfologias das fraturas dos compósitos demonstraram mecanismos como: trincas na matriz, descolamento e desfibrilamento de fibras, fibras rompidas e fibras arrancadas (*pull-out*).

Palavras-Chave: Análise Mecânica. Fibras Naturais. Materiais Compósitos. Resíduo Industrial.

ABSTRACT

The vast area of science and engineering of materials feature a wide variety of applications, including the production of polymeric composites embedded with a wide variety of materials from natural sources, of easy accessibility, great abundance and considered sustainable. In this work, were produced polymer matrix composites embedded with red mud and hybrid composites with red mud and bamboo fibres chemically treated and untreated, for mechanical analysis of traction and fractográfica. The polymeric matrix used was the isoftálica unsaturated polyester resin along with cobalt Accelerator (1.5 % v/v) and catalyst (1 % v/v). Bamboo culms were collected on Campus Professional I (a) of the Federal University of Pará. The fibres were drawn by hand, cut in 15 mm lengths and subjected to chemical treatments in alkaline solution with 5 % sodium hydroxide (NaOH). The red mud from the company Hydro Alunorte, was manually sifted in size 100 mesh sieve and characterized by x-ray diffraction-X (DRX). The composites manufacturing process followed by the manual lamination (hay lay-up). The proportions of red mud included in composites were of 10 %, 20 %, 30 % and 40 %. For the hybrid composites were inserted the following proportions: 3 %/10 %, 3% /20 %, 3 %/30 % and 3 %/40 % (fibre/Residue). Being made 10 (ten) specimens for each series manufactured. The composites produced were analysed as your tensile strength according to ASTM D3039. Fractográficas analyses were performed by scanning electron microscopy (SEM). Best result for composites with incorporation of residue had the proportion 20 % with a ceiling of 36.63 MPa. For hybrid composites with non-treated fibers insertion and residue, better tensile strength limit was 36.25 MPa for the proportion of 3 % and 10 % of waste fibres, hybrid composites with fiber and residue insertion, the best result fo (I) to 3 %/10 % proportion with a 35.30 MPa boundary. The fractografía held in the fracture morphologies of composites showed mechanisms such as: cracks in the array, and desfibrilamento fibre separation, broken fibers and fibers torn out (*pull-out*).

Keywords: Mechanical Analysis. Natural Fibres. Composite Materials. Industrial Waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de classificação dos compósitos.	17
Figura 2 – Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras, (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, (c) descontínuas e aleatórias.....	18
Figura 3 – Resina poliéster isoftálica.	21
Figura 4 – Estrutura da fibra vegetal	23
Figura 5 – Seção de um colmo de bambu.....	24
Figura 6 – Depósito de armazenamento da lama vermelha.....	27
Figura 7 – Mecanismos de falhas em compósitos fibrosos.	30
Figura 8 – Materiais sintéticos.....	31
Figura 9 – Resíduo (lama vermelha)	32
Figura 10 – Bambu utilizado para extraí as fibras.....	32
Figura 11 – Lama vermelha utilizada na confecção dos compósitos.	33
Figura 12 – Etapas de obtenção das fibras.	34
Figura 13 – Fibras de Bambu tratadas quimicamente.	34
Figura 14 – Etapas de fabricação dos compósitos.....	38
Figura 15 – Dimensão em mm dos corpos de prova para ensaio de tração.....	38
Figura 16 – Corpos de provas e máquina utilizada no ensaio.	39
Figura 17 – Amostras coletadas para análise microscópica.	39
Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura.	40
Figura 19 – Composição mineralógica da lama vermelha	41
Figura 20 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos com incorporação de lama vermelha.....	43
Figura 21 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos híbridos (Fibras/Resíduo).	46
Figura 22 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos híbridos (FBT/Resíduo).....	49
Figura 23 – Análise microscópica dos compósitos incorporados com lama vermelha.	50
Figura 24 – Análise microscópica dos compósitos híbridos com FBNT e LV.....	51
Figura 25 – Análise microscópica dos compósitos híbridos com FBT LV.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resinas poliésteres e suas características.	21
Tabela 2 – proporção de componentes dos compósitos com incorporação de resíduo.	35
Tabela 3 – proporção de componentes dos compósitos híbridos	35
Tabela 4 – Quantidade de placas e corpos de prova produzidos.	37
Tabela 5 – Resultados obtidos no ensaio de tração dos compósitos incorporados com lama vermelha.	42
Tabela 6 – Resistência à tração de compósitos poliméricos incorporados com resíduo.	44
Tabela 7 – Comportamento de resistência dos compósitos híbridos com inserção de fibras de bambu NT.....	45
Tabela 8 – Resistência à tração de compósitos híbridos de fibras <i>in natura</i> e resíduos.....	47
Tabela 9 – Resultado dos ensaios de tração realizados no material compósito híbrido com fibras tratadas.....	48
Tabela 10 – Resistência à tração de compósitos híbridos com fibras tratadas.....	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	American Society Testing Materials
DRX	Difração de Raios-X
EPMA	Electron Probe Micro Analysis
FBNT	Fibra de Bambu Não Tratada
FBTR	Fibra de Bambu Tratada
ICDD	International Center for Diffraction Data
LV	Lama Vermelha
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MEK-P	Peróxido de Metil Etil Cetona
MPa	Mega Pascal
NaOH	Hidróxido de Sódio
NPG	Neo Pentil Glicol
PDF	Power Diffraction File
PIXE	Próton Induced C-ray Emission
XRD	X-Ray Diffraction
XPS	X-Ray Photoelectron Analysis
UFPA	Universidade Federal do Pará
UV	Ultra Violeta

LISTA DE SIMBOLOS

σ	Tensão
F	Força
A_0	Área inicial da secção transversal do corpo de prova.
ε	Deformação.
l_i	Comprimento instantâneo.
l_0	Comprimento original

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Problemática e justificativa	15
1.2	Objetivos.....	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Materiais Compósitos.....	16
2.1.1	Classificação de materiais compósitos	16
2.1.2	Compósitos reforçados com partículas.....	17
2.1.3	Compósitos reforçados com fibras	18
2.2	Matrizes	19
2.2.1	Compósitos poliméricos	20
2.2.2	Resina poliéster.....	20
2.3	Fibras naturais.....	22
2.3.1	Fibras vegetais	22
2.4	Bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>)	24
2.4.1	Fibras de bambu.....	25
2.5	Tratamento químico em fibras	25
2.6	Cargas minerais em compósitos	26
2.6.1	Resíduo industrial: lama vermelha	27
2.7	Ensaio mecânicos dos materiais.....	28
2.7.1	Ensaio de tração.....	28
2.8	Difração de Raios – X.....	29
2.9	Fractografia.....	30
3	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	31
3.1	Equipamentos utilizados	31

3.2	 Materiais utilizados	31
3.2.1	Materiais sintéticos	31
3.2.2	Resíduo industrial (lama vermelha).....	32
3.2.3	Fibras de bambu.....	32
3.3	 Procedimentos experimentais	33
3.3.1	Resíduo (Lama Vermelha).....	33
3.3.2	Difração de Raios – X.....	33
3.3.3	Extração das fibras.....	34
3.3.4	Tratamento químico nas fibras	34
3.3.5	Determinação de componentes da mistura para confecção dos compósitos	35
3.3.6	Etapas de produção dos compósitos	35
3.3.7	Ensaio de tração	38
3.3.8	Fractografia.....	39
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	 Caracterização da lama vermelha	41
4.1.1	Difração de Raios – X.....	41
4.2	 Ensaio de resistência à tração	41
4.2.1	Compósitos com incorporação de lama vermelha	41
4.2.2	Compósitos híbridos de fibras não tratadas e lama vermelha.....	44
4.2.3	Compósito híbrido com fibras tratadas quimicamente e lama vermelha.....	47
4.3	 Fractografia	50
4.3.1	Compósito com incorporação de lama vermelha.....	50
4.3.2	Compósitos híbridos de fibras não tratadas e lama vermelha.....	51
4.3.3	Compósito híbrido com fibras tratadas quimicamente e lama vermelha.....	52
5	 CONCLUSÃO	54
6	 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	 REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais compósitos encontra-se voltado à sustentabilidade, de preferência que estes sejam oriundos da natureza, que não provoque impactos ambientais, ou ainda que tenham origens de sólidos ou rejeitos industriais, o que torna justificável sua aplicação na indústria (QUIRINO, 2010).

O surgimento de compósitos como classe de materiais começou na metade do século XX, com a produção de materiais multifásicos devidamente projetados, como é o caso de polímeros reforçados com fibras de vidro. Entretanto, materiais multifásicos, como tijolos de argilas reforçados com palhas, conchas marinhas e ligas como o aço já existiam há bastante tempo (CALLISTER, 2012).

Os compósitos existem em diferentes formas, porém os mais usuais são os constituídos por reforço de fibra inserido em uma matriz polimérica (VENTURA, 2009).

Materiais compósitos reforçados com partículas e fibras curtas apresentam grandes facilidades de reunir em um único material uma vasta gama de propriedades como resistência mecânica, condutividade e estabilidade térmica, coeficiente de atrito, dentre outras propriedades que não seriam possíveis de serem obtidas em materiais não compósitos a preços acessíveis (CASARIL *et al.*, 2007).

A utilização de fibras de fontes naturais como reforço em compósitos pode substituir as fibras sintéticas de alto custo como amianto, boro, carbono e vidro, que apesar de apresentarem ótimas propriedades, são abrasivas, de alta densidade, não biodegradáveis, de alto custo de reciclagem, além de apresentarem riscos à saúde (SILVA, 2014).

O uso de resíduos industriais como carga em compósitos surge da necessidade de buscar novas formas de reutiliza-los, visando o desenvolvimento de novos materiais, com boas propriedades (SANTOS, 2007).

Na busca por dar novos usos a resíduos industriais proveniente da indústria mineradora e contribuir com a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais de fontes naturais, de fácil obtenção e considerados sustentáveis no ramo da ciência e engenharia de materiais, desenvolveu-se neste trabalho materiais compósitos de matriz polimérica, resíduo industrial (lama vermelha) e fibras naturais extraídas dos colmos do bambu (*Bambusa vulgaris*). O material foi analisado quanto a sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração. As análises fractográficas para determinar possíveis mecanismos que ocasionaram falhas foram realizadas por meio da microscopia eletrônica de varredura.

1.1 Problemática e justificativa

O uso de recursos renováveis e o aproveitamento de rejeitos no desenvolvimento de materiais alternativos que agregam valor aos materiais precursores permitem a preservação do meio ambiente e propiciam um desenvolvimento sustentável (PAULA, 2011).

A utilização de resíduos industriais na fabricação de materiais compósitos é importante, pois evita que os mesmos permaneçam estocados sem nenhum aproveitamento ou aplicabilidade no meio científico e tecnológico. Lima (2007) diz que no Brasil a maioria das aplicações de cargas minerais nas indústrias é realizada de forma empírica, e que, o estudo e o entendimento de propriedades tanto das cargas quanto dos polímeros contribuem para uma melhor compreensão e previsão das propriedades de materiais compósitos e nanocompósitos.

Este trabalho pode ser considerado economicamente viável por ser constituído por materiais de baixo custo, como é o caso da resina utilizada na elaboração da matriz, bem como seus agentes de reforços, que são fibras facilmente encontradas a natureza, como é o caso das fibras de bambu.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Produzir materiais compósitos constituídos por uma matriz polimérica com inserção de fibras curtas de bambu (15 mm) e resíduo industrial (lama vermelha). Além de realizar análise mecânica por meio do ensaio de tração e análise dos aspectos fractográficos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o método de fabricação dos compósitos;
- Confeccionar materiais compósitos com incorporação de lama vermelha e compósitos híbridos (Fibras/Resíduo);
- Analisar o comportamento mecânico através do ensaio de tração dos materiais compósitos de matriz polimérica com incorporação de lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % e compósitos híbridos de matriz polimérica com incorporação de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % de lama vermelha com inserção com 3 % de fibras de bambu tratadas quimicamente e não tratadas;
- Realizar as análises nas superfícies de fraturas dos compósitos após o ensaio de tração por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos

Compósitos são definidos como sendo materiais multifásicos, projetados artificialmente em contrastes com materiais que ocorrem ou que se formam naturalmente, suas fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e separadas por uma região de interface distinta. A função de duas ou mais fases na composição tem como objetivo melhorar determinadas propriedades como resistências à tração, flexão, rigidez, fadiga e condutibilidades térmicas, que não seriam possíveis de serem obtidas de forma separada em cada material (CALLISTER, 2012; ANJOS; GHAVAMI; BARBOSA, 2003).

Materiais compósitos são compostos basicamente por uma base frágil e contínua denominada matriz e por componentes de reforços, que geralmente são fibrosos e atuam com transferidores de esforço, sendo responsáveis pela determinação de propriedades mecânicas (MARTINS NETO, 2010).

A região de interface entre a fibra e a matriz é a principal responsável pela transferência de sollicitação mecânica da matriz para o reforço, caso haja uma adesão ineficaz entre elas, podem ocorrer danos que irão comprometer o desempenho do compósito. Para melhorar essa região é comum realizar tratamentos com agentes compatibilizantes (MARTINS NETO, 2016; MANO, 2011).

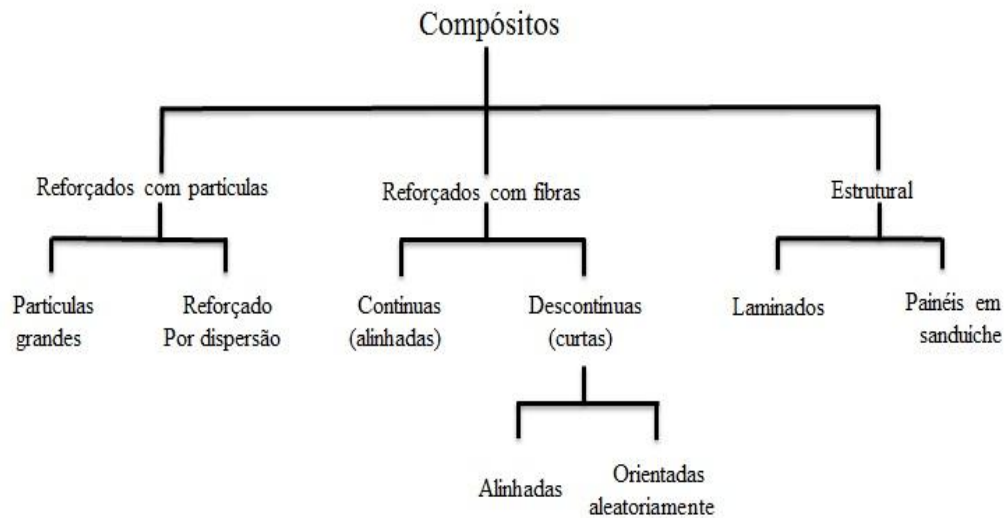
As propriedades mecânicas dos compósitos sofrem influências de diversos fatores como: estrutura dos materiais constituintes, frações volumétricas dos componentes e interação físico-química entre as fases envolvidas, além de outros fatores como geometria, dimensão, concentração e dispersão de reforço (TARGA, 2011).

2.1.1 Classificação de materiais compósitos

De acordo com Ventura (2009) os materiais compósitos são classificados de acordo com seus materiais constituintes.

Conforme Callister (2012) os materiais compósitos recebem divisões e subdivisões, conforme ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de classificação dos compósitos.



Fonte: Adaptado de Callister (2012).

2.1.2 Compósitos reforçados com partículas

Compósitos reforçados com partículas subdividem-se em dois grupos em: compósitos reforçados por partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão (CALLISTER, 2012).

O termo “grande” não considera as ligações da partícula/matriz no contexto atômico ou molecular e sim no conceito mecânico de sólido contínuo, dentre exemplos de compósitos com partículas grandes pode-se citar o concreto, pois, é composto de cimento (matriz) e (particulados) areia e pedregulho, a geometria das partículas podem variar, entretanto as dimensões devem ser iguais em todas as direções, e com distribuições uniformes na matriz (QUIRINO, 2010).

Nos compósitos reforçados por dispersão as partículas são normalmente muito menores com diâmetros variando de $0,01\mu\text{m}$ a $0,1\mu\text{m}$ (10 nm a 100 nm), as interações partícula/matriz ocorrem a nível molecular, a matriz suporta a maioria da carga aplicada, enquanto, as pequenas partículas dificultam os movimentos de discordâncias, assim, a deformação plástica é reduzida o que contribui para melhores limites de escoamento, resistência à tração e dureza (CALLISTER, 2012).

As propriedades mecânicas de compósitos com partícula grande são melhoradas pela ação reforçante de fibras, já para compósitos reforçados por dispersão a resistência é reforçada por pequenas partículas (QUIRINO, 2010).

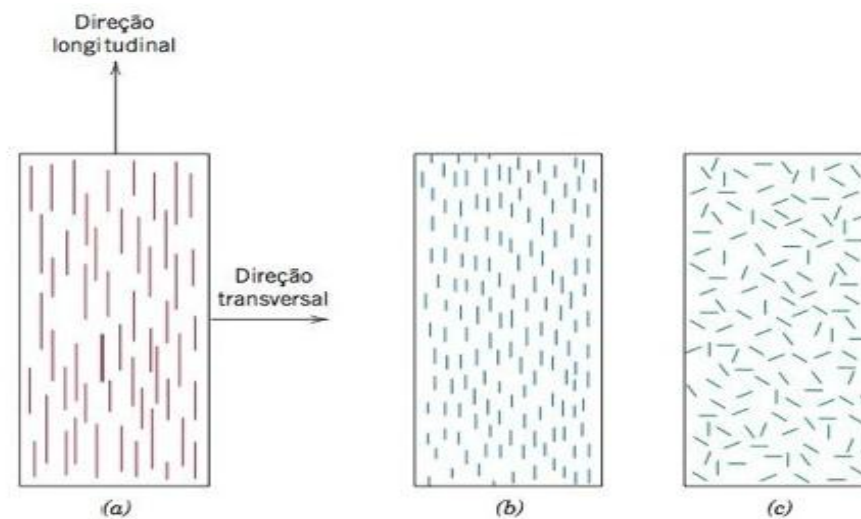
2.1.3 Compósitos reforçados com fibras

Compósitos reforçados com fibras são os mais importantes tecnologicamente, o intuito da produção é elaborar compósitos com fibras resistentes e com módulos específicos elevados, utilizando materiais com baixo peso específico tanto na matriz quanto na fibra (BRANDÃO, 2015).

Normalmente a distribuição uniforme das fibras resulta em melhores combinações de propriedades, os resultados mecânicos dependem de variáveis como o comportamento de tensão-deformação entre as fases fibra e matriz, frações volumétricas e direção na qual se aplica a carga (VENTURA, 2009).

As fibras utilizadas como componente de reforços em compósitos podem ser sintéticas ou naturais. Orientadas de formas alinhadas e contínuas, alinhadas e descontínuas, aleatórias e descontínuas (MILANESE, 2008; MARTINS NETO, 2016). A Figura 2 ilustra essa classificação.

Figura 2 – Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras, (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, (c) descontínuas e aleatórias.



Fonte: Callister (2012).

2.1.4 Compósitos híbridos

São materiais projetados com diversos tipos de reforços, combinando fibras e partículas, ou ainda mais de um tipo de fibra ou partícula no mesmo material (BARROS, 2006).

Normalmente os materiais compósitos híbridos tendem a apresentar melhores combinações de propriedades do que os compósitos que contém um único tipo de fibra (CALLISTER, 2012).

Compósitos híbridos podem atender requisitos como tenacidade a fratura e preservar propriedades físicas e mecânicas de compósitos compostos por um único tipo de fibra (TIMARCO, 2016).

A grande vantagem dos compósitos híbridos é que quando submetidos à tensão de tração, existe uma transferência de carga para as fibras que são constituídas de tipos diferentes com propriedades diversas. As falhas surgem, porém não são repentinas, portanto, não são catastróficas (QUIRINO, 2010).

As principais aplicações de compósitos híbridos incluem fabricações de componentes estruturais de baixo peso para transportes, artigos esportivos e componentes ortopédicos de baixo peso (CALLISTER, 2012).

Borges (2018) analisou o comportamento de resistência à tração de compósitos híbridos de matriz poliéster reforçada com 3 % de fibras de bambu nos comprimentos de 15 mm tratadas quimicamente e não tratadas e resíduo de cobre nas proporções de 10 %, 20 % e 30 %, e obteve como melhor resultado 37,94 MPa para a fração de 3 % de fibra não tratada e 10 % de resíduo. Para compósitos híbridos de fibras tratadas e resíduo o melhor resultado foi para a fração de 3 %/20 % (fibra/resíduo) com um limite de 34,46 MPa.

Santos (2018) estudou a influência da inserção de fibras de bambu 15 mm tratadas quimicamente e resíduo de caulim nas proporções de 3 %/10 %, 3 %/20 % e 3 %/30 % (fibra/resíduo) nas determinações de propriedades mecânicas de tração de compósitos híbridos de matriz poliéster e obteve como melhor resultado 41,07 MPa para a proporção 3 % de fibra e 20 % de resíduo.

Barbosa (2018) ao analisar a resistência a resistência à tração de compósitos híbridos de matriz poliéster com inserção de 3 % de fibras de bambu e 15 mm não tratadas e incorporação de resíduo de caulim flint nas proporções de 10 %, 20 % e 30 %, e obteve como melhor desempenho a fração de 3 % /20 % com um limite de 24,47 MPa.

2.2 Matrizes

De acordo com Almeida (2012) as matrizes podem ser de origens metálicas, cerâmicas ou poliméricas e desempenham diversas funções em materiais compósitos como: manter a coesão nas fibras, proteger do meio envolvente, proteger as fibras de danos durante o

manuseio, distribuir o carregamento e redistribuir a carga pelo material de reforço em caso de ruptura.

Saraiva (2013) diz que na produção de compósitos as matrizes que mais se destacam são as poliméricas, as quais dividem-se em dois tipos de polímeros que são os termoplásticos e os termorrígidos.

O polímero termoplástico ocorre por meio de cadeias lineares ou ramificadas, sem ligações cruzadas e são capazes de sofrer alterações físicas reversíveis, os termoplásticos dividem-se em: termoplásticos convencionais, especiais e da engenharia (BRASKEM, 2002).

Já os termorrígidos ao sofrerem alterações em presença de temperatura e pressão elevadas amolecem, sofrem processos de cura, onde ocorre uma transformação química irreversível com formação de ligações cruzadas tornando-os rígidos e incapazes de sofrerem modificações físicas posteriores (CANEVAROLO, 2010).

2.2.1 Compósitos poliméricos

São constituídos normalmente por duas fases sendo uma polimérica denominada matriz e outra normalmente fibrosa denominada reforço, na formação de um compósito polimérico é necessário que haja uma interação química ou e ou/física entre as fases envolvidas para que haja a transferência de esforços da matriz para o reforço (BRASKEM, 2002).

Na moldagem das duas fases ocorre um endurecimento polimérico através de um processo de cura que acopla as duas fases, proporcionando ao material final, propriedades especiais como: leveza, flexibilidade, durabilidade, resistência e adaptabilidade que definem sua moderna e ampla aplicabilidade (LEÃO, 2008).

A fase polimérica geralmente é constituída por resinas termofixas do tipo poliéster insaturada (ortoftálica, tereftálica, isoftálica ou bisfenólica), dissolvida em solvente reativo como o estireno ou ainda uma resina éster vinílica ou epóxi (LEÃO, 2008).

Fibras como vidro, carbono e aramida estão entre os agentes de reforços utilizados na fabricação de materiais compósitos poliméricos (CALLISTER, 2012).

2.2.2 Resina poliéster

As resinas são polímeros sintéticos de importância primordial como material na engenharia, suas moléculas finais podem ser formadas de milhares de unidades repetidas denominados monômeros, as propriedades físicas e químicas do polímero dependem da estrutura de formação (NASSEH, 2007).

A resina poliéster é formada pela reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis, que ao sofrerem reações formam moléculas com cadeias longas e lineares, a reação de síntese da resina poliéster é de polimerização por condensação em etapas, sendo, a reação de um álcool com um ácido resultando em uma reação de esterificação (LEVY NETO; PARDINI, 2006). A Tabela 1 apresenta algumas resinas poliésteres e suas características.

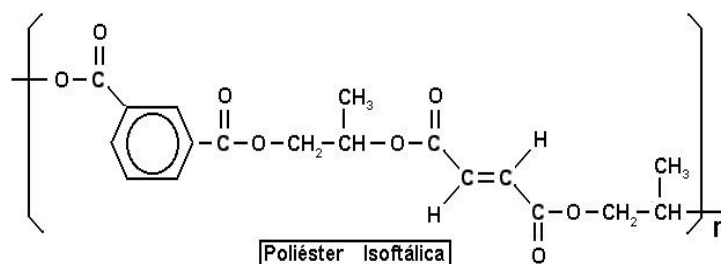
Tabela 1 – Resinas poliésteres e suas características.

Tipos de Resinas	Características
Ortoftálica	Resinas comuns e de baixo custo.
Tereftálica	Resistência superior a ortoftálica, porém apresenta baixa resistência a UV.
Isoftálica	Melhores características mecânicas, química e térmica que as já citadas.
Isoftálica com NPG	O NPG melhora a resistência à hidrólise.
Bisfenólicas	Melhores características térmicas e químicas.

Fonte: Silaex (2018).

A resina poliéster isoftálica possui ácido que não forma anidrido cíclico, com isso, não sofre desvantagem de regeneração, o que resulta em poliésteres de maiores pesos moleculares (cadeias mais longas), conferindo ao produto final maior resistência mecânica devido à capacidade de absorção de impacto (SILAEX, 2018). A Figura 3 mostra a estrutura química da resina poliéster isoftálica.

Figura 3 – Resina poliéster isoftálica.



Fonte: Silaex (2018).

As resinas poliésteres são fornecidas na forma líquida viscosa, que ao passar por uma reação química exotérmica de cura transformam-se em um sólido termorrígido (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

O processamento de cura dessas resinas geralmente ocorre em temperatura ambiente, por meio de combinações químicas com agentes de cura, através da ação de catalisadores ou agentes do ar, dentre as variáveis a serem consideradas, incluem o tipo e a concentração dos agentes de cura, catalisadores e ou aceleradores, temperatura, tempo, cura única ou pós-cura e interações entre esses fatores (FONTES, 2013).

2.3 Fibras naturais

As fibras naturais podem ser de origens minerais, vegetais e animais, suas propriedades física dependem de suas composições químicas, são bastante heterogêneas e sofrem influências de vários fatores como: tipo de solo, condições climáticas, fertilizantes utilizados, colheita, folhas, frutos e do caule (SANTOS, 2006).

Conforme Brandão (2015), as fibras naturais podem ser extraídas de diversas partes da planta como do caule (juta, malva, bagaço de cana-de-açúcar, bambu), folhas (sisal, bananeira, abacaxi, curauá), frutos (algodão, coco), troncos (madeira).

As fibras naturais apresentam alto módulos de elasticidades e resistências específicas, suas propriedades físico-mecânicas podem ser melhoradas perante a adição de agentes químicos (MARGEM, 2013).

2.3.1 Fibras vegetais

As fibras vegetais apresentam fórmulas e estruturas químicas complexas, são compostas basicamente por lignina, heminocelulose, celulose além de outros componentes orgânicos (TARGA, 2011).

A lignina é um material hidrofóbico, apresenta estrutura tridimensional fortemente ramificada, podendo ser classificada como um polifenol (SILVA *et al.*, 2009). Ela confere rigidez à parede celular e na madeira atua como ligação entre as células, gerando uma estrutura resistente ao impacto, compressão e a dobra (SANCHEZ *et al.*, 2010).

A heminocelulose é um polissacarídeo cuja formação ocorre pela polimerização de vários açúcares, incluindo glicose, xilose, galactose, arabinose e manose, normalmente, a heminocelulose atua como agente ligante entre celulose e lignina e, não se encontra diretamente relacionada à resistência e dureza das fibras (PAULA, 2011).

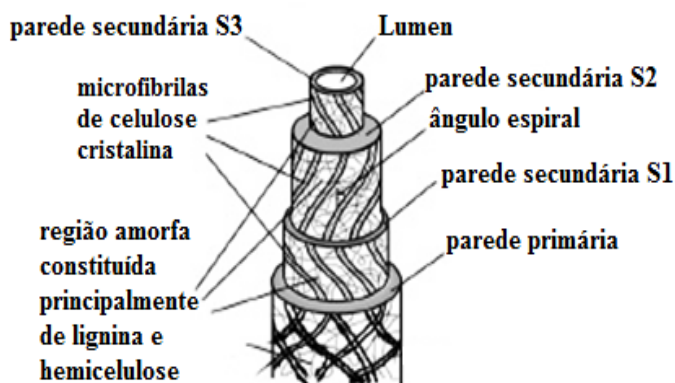
A celulose é o principal componente das fibras vegetais, e a principal responsável pela sua resistência. Suas moléculas apresentam unidades repetitivas formadas por duas moléculas de glicose esterificada por meio de ligações β -1,4-glicosídicas, essas unidades são

constituídas por seis grupos de hidroxilas, que estabelecem interações do tipo ligação de hidrogênio intra e intermolecular, por conta dessas ligações há uma grande tendência da celulose formar cristais, o que as tornam completamente insolúveis em água e na maioria de solventes orgânicos (SILVA, 2003; SILVA *et al.*, 2009).

Silva (2003) diz que cada fibra vegetal é composta de várias outras fibras elementares fortemente ligadas entre si por um material de cementação, constituído principalmente de lignina. As fibras elementares de acordo com Gomes (2015) são formadas por paredes celulares que circulam o lúmen, essas paredes recebem denominações da parte externa para a interna como: primária, secundária, e assim sucessivamente.

A parede primária apresenta em torno de 0,05 μm de espessura, a secundária é formada por três camadas distintas sendo a S1 entre 0,1 μm e 0,2 μm de espessura, a S2 tem de 2 μm a 10 μm e a S3 mais interna com cerca de 0,1 μm de espessura (SANTOS, 2013). A Figura 4 mostra a estrutura de uma fibra vegetal.

Figura 4 – Estrutura da fibra vegetal



Fonte: Adaptado de Rong *et al.* (2001).

Fibras de bananeira, coco, algodão, juta, abacaxi, rami e sisal estão entre as diversas fibras cultivadas no Brasil (BEZERRA, 2014).

Dentre as vantagens do uso de fibras vegetais pode-se citar: abundância, baixo custo, baixa densidade, propriedades específicas adequadas, facilidade de obtenção e manuseio, baixa abrasão nos equipamentos e moldes, retirada de dióxido de carbono do meio ambiente, biodegradabilidade, fontes renováveis (TARGA *et al.*, 2009).

Dentre as desvantagens destacam-se: facilidade de absorção de umidade, variações de propriedades conforme sua origem, baixa estabilidade térmica e facilidade de incorporação de micro organismos (TARGA, 2011).

2.4 Bambu (*Bambusa vulgaris*)

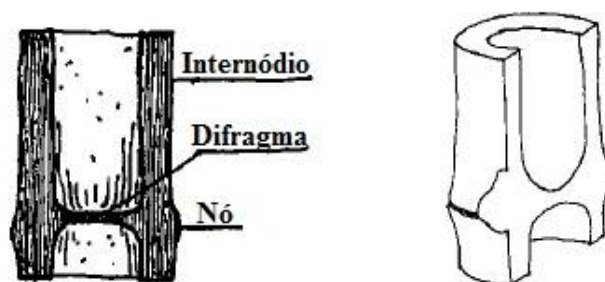
O bambu vem tornando-se largamente utilizado como material de construção em diversos países onde predomina em abundância, devido suas boas características físicas, formas geométricas, baixo custo e facilidade de obtenção (BERALDO; RIVERO, 2003).

Estima-se que no mundo existem mais de 1000 espécies de bambu espalhadas pela Ásia, Oceania, África e Américas (VASCONCELLOS, 2004). No Brasil ocorrem espécies como *Dendrocalamus giganteus* e *Bambusa vulgaris* (BERALDO; RIVERO, 2003).

O bambu é composto por duas partes, sendo uma subterrânea composta por rizomas e raízes e uma aéreas compostas por colmos, galhos e folhas (VASCONCELLOS, 2004).

Os colmos se formam por meio de uma série de nós e entrenós, conforme o bambu cresce cada novo nó é envolvido por uma folha caulinar protetora, os colmos diferem quanto à espécie em relação ao comprimento, espessura, diâmetro, espaçamentos dos nós e resistência (GHAVAMI; MARINHO, 2005). A Figura 5 mostra a seção de um colmo de bambu.

Figura 5 – Seção de um colmo de bambu.



Fonte: García (2018).

Vasconcellos (2004) ao analisar microscopicamente um colmo concluiu que o mesmo é composto por:

- Vasos condutores: responsáveis pelo transporte de água e seivas por todas as partes do bambu;
- Fibras: células mais rígidas responsáveis pela resistência do bambu;
- Parênquima: responsáveis pelo preenchimento do espaço restante da parede do colmo;
- Lignina: substância responsável pela união de todos os componentes.

Para o uso do bambu em grande escala como material economicamente viável e com possibilidade de industrialização é crucial um estudo sistemático por meio de procedimentos

de plantação, colheita, cura, tratamento e pós-tratamento, além de uma análise completa das propriedades físicas e mecânicas do colmo (GHAVAMI; MARINHO, 2005).

2.4.1 Fibras de bambu

As fibras de bambu são as principais responsáveis pela resistência mecânica dos colmos, nos internós encontram-se orientadas de forma axial, paralelas ao eixo de crescimento e representam um total de 40 a 50% do tecido do colmo e 60 a 70 % de sua massa (PADOVAN, 2010).

De acordo com Beraldo *et al.* (1996) as dimensões das fibras do bambu diferem em relação as espécies, o comprimento médio varia entre 1,65 a 3,43 mm, ocupam uma quantidades de feixes fibrovasculares da base para as extremidades do colmo.

Para Guimarães *et al.* (2010) o conhecimento da distribuição dos constituintes químicos no colmo do bambu, bem como da variabilidade das características dimensionais das fibras são fatores importantes para uma maior utilização do potencial desta matéria-prima na produção de compósitos, especialmente em compósitos poliméricos.

2.5 Tratamento químico em fibras

As modificações em fibras naturais utilizadas em compósitos buscam melhorar a interface entre a fibra e a matriz, acrescentando melhores propriedades e diminuindo a absorção de umidade, que acarreta em um dos mais graves problemas em compósitos reforçados com fibras naturais (GIACOMINI, 2003).

O tratamento de fibras com NaOH também denominado mercerização é muito utilizado como pré-tratamento ou revestimento de fibras naturais, nesse procedimento acontece a quebra das ligações de hidrogênio que unem as cadeias de celulose, conferindo uma superfície mais rugosas que auxilia no ancoramento mecânico (PAULA, 2011).

A interação entre fibras naturais e matriz polimérica é muito importante, pois a matriz apresenta natureza hidrofóbica e a fibra hidrofílica, logo, a modificação química nas fibras busca diminuir o caráter hidrofílico, de modo a favorecer a interação com a matriz (JESUS, *et al.*, 2015).

O efeito da modificação química melhora as afinidades polares entre a fibra e a matriz, devido às alterações hidrofílicas nas fibras, melhorando a interação interfacial fibra e matriz e conseqüentemente o desempenho mecânico (PAULA, 2011).

A superfície rugosa das fibras após o tratamento melhora a aderência entre a fibra e a matriz (SILVA, 2003). Além disso, o tratamento químico remove impurezas e constituintes amorfos (JESUS, *et al.*, 2015).

2.6 Cargas minerais em compósitos

Carga mineral é o termo usado para definir o uso de determinados pós minerais utilizados em misturas com polímeros para confeccionar compósitos, as propriedades dessas cargas dependem do tipo de minérios constituintes e sofrem influências da forma, tamanho da partícula, dureza, composição química e da estrutura cristalina (LIMA, 2007).

Dalpiaç (2006) diz que as cargas no que se referem à forma, são classificadas em quatro categorias:

- Partículas esféricas;
- Partículas granulares (cubos, paralelepípedos, formas irregulares);
- Partículas lamelares (plaquetas e lamelas);
- Partículas fibrilares ou aciculares (fibras e bastonetes).

O uso de cargas minerais em compósitos surge da necessidade de viabilizá-los e torná-los economicamente atrativo dentro das indústrias, seu uso em compósito é justificado principalmente por contribuir com a preservação ambiental, uma vez que, esses pós são materiais difíceis de ser decompor (SANTOS, 2007).

O desempenho de uma carga mineral na fabricação de compósitos depende de vários fatores como granulometria, área de superfície, relação de aspecto e de propriedades mineralógicas como: estrutura cristalina, propriedades ópticas, hábitos, clivagem, dureza, densidade, composição química, brilho, cor e propriedades físico-químicas de superfície (LIMA, 2007).

Ainda de acordo com Lima (2007) a aplicação de cargas minerais na fabricação de materiais compósitos apresenta diversas vantagens que vão desde a diminuição de custos, até a agregação de melhorias nas propriedades químicas e físicas do produto.

Costa (2016) ao analisar a resistência à tração dos compósitos de matriz poliéster com incorporação de lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 % obteve como melhor resultado à proporção de 10 % de resíduo com um limite médio de 24, 85 MPa. Nesta análise o autor salienta que a lama vermelha desempenhou função de carga de enchimento e não de reforço, uma vez que apresentou resistências inferiores a matriz poliéster plena.

El Banna (2017) analisou a resistência à tração de compósitos de matriz poliéster e resíduo de cobre e os resultados mostraram que os compósitos com frações de 10 % e 20 % de resíduo demonstraram limites inferiores do que os da matriz plena. Já os compósitos com 30 % e 40 % de resíduo de cobre demonstraram um aumento na resistência à tração.

Santos (2018) estudou o comportamento de resistência à tração de compósitos com adição de resíduo de caulim em matriz poliéster e obteve resultados superiores em relação à matriz plena. Os resultados do ensaio mostraram que o compósito que apresentou melhor desempenho foi o que continha a fração com 20 % de resíduo com uma resistência à tração de 37,05 MPa.

2.6.1 Resíduo industrial: lama vermelha

A lama vermelha é um produto insolúvel proveniente da indústria de beneficiamento do alumínio, sua formação ocorre por meio do refino da bauxita para a produção de alumina (Al_2O_3) através do processo bayer (SILVA FILHO *et al.*, 2007).

A lama vermelha é composta basicamente por silício, alumínio, ferro, cálcio, titânio e sódio, além de uma série de componentes menores, incluindo potássio, cromo, vanádio, níquel, bário, cobre, manganês, chumbo e zinco, podendo variar de acordo com a natureza da bauxita e das técnicas empregadas no processo bayer (ANTUNES *et al.*, 2011).

O armazenamento da lama vermelha é realizado de forma simples e convencional em lagoas ou empilhamentos, porém, apresenta desvantagens como alto custo, grandes áreas ocupadas, acompanhamento devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, aplicação de materiais impermeáveis para impedir a lixiviação do resíduo, além do risco de causar contaminação do solo e de água subterrâneas e superficiais (RESENDE, 2012). A Figura 6 mostra um depósito de armazenamento da lama vermelha.

Figura 6 – Depósito de armazenamento da lama vermelha.



Fonte: Hydro (2019).

A qualidade da jazida de bauxita utilizada influencia diretamente na quantidade de lama vermelha produzida (SILVA FILHO *et al.*, 2007).

O desenvolvimento de novas tecnologias para reutilizar a lama vermelha surge como alternativa viável para reduzir problemas gerados pela grande produção, outro fator importante é o conhecimento de suas propriedades e características, que podem evidenciar suas possíveis potencialidades (ANTUNES *et al.*, 2011).

2.7 Ensaios mecânicos dos materiais

Técnicas que permitem a determinação de propriedades no que se refere ao comportamento do material quando estão sob a ação de esforços (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

São classificados em destrutivos aqueles que causam ruptura ou inutilização do material (tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão) e não destrutivos (raios-X, ultrassom, magnaflux, elétricos, dentre outros) que servem para determinar falhas e algumas propriedades físicas (SOUZA, 1982).

2.7.1 Ensaio de tração

Dentre os ensaios mecânicos, o ensaio de tração é o que mais se destaca na avaliação de propriedades mecânicas de materiais, sua vasta aplicabilidade deve-se ao fato de ser um método simples e de fácil execução (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Neste ensaio, o corpo de prova é fixado nas garras da máquina de ensaios que aplica esforços crescentes na sua direção axial (PADILHA, 2000).

Quando um corpo de prova é submetido ao ensaio de tração, a máquina fornece um gráfico de tensão-deformação mostrando as relações entre a força aplicada e as deformações ocorridas no decorrer do ensaio (BRANDÃO, 2015).

Os principais parâmetros analisados no ensaio de tração são: resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade. A resistência à tração é analisada pela carga aplicada por unidade de área no momento de ruptura, o alongamento representa aumento percentual do comprimento da peça sob tração no momento de ruptura, o módulo de elasticidade é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do limite elástico, em que a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão (BRANDÃO, 2015).

De acordo com Padilha (2000) a tensão de engenharia é definida como:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Onde:

σ = Tensão;

F = Força;

A_0 = Área inicial da secção transversal do corpo de prova.

E a deformação é definida por:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (2)$$

Onde:

ε = Deformação.

l_i = comprimento instantâneo.

l_0 = Comprimento original.

2.8 Difração de Raios – X

As análises por difração de raios – X dividem-se em duas técnicas, sendo uma que fornece informações sobre o material como EPMA, PIXE e outra que analisa a resposta do material por meio de raios – X como XPS, XRD (LIMA, 2006).

O equipamento utilizado nesta análise é constituído por sistemas de geração de raios, filtros, fendas e um sistema de detecção, a geração de raios ocorre nos tubos de raios – X, os feixes gerados são colimados por filtros e fendas que incidem sobre a amostra (SHIMIZU, 2012).

Os minerais são identificados por meio de comparações entre o difratograma coletado com fichas catalogadas de minerais presentes em banco de dados, a qualidade da análise depende da resolução do difratograma, parâmetros de coleta, preparação da amostra e de características intrínsecas do material em análise (SHIMIZU, 2012).

A análise por difração de raios – X apresentam diversas vantagens como simplicidade e rapidez, confiabilidade dos resultados, possibilidade de análise de materiais compostos por misturas de fases e análises quantitativas de fases (ALBERS *et al.*, 2002).

2.9 Fractografia

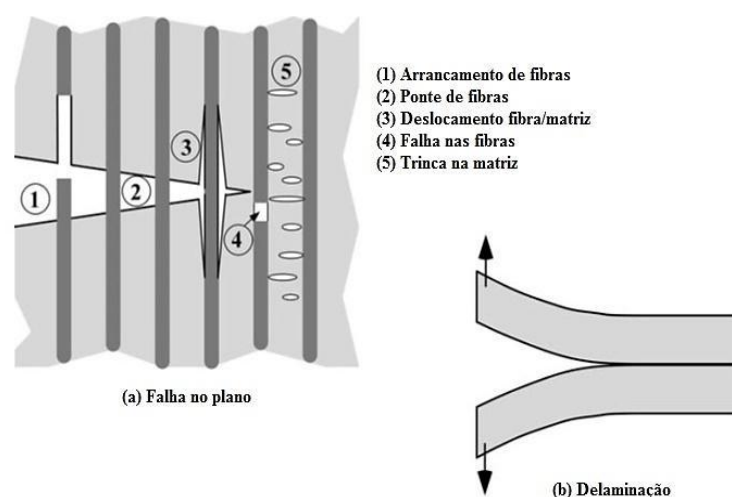
A fractografia é um dos métodos mais utilizados em análises de falhas e avaliações de propriedades de materiais. A análise é realizada por meio de diferentes técnicas como: observação visual, óptica macroscópica, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e, em alguns casos microscopia eletrônica de transmissão (MERSON *et al.*, 2016; REZENDE, 2007).

Normalmente a fratura consiste na separação de um corpo em duas ou mais partes em resposta a uma tensão de natureza estática ou dinâmica, podendo ser de tração, cisalhamento, torção ou impacto (OLIVEIRA, 2017).

Em compósitos as falhas podem ser descritas através de mecanismos de danos podendo ser identificados por quebras de fibras, trinca da matriz, delaminação interlaminar, deformidade dos materiais constituintes, além de defeitos no processo de fabricação (REZENDE, 2007; CÂNDIDO *et al.*, 2014).

Em compósitos fibrosos a fratura tende a ser progressiva e raramente catastrófica, com falhas subcríticas dispersas pelo material. A região de fratura é a principal fonte de referência para determinar as causas que originaram as falhas, os danos encontram-se diretamente relacionadas com a orientação das fibras e com a direção que se aplica a carga (SILVA, 2003; REZENDE, 2007). A Figura 7 mostra os mecanismos de falhas de um compósito fibroso.

Figura 7 – Mecanismos de falhas em compósitos fibrosos.



Fonte: Anderson (2005).

A análise deve atentar não somente para identificar e documentar a morfologia da falha, mas, também para fornecer informações que contribua com a determinação das causas de falha (REZENDE, 2007).

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados neste trabalho encontram-se listados a seguir:

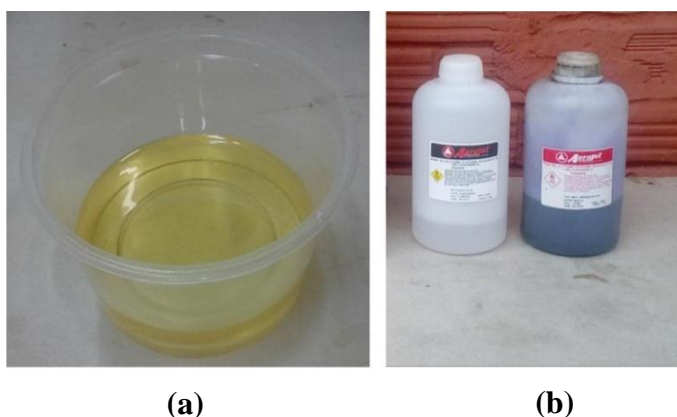
- **ESTUFA, DE LEO** - Equipamentos Laboratoriais, T 50°C a 250° C. Urano Brasil;
- **BALANÇA ANÁLITICA**, Urano Brasil;
- **PRENSA HIDRÁULICA**, MARCON, modelo MPH-15, com capacidade de 15 Ton;
- **MOLDE METÁLICO**, Dimensões (320 mm x 172,5 mm x 5 mm);
- **MAQUINA DE CORTE**, DeWALT, modelo DW860B;
- **MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS**, KRATOS, modelo IKCL3;
- **MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA**, HITACHI, modelo TM 3000, Brasil.

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Materiais sintéticos

Os materiais sintéticos utilizados para elaboração da matriz foram adquiridos na empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA. A resina poliéster Isoflática apresentou baixa viscosidade, média reatividade, coloração amarelada, ausência de promotor de reticulação e boa resistência química. O acelerador de Cobalto foi o produto comercial denominado CAT MET UMEDECIDO 1,5 % (Solução de Octoato de cobalto 1,5 %). Como catalisador utilizou o produto comercial BUTANOX M-50 marca de AEROJET (Peróxido de metil etil cetona [MEK-P]). A Figura 8, a seguir, ilustra os materiais sintéticos, onde, (a) mostra a resina, (b) o catalisador e o acelerador.

Figura 8 – Materiais sintéticos



Fonte: Autoria Própria (2019).

3.2.2 Resíduo industrial (lama vermelha)

O resíduo utilizado foi fornecido pela empresa Hydro Alunorte localizada no município da cidade de Barcarena-Pa. O resíduo foi armazenado em containers e cobertos para evitar possíveis vazamentos. A Figura 9 mostra o resíduo armazenado antes de passar por etapas de cominuição e caracterização.

Figura 9 – Resíduo (lama vermelha)



Fonte: Autoria Própria (2019).

3.2.3 Fibras de bambu

Os colmos de bambu utilizados para a extração das fibras foram coletados no bosque universitário localizado no campus profissional I (um) da Universidade Federal do Pará, a Figura 10 mostra o bambuzal de onde foram coletados os colmos para obtenção das fibras.

Figura 10 – Bambu utilizado para extraí as fibras.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.3 Procedimentos experimentais

3.3.1 Resíduo (Lama Vermelha)

A lama vermelha foi submetida às etapas de fragmentações no moinho de bolas seguido pelo processo de secagem, onde, a mesma foi colocada na estufa a 120 °C durante um período de 48 horas. Após, o material foi peneirado manualmente em peneiras de 100 mesh. O produto passante foi utilizado para confeccionar os compósitos. A Figura 11 mostra a lama vermelha utilizada.

Figura 11 – Lama vermelha utilizada na confecção dos compósitos.



Fonte: Autoria Própria (2019).

3.3.2 Difração de Raios – X

A lama vermelha foi caracterizada por meio da Difração de Raios – X (DRX) com o objetivo de determinar sua composição mineralógica.

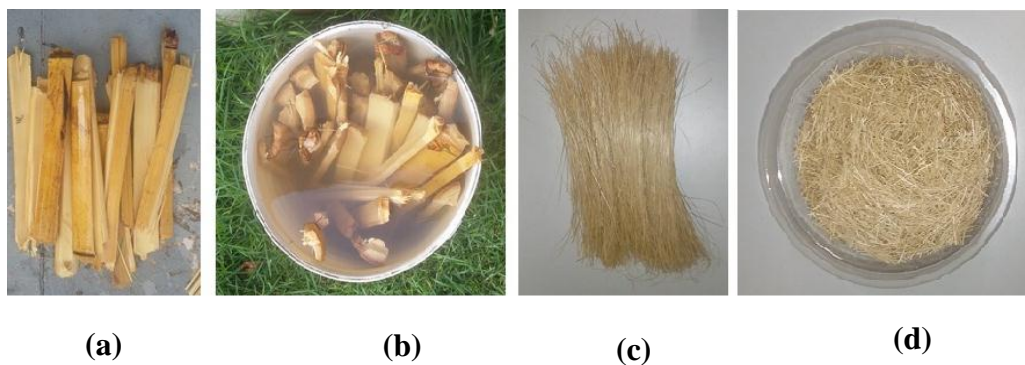
Na análise, utilizou-se um difratômetro de Raios – X: D8 Advance da Bruker, com tubo de Raios – X de ânodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$). Foi utilizado filtro $K\beta$ de Ni. Foram utilizadas as seguintes condições instrumentais: varredura de 5° a 75° 2 θ , voltagem: 40 kv, corrente 40 mA, tamanho do passo: 0,02° 2 θ e tempo/passos 5s.

A aquisição dos dados foi realizada com software X Pert Data collector, versão 3.0 d, o tratamento dos dados com software X Pert High Score Plus, versão 3.0 e, da PAnalytical consultando o banco de dados PDF (Power Diffraction File) do ICDD (International Center for Diffraction Data).

3.3.3 Extração das fibras

Na primeira etapa realizou-se os cortes do bambu (*Bambusa vulgaris*), seguido pelos cortes nos entrenós, em seguida os colmos foram fatiados e colocados submersos em água para facilitar a extração das fibras. O procedimento aplicado na extração foi o método manual, as etapas descritas podem ser observadas na Figura 12, onde: (a) mostra os colmos fatiados, (b) colmos submersos (c) fibras extraídas, (d) fibras cortadas nos comprimentos de 15 mm.

Figura 12 – Etapas de obtenção das fibras.



Fonte: Autoria Própria (2019).

3.3.4 Tratamento químico nas fibras

As fibras ficaram submersas em água destilada durante 24 horas, posteriormente foram adicionadas em um recipiente juntamente com uma solução alcalina com concentração de 5 % v/v de hidróxido de sódio (NaOH) onde, permaneceram durante 2 horas, após, foram retiradas, lavadas com água destilada e secas. As fibras após o tratamento químico encontram-se ilustradas na Figura 13.

Figura 13 – Fibras de Bambu tratadas quimicamente.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.3.5 Determinação de componentes da mistura para confecção dos compósitos

A quantidade de cada componente utilizado para confeccionar as placas dos compósitos pode ser observada nas Tabelas 2 e 3.

A Tabela 2 mostra a quantidade de cada componente utilizado na confecção do material compósito com incorporação de lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 %.

Tabela 2 – proporção de componentes dos compósitos com incorporação de resíduo.

Resíduo (LV %)	Resina (g)	Resíduo (LV) (g)	Promotor (1,5 %) (ml)	Catalisador (1 %) (ml)
10	285,66	31,74	3,726	2,484
20	253,92	63,48	3,312	2,208
30	222,18	95,22	2,898	1,932
40	190,44	126,96	2,484	1,658

Fonte: Autoria Própria (2019).

A Tabela 3 apresenta a quantidade dos componentes utilizados na confecção do material compósito híbrido com incorporação de lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % e 3 % de fibras de bambu tratadas quimicamente e não tratadas.

Tabela 3 – proporção de componentes dos compósitos híbridos

Resíduo (LV %)	Resina (g)	Fibra (g)	Resíduo (LV) (g)	Promotor (1,5 %) (ml)	Catalisador (1 %) (ml)
10	276,138	9,522	31,74	3,6018	2,4012
20	244,398	9,522	63,48	3,1878	2,1252
30	212,658	9,522	95,22	2,7738	1,8492
40	180,918	9,522	126,96	2,3598	1,5732

Fonte: Autoria própria (2019).

3.3.6 Etapas de produção dos compósitos

O método aplicado na produção dos compósitos foi o método manual (*hand lay-up*), as etapas de fabricação das placas dos compósitos com incorporação de resíduo nas proporções

de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % e compósitos híbridos (Fibras/Resíduo) de proporção de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % de resíduo com inserção de 3 % de fibras de bambu (*Bambusa vulgaris*) tratadas quimicamente e não tratadas foram:

- a) Aplicação de desmoldante no molde metálico para facilitar a remoção da placa após a prensagem;
- b) Determinação da massa da lama vermelha, das fibras e da resina seguido pela determinação do volume do acelerador de cobalto e do catalisador;
- c) Posteriormente, colocou-se as fibras e o resíduo durante 15 minutos na estufa a 105 °C para retirada da umidade;
- d) Após, as fibras foram distribuídas aleatoriamente no molde metálico. Em um recipiente misturou-se a resina poliéster isoftálica, o acelerador de cobalto, o catalisador e o resíduo. Despejou-se a mistura no molde metálico e prensou com uma carga de 25 kN durante 20 minutos;
- e) Após o desmolde o material ficou em processo de cura durante 24 horas. Com as placas confeccionadas, realizou-se os cortes com o auxílio da máquina de corte para obtenção das dimensões específicas para o ensaio de tração.

Para o trabalho completo foram produzidos um total de 24 placas, das quais os corpos de prova foram fabricados. As quantidades de placas produzidas nas devidas proporções juntamente com seus respectivos corpos de provas encontram-se na Tabela 4.

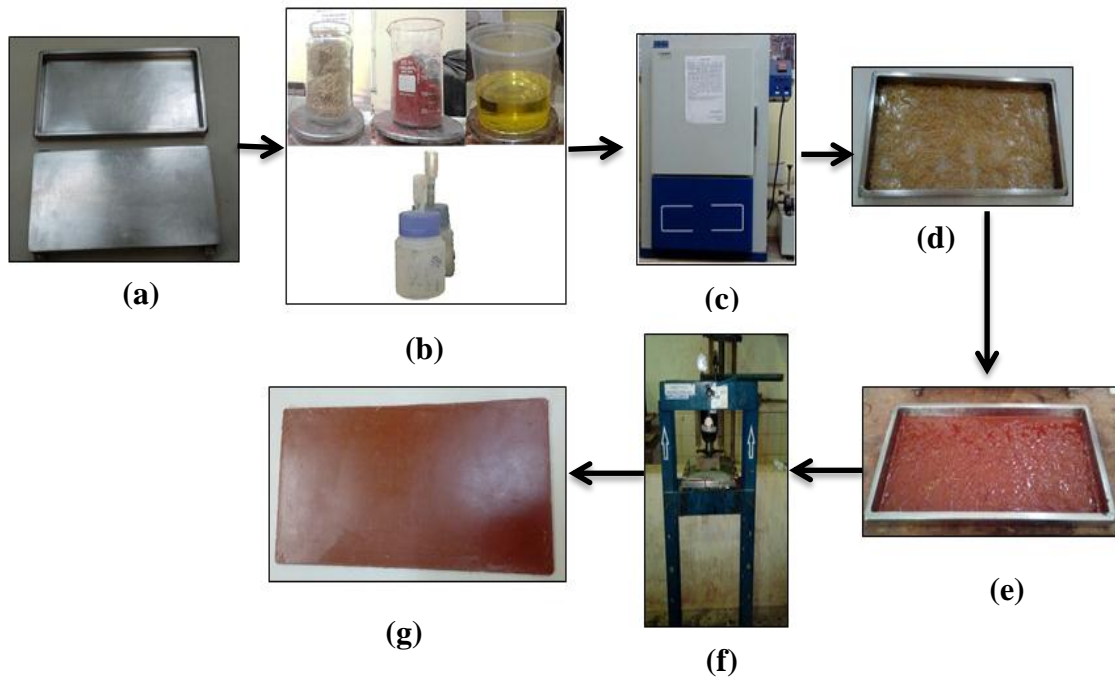
Tabela 4 – Quantidade de placas e corpos de prova produzidos.

Composição	Proporção (%)	Quantidade de placas	Total de corpos de prova
Matriz +	LV 10%	2	10
Resíduo industrial (lama vermelha)	LV 20%	2	10
	LV 30%	2	10
	LV 40%	2	10
Matriz +	LV 10% + FBNT 3%	2	10
Lama Vermelha + fibras de bambu 15 mm Não tratadas	L.V 20% + FBNT 3%	2	10
	L.V 30% + FBNT 3%	2	10
	L.V 40% + FBNT 3%	2	10
Matriz +	L.V 10% + FBT3%	2	10
Lama Vermelha + fibras de bambu 15 mm tratadas	L.V 20% + FBT3%	2	10
	L.V 30% + FBT3%	2	10
	L.V 40% + FBT3%	2	10
Total		24	120

Fonte: Autoria Própria (2019)

A Figura 14 mostra as etapas de confecção dos compósitos, onde, (a) mostra o molde metálico após a aplicação do desmoldante, (b) determinação das massas das fibras, do resíduo (lama vermelha), da resina e a determinação dos volumes do acelerador de cobalto e do catalisador, (c) estufa utilizada para retirada de umidade da fibra e do resíduo, (d) fibras distribuídas aleatoriamente no molde metálico, (e) processo inicial de cura, (f) prensagem do material na prensa hidráulica e (g) placas após o processo de cura.

Figura 14 – Etapas de fabricação dos compósitos.

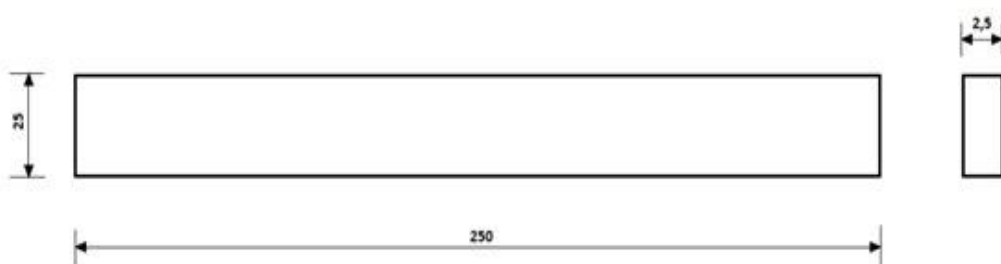


Fonte: Autoria Própria (2019).

3.3.7 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado conforme a norma ASTM D3039, os corpos de prova para o ensaio adotaram as seguintes dimensões, conforme demonstrado na Figura 15.

Figura 15 – Dimensão em mm dos corpos de prova para ensaio de tração.

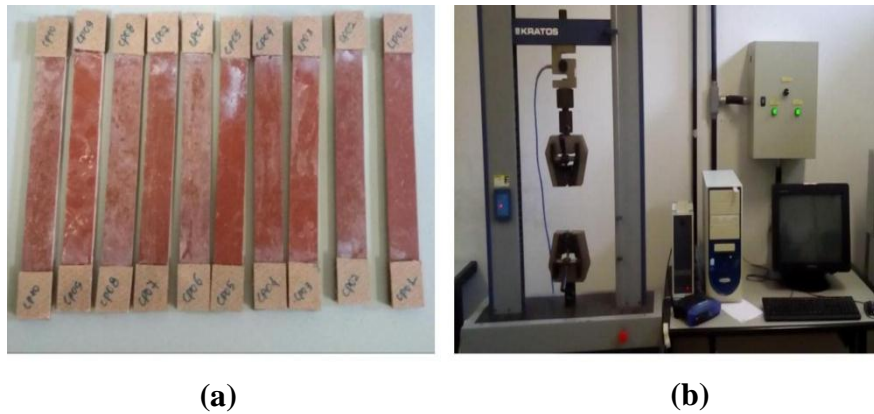


Fonte: ASTM D3039 (2005).

O ensaio foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA, foi utilizada uma máquina universal de ensaios, marca KRATOS modelo IKCL3 com sistema de aquisição de dados, com célula de carga de 5 (cinco) kN, adotando velocidade de 2 mm/min com comprimento útil para medição entre

garras de 180 mm. A Figura 16 (a) mostra os corpos de prova e 16 (b) a máquina utilizada no ensaio.

Figura 16 – Corpos de provas e máquina utilizada no ensaio.

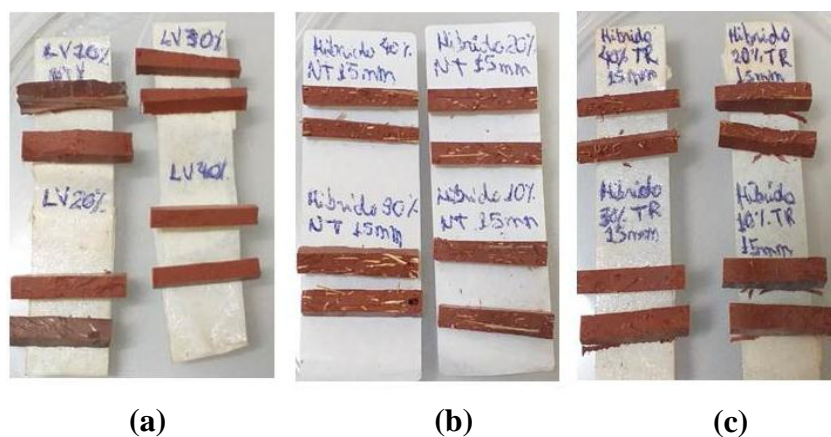


Fonte: Autoria Própria (2019).

3.3.8 Fractografia

A análise fractográfica foi realizada no material com a finalidade de detectar possíveis mecanismos de falhas, para isso, coletou uma amostra de cada série fabricada conforme ilustrado na Figura 17. Onde: (a) mostra as amostras dos compósitos com incorporação de resíduo, (b) amostras de compósitos híbridos com inserção de fibras não tratadas e (c) amostras de compósitos híbridos com fibras tratadas quimicamente.

Figura 17 – Amostras coletadas para análise microscópica.



Fonte: Autoria Própria (2019).

As amostras foram coletadas de forma criteriosa levando em consideração as superfícies fraturadas que não havia perdas do material, corpos de provas que não haviam

sofrido fraturas próximas aos tabs e que não continham poeiras ou quaisquer outros agentes que pudesse interferir na análise. Após a coleta, as amostras foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura marca HITACHI, modelo TM 3000, Brasil do laboratório de microscopia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA) da Universidade Federal do Pará. O microscópio eletrônico de varredura utilizado na análise é mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Aatoria Própria (2019).

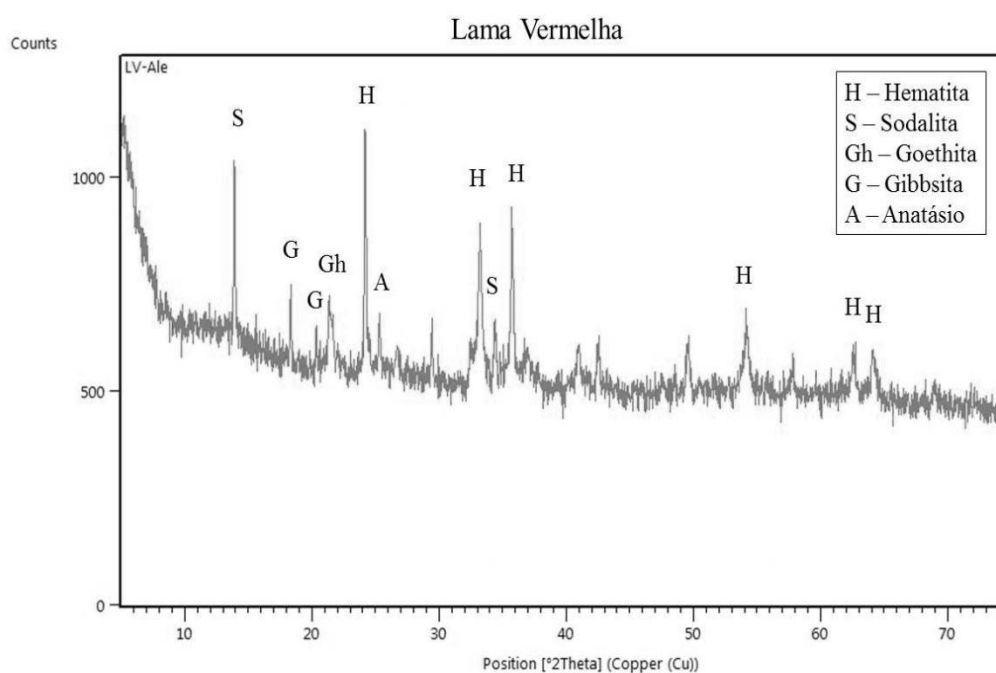
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da lama vermelha

4.1.1 Difração de Raios – X

A lama vermelha foi caracterizada por meio da Difração de Raios-X e os resultados encontram-se na Figura 19. Onde, os maiores picos referem-se a maiores concentrações mineralógicas, conforme ilustrados em suas fichas em PDF, como Hematita (H) – PDF 96-900-9783, Sodalita (S) – PDF 96-900-5054, Goethita (Gh) – PDF 96-900-2159, Gibbsita (G) – PDF 96-101-1082 e Anatásio (A) - PDF 96-900-8215. Minerais estes já observados em estudos anteriores realizados por Costa (2016); Antunes *et al.* (2011) e Souza (2010).

Figura 19 – Composição mineralógica da lama vermelha



Fonte: Autoria Própria (2019).

4.2 Ensaio de resistência à tração

4.2.1 Compósitos com incorporação de lama vermelha

A resistência dos materiais compósitos com incorporação de lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % foram analisadas através do ensaio de tração e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados obtidos no ensaio de tração dos compósitos incorporados com lama vermelha.

Tipos de amostras	Proporção de Carga (%)	Resist. Tração Média (MPa) (Desv. Padrão)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Plena	0	24,24 (\pm 2,38)	4,08	1,03
Resíduo industrial (lama vermelha)	10	33,00 (\pm 5,05)	4,50	1,35
	20	36,63 (\pm 1, 91)	5,27	1,42
	30	32,27 (\pm 2,02)	4,89	1,26
	40	29,01 (\pm 1,94)	4,25	1,36

Fonte: Autoria Própria (2019).

Os resultados do ensaio de tração mostram que houve um aumento na resistência à tração do compósito de proporção de 10 % de lama vermelha para a proporção 20 %, seguindo a análise, notou-se uma progressiva diminuição no limite de resistência dos compósitos à medida que aumentou a proporção da carga mineral na matriz. As diminuições na resistência com o aumento da carga mineral podem ser justificadas por surgimentos de falhas, defeitos oriundos dos processos de fabricação, ou até mesmo, devido o resíduo se comportar como a matriz.

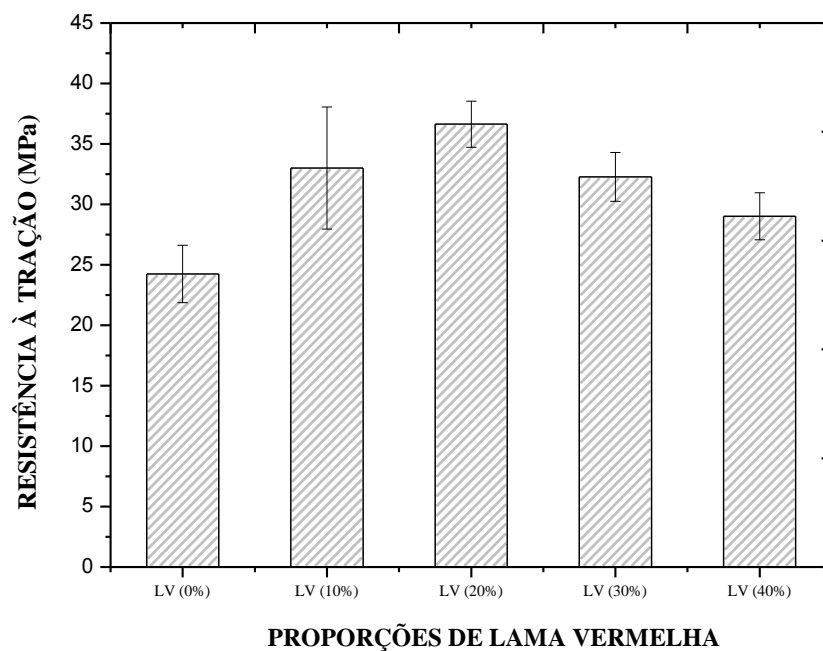
Os compósitos com incorporação de lama vermelha estudados neste trabalho apresentaram limites de resistência à tração e módulos de elasticidade superiores em relação à matriz poliéster plena estudada por Barbosa (2018) a qual, apresentou um limite de 24,24 MPa. As melhores propriedades apresentadas em relação à matriz plena podem ser justificadas por uma boa impregnação entre o resíduo e a matriz, técnicas aplicadas na fabricação dos compósitos, dentre outros fatores. Os melhores resultados em relação à matriz plena mostram que a lama vermelha funcionou como agente de reforço, atribuindo boas propriedades aos compósitos.

Os materiais compósitos incorporados com lama vermelha deste trabalho apresentaram limites de resistência à tração e o módulos de elasticidades superiores em relação aos compósitos de matriz poliéster incorporados com lama vermelha estudados por Costa (2016).

A Figura 20 mostra o gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos com incorporação de lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % quanto as

suas resistências à tração. Ao observar a imagem pode-se notar que o material que apresentou melhor limite médio de resistência à tração foi o compósito com proporção de 20 % de resíduo. Na imagem é possível observar também, que todos os compósitos com lama vermelha em sua composição apresentaram melhores desempenhos mecânicos do que matriz plena.

Figura 20 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos com incorporação de lama vermelha.



Fonte: Autoria Própria (2019).

A Tabela 6 apresenta um resumo dos melhores limites de resistência à tração de diversos compósitos de matrizes poliméricas com incorporação de resíduos minerais encontrados nas literaturas pesquisadas. Na tabela pode-se observar que o melhor limite médio de resistência à tração do compósito incorporado com lama vermelha deste trabalho foi superior a dos compósitos analisados por Barbosa (2018), El Banna (2017) e Costa (2016). E, inferior a dos compósitos estudados por Santos (2018) e Borges (2018).

Tabela 6 – Resistência à tração de compósitos poliméricos incorporados com resíduo.

LITERATURA	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa) DESVIO PADRÃO
Poliéster/Lama Vermelha (20 %) (Neste Trabalho)	36,63 (\pm 1,91)
Poliéster/Caulim (20 %) (SANTOS, 2018)	37,05 (\pm 4,53)
Poliéster/Caulim Flint (30 %) (BARBOSA, 2018)	31,44 (\pm 4,39)
Poliéster/Cobre (40 %) (BORGES, 2018)	40,25(\pm 1,88)
Poliéster/Cobre (30 %) (EL BANNA, 2017).	34,31 (\pm 1,86)
Poliéster/Caulim (10 %) (COSTA, 2016)	23,83 (\pm 1,13)
Poliéster/Lama Vermelha (10 %) (COSTA, 2016)	24, 85(\pm 1,22)

Fonte: Elaboração a partir de autores citados.

4.2.2 Compósitos híbridos de fibras não tratadas e lama vermelha

Os compósitos híbridos compostos por 3 % de fibras de bambu não tratadas quimicamente com solução de hidróxido de sódio (NaOH) e lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % foram analisados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração e os resultados encontram-se na Tabela 6.

Tabela 7 – Comportamento de resistência dos compósitos híbridos com inserção de fibras de bambu NT.

Tipos de amostras	Proporção de Resíduo (%) + Fibras (%) NT	Resist. Tração Média (MPa) (Desv. Padrão)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Plena	0	24,24 (\pm 2,38)	4,08	1,03
Compósitos Híbridos com inserção de Fibras NT	LV 10 + F 3	36,25 (\pm 2,48)	4,72	1,44
	LV 20 + F 3	35,17 (\pm 4, 28)	4,66	1,44
	LV 30 + F 3	28,48 (\pm 1,12)	4,71	1,55
	LV 40 + F 3	26,46 (\pm 4,40)	4,86	1,20

Fonte: Autoria Própria (2019).

Os resultados do ensaio de tração mostram uma diminuição gradativa na resistência à tração dos compósitos híbridos com inserção de 3 % de fibras de bambu não tratadas e lama vermelha nas proporções 10 %, 20 %, 30 % e 40 % à medida que aumentava a proporção de resíduo na matriz. Essa diminuição pode ser justificada por surgimentos de falhas originadas por possíveis dificuldades de adesão entre os componentes durante o processo de fabricação ou devido ao excesso de componentes utilizados. Porém, todos os compósitos híbridos estudados neste trabalho apresentaram resistência à tração bem como módulos de elasticidades superiores em relação à matriz poliéster plena estudada por Barbosa (2018).

Os melhores resultados do compósito híbrido em relação à matriz plena mostram que à lama vermelha e as fibras funcionaram como agentes de reforços, conferindo boas propriedades mecânicas ao material fabricado.

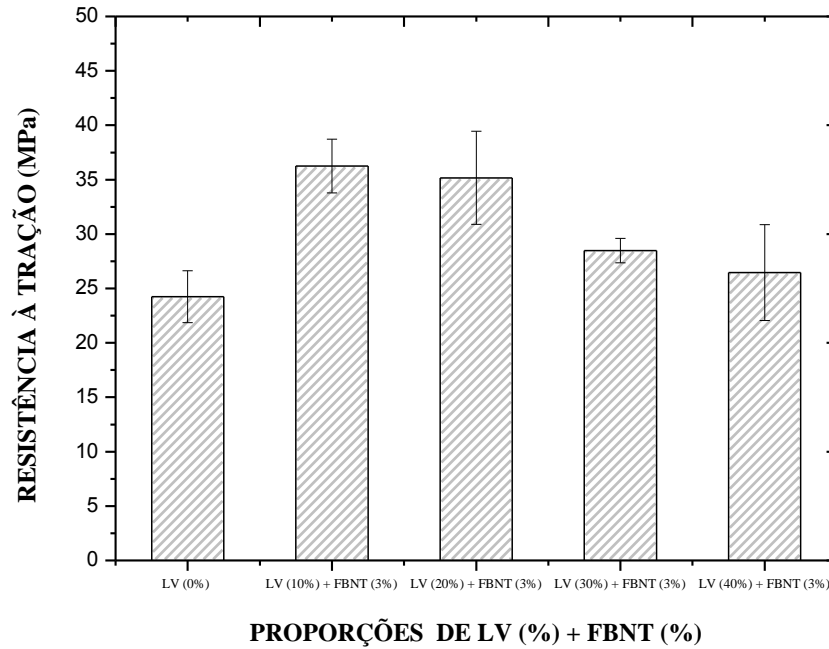
Os compósitos híbridos de fibras de bambu não tratadas e lama vermelha estudados neste trabalho apresentaram limites de resistência à tração inferiores nas proporções 3 %/10 % e 3 %/30 % e superior na proporção 3 %/20 % em relação aos compósitos híbridos de fibras de bambu 15 mm não tratadas e resíduo de cobre estudados por Borges (2018).

Os materiais compósitos híbridos deste trabalho apresentaram resistência à tração superior em relação aos compósitos híbridos de 3 % de fibras de bambu não tratadas e caulim flint estudado por Barbosa (2018).

A Figura 21 mostra o gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos híbridos nas proporções de 3 %/10 %, 3 %/20 %, 3 %/ 30 % e 3 %/40 % (Fibra/Resíduo)

quanto as suas resistências à tração. Na imagem pode-se observar que à proporção que apresentou melhor resistência à tração média foi a de 3 % de fibra com 10 % de lama vermelha.

Figura 21 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos híbridos (Fibras/Resíduo).



Fonte: Autoria Própria (2019).

A Tabela 8 mostra um resumo dos resultados encontrados na literatura pesquisada, onde ilustra os melhores limites de resistência à tração de compósitos híbridos com incorporação de resíduos industriais e fibras naturais de 15 mm *in natura*. Ao analisar a tabela pode-se observar que o material compósito híbrido de lama vermelha e fibras de bambu deste trabalho apresentou um bom limite de resistência à tração.

Tabela 8 – Resistência à tração de compósitos híbridos de fibras *in natura* e resíduos.

LITERATURA	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa) DESVIO PADRÃO
Poliéster/Bambu (3 % NT)/LV (10 %) (NESTE TRABALHO)	36,25 (± 2,48)
Poliéster/Bambu (3 % NT)/Caulim (30 %) (SANTOS, 2018)	28,54 (± 4,72)
Poliéster/Bambu (3 % NT)/Caulim Flint (20 %) (BARBOSA, 2018)	24,47 (± 9,89)
Poliéster/Bambu (3 % NT)/Cobre (10 %) (BORGES, 2018)	37,94 (± 1,82)
Poliéster/Sisal (5 % NT)/L V (10 %) COSTA (2016)	50,25 (±1,50)
Poliéster/Malva (5 % NT)/L V (10 %) (COSTA, 2016)	52,35 (±2,6)
Poliéster/Juta (5 % NT)/LV (10 %) (COSTA, 2016)	55,32 (±2,1)

Fonte: Elaboração a partir de autores citados.

4.2.3 Compósito híbrido com fibras tratadas quimicamente e lama vermelha

Os compósitos híbridos com inserção de 3 % de fibras curtas de bambu tratadas quimicamente com solução de hidróxido de sódio (NaOH) e lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % foram analisados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração e os resultados encontram-se na Tabela 7.

Tabela 9 – Resultado dos ensaios de tração realizados no material compósito híbrido com fibras tratadas.

Tipos de amostras	Proporção de Resíduo (%) + Fibras (%) TR	Resist. Tração Média (MPa) (Desv. Padrão)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Plena	0	24,24 (\pm 2,38)	4,08	1,03
Compósitos	LV 10 + F 3	35,30 (\pm 3,22)	5,35	1,48
Híbridos com	LV 20 + F 3	30,91 (\pm 3,36)	4,97	1,28
inserção de	LV 30 + F 3	30,53 (\pm 1,50)	5,11	1,28
Fibras TR	LV 40 + F 3	25,73 (\pm 1,60)	4,64	1,12

Fonte: Autoria Própria (2019).

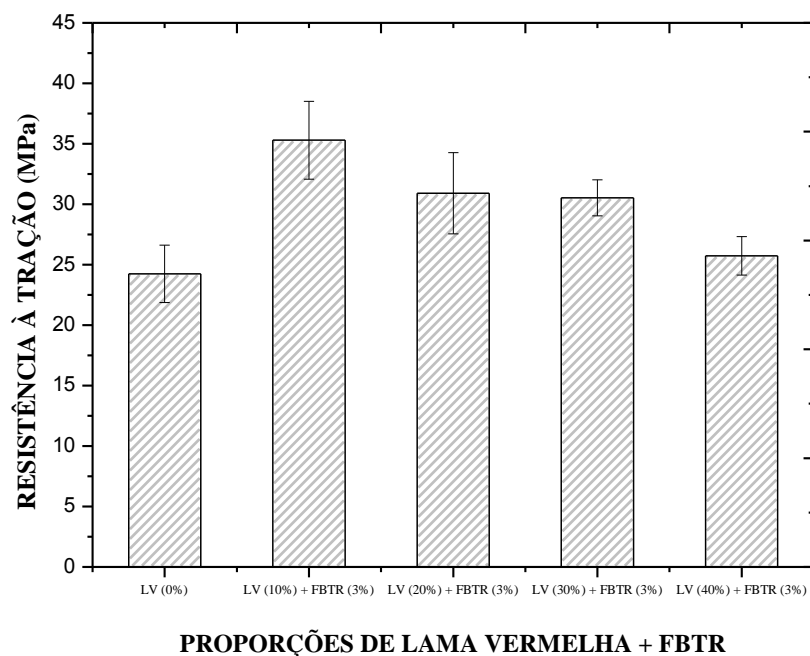
Os resultados do ensaio de tração dos compósitos híbridos com inserção de 3 % de fibras de bambu nos comprimentos de 15 mm tratadas com solução de hidróxido de sódio (NaOH) e lama vermelha mostram uma diminuição de resistência à medida que aumenta a proporção de resíduo na matriz, efeito este já observado anteriormente nos compósitos híbridos de lama vermelha e fibras de bambu não tratadas. Os resultados mostram que os compósitos híbridos apresentaram melhores desempenhos mecânicos de tração e de módulos de elasticidades do que à matriz poliéster plena estudada por Barbosa (2018).

Os resultados mostram ainda que o tratamento químico não acrescentou melhorias nas propriedades mecânicas de tração, uma vez que os compósitos híbridos de fibras tratadas e lama vermelha demonstraram comportamentos similares aos compósitos híbridos de lama vermelha e fibras não tratadas.

Os compósitos híbridos de fibras tratadas e lama vermelha estudados neste trabalho apresentaram resistência à tração superior em relação aos compósitos híbridos de fibras de bambu 15 mm e resíduo de cobre estudado por Borges (2018). E, resistência inferior em relação aos compósitos híbridos de fibras de bambu 15 mm tratadas e resíduo de caulim estudado por Santos (2018).

A Figura 22 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos híbridos com 3 % de fibras de bambu tratadas e lama vermelha quanto as suas resistências à tração média. Na figura nota-se que à proporção que suportou mais força foi de 3 %/10 % (Fibra/Resíduo).

Figura 22 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos híbridos (FBT/Resíduo).



Fonte: Autoria Própria (2019).

A Tabela 10 apresenta um resumo dos melhores limites de resistência à tração de compósitos híbridos de fibras naturais 15 mm tratadas quimicamente e resíduos encontrados na literatura pesquisada. Ao analisar a tabela pode-se observar que o compósito híbrido deste trabalho apresentou um bom desempenho mecânico de tração.

Tabela 10 – Resistência à tração de compósitos híbridos com fibras tratadas.

LITERATURA	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa) DESVIO PADRÃO
Poliéster/Bambu (3 % T)/LV (10 %) (NESTE TRABALHO)	35,30 (± 3,22)
Poliéster/Bambu (3 % T)/Cobre (20 %) (BORGES, 2018)	34,46 (± 2,21)
Poliéster/Bambu (3 % T)/Caulim (20 %) SANTOS (2018)	41,07 (± 2,33)

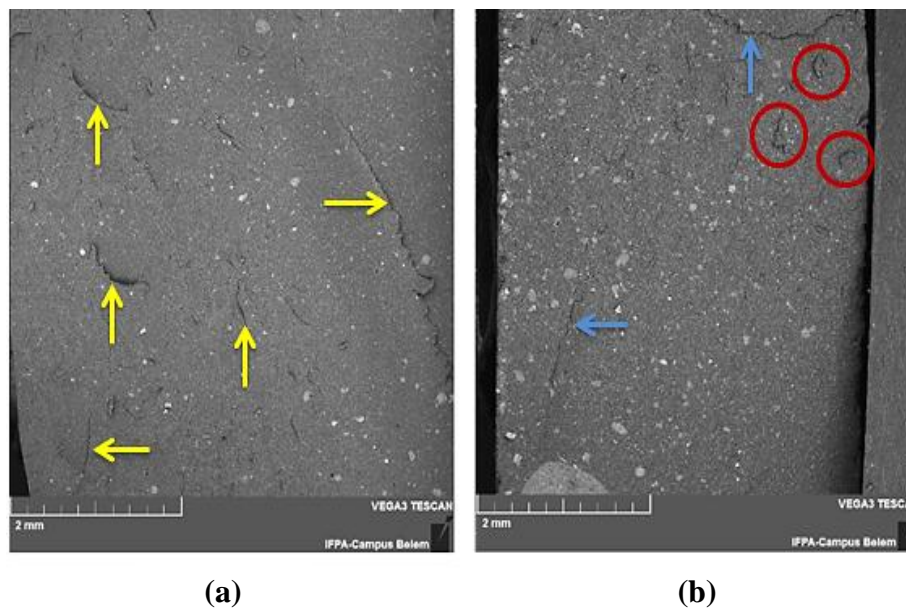
Fonte: Elaboração a partir de autores citados.

4.3 Fractografia

4.3.1 Compósito com incorporação de lama vermelha

A Figura 23 mostra o resultado da análise fractográfica realizada por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas superfícies de fraturas após o ensaio de tração dos compósitos com incorporação de lama vermelha nas proporções de 10 % e 20 % de resíduo.

Figura 23 – Análise microscópica dos compósitos incorporados com lama vermelha.



Fonte: Autoria Própria (2019).

A análise fractográfica por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no material compósito com incorporação de 10 % e 20 % de lama vermelha. Na análise foi possível observar os principais mecanismos de falhas que ocorreram nos compósitos incorporados com lama vermelha, dentre eles, trincas e aglomerados.

O resultado da análise microscópica do compósito com incorporação de 10 % de lama vermelha é mostrado na Figura 23 (a), onde, mostra presença de trincas (setas amarelas) e irradiação de trincas. A Figura 23 (b) mostra a análise realizada no material com 20 % de resíduo, onde, mostra (setas azuis) presença de trincas, e aglomerados (círculos vermelhos). Os aglomerados surgem devido ao processo de homogeneização entre o sistema resíduo/matriz, podendo originar pontos de tensões que influem negativamente no desempenho mecânico dos compósitos.

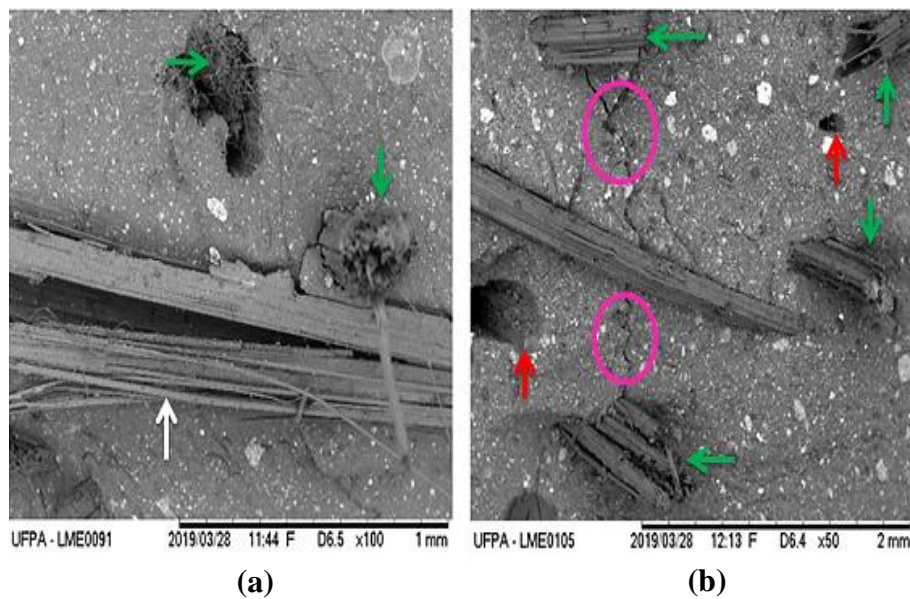
Nas duas imagens é possível observar que houve uma boa dispersão do resíduo por toda matriz polimérica, o que pode ter ocorrido devido uma boa interação do resíduo com a matriz, acompanhado de uma boa homogeneização e compactação dos compósitos.

Costa (2016) ao analisar microscopicamente compósitos de poliéster e lama vermelha observou mecanismos como porosidades, vazios e microcavidades, o que conforme o autor contribui para uma diminuição na resistência dos compósitos.

4.3.2 Compósitos híbridos de fibras não tratadas e lama vermelha

A Figura 24 mostra os resultados da análise fractográfica realizadas nos compósitos híbridos reforçados com 3 % fibras de bambu não tratadas quimicamente e resíduo de lama vermelha nas proporções de 10 % e 20 %.

Figura 24 – Análise microscópica dos compósitos híbridos com FBNT e LV.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Os resultados da análise fractográfica por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostram que o material apresentou mecanismos de falhas como: fibras arrancadas (*pull-out*), fibras rompidas, trincas na matriz, descolamento e desfibrilamento de fibras.

Na Figura 24 (a) mostra a superfície de fratura do material compósito híbrido na proporção de 3 %/10 % (Fibra/Resíduo), onde, mostram presenças de mecanismos de fibras rompidas (setas verdes), mecanismos estes que demonstram que houve uma boa adesão na interface fibra/matriz/resíduo resultando em melhorias de resistência à tração. Outro mecanismo de falha observado na Figura 24 (a) é a presença de descolamento e

desfibrilamento de fibra (seta branca), pode-se citar também a presença de fibra disposta transversalmente na direção de aplicação da força, o que pode depreciar a resistência do compósito.

A Figura 24 (b) mostra a superfície fraturada do material compósito híbrido composto por 3 %/20 % (Fibra/Resíduo), nesta imagem pode-se observar trincas (círculos rosas), fibras rompidas (setas verdes) e fibras arrancadas (*pull-out*) (setas vermelhas). O mecanismo de fibras arrancadas (*pull-out*) refere-se às fibras sendo sacadas da matriz, demonstrando que não houve uma boa adesão na interface fibras/matriz/resíduo, o que pode depreciar a resistência dos compósitos.

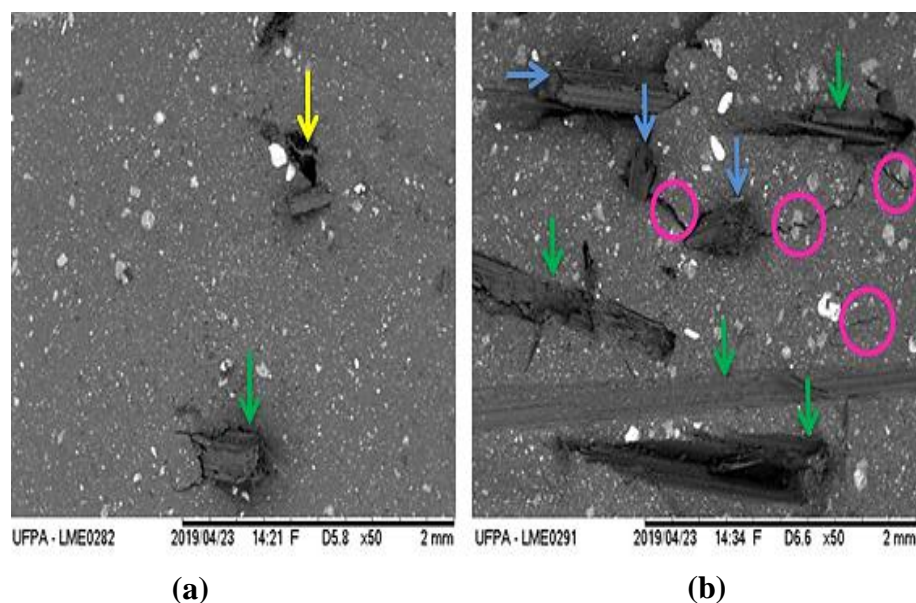
Em ambas as imagens pode-se observar uma boa homogeneização do resíduo na matriz. Na Figura 24 (b) pode-se observar uma maior predominância de fibras rompidas.

De acordo com Borges (2018), o mecanismo dominante de fibras rompidas indica uma boa adesão entre a fibra e a matriz, já a distribuição mais homogênea do resíduo na matriz provoca uma melhora positiva nas propriedades mecânicas.

4.3.3 Compósito híbrido com fibras tratadas quimicamente e lama vermelha

A Figura 25 mostra os resultados da análise microscópica dos compósitos híbridos com 3 % de fibras de bambu tratadas quimicamente e lama vermelha nas proporções 10 % e 20 %.

Figura 25 – Análise microscópica dos compósitos híbridos com FBT LV.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Ao analisar a superfície de fratura dos compósitos híbridos com 10 % e 20 % de resíduo e 3 % de fibras de bambu tratadas quimicamente observou-se diversos mecanismos como: descolamentos de fibras, fibras arrancadas (*pull-out*) e trincas na matriz.

A Figura 25 (a) mostra o resultado da análise por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizada no material compósito híbrido de 3 %/10 % (Fibra/Resíduo), na imagem mostra (seta amarela) presença de fibras arrancadas (*pull-out*) e mecanismo de fibra rompida (seta verde). O mecanismo de fibras arrancadas pode interferir negativamente no desempenho mecânico dos compósitos, já o mecanismo de rompimento de fibras demonstra que houve uma boa adesão entre os componentes envolvidos, conferindo melhorias na resistência à tração dos compósitos.

O resultado da análise microscópica realizada no material compósito híbrido de 3 % de fibras de bambu tratadas e 20 % de lama vermelha mostrado na Figura 25 (b) demonstra que o material apresentou descolamento, desfibrilamento e fibras dispostas transversalmente na direção de aplicação da força (setas verdes), fibras rompidas (setas azuis) e presença de trincas (círculos rosas). Conforme Barbosa (2018) o surgimento de trincas geram concentrações de tensões dentro do compósito, o que afeta negativamente o seu desempenho mecânico.

5 CONCLUSÃO

O método aplicado na confecção dos materiais compósitos com incorporação de lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % e compósitos híbridos com proporções 3 %/10 %, 3 %/ 20 %, 3 %/ 30 % e 3 %/ 40 % de fibra/resíduo mostrou-se adequado, uma vez que os compósitos fabricados demonstraram uma boa resistência mecânica quando analisados no ensaio de tração.

O material compósito incorporado com lama vermelha que apresentou melhor desempenho de resistência à tração foi o compósito com incorporação de 20 % de resíduo, com um limite de 36,63 MPa.

O compósitos híbrido com inserção de fibras de bambu 15 mm não tratadas e lama vermelha que apresentou melhor limite de resistência à tração foi de 36,25 MPa para a proporção de 3 %/10 % (Fibras/Resíduo).

Dentre os compósitos híbridos com fibras de bambu 15 mm tratadas quimicamente o melhor limite de resistência à tração foi de 35,30 MPa para a proporção de 3 %/10 % (Fibras/Resíduo).

Os compósitos híbridos reforçados com fibras tratadas demonstraram resistência à tração similares em relação ao material compósito híbrido com reforço de fibras não tratadas nas proporções de 3 %/10 % e 3 %/40 %, superior na proporção 3 %/30 % e inferior na proporção 3 %/20 % (Fibra/Resíduo).

As análises fractográficas realizadas nas morfologias das fraturas dos compósitos com incorporação de lama vermelha e dos compósitos híbridos mostraram-se eficazes, uma vez que por meio dela foi possível observar mecanismos predominantes como: trincas na matriz, fibras arrancadas (*pull-out*), descolamento e desfibrilamento de fibras e fibras rompidas.

De modo geral, pode-se dizer que a pesquisa proporcionou o desenvolvimento de um novo material, de baixo custo, com materiais de fontes naturais, além de contribuir com a preservação ambiental, uma vez que sugere uma alternativa para a reutilização de resíduos da indústria mineradora.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar as propriedades mecânicas dos compósitos por meio de outros ensaios, por exemplo: flexão e impacto;
- Utilizar outros tipos de resíduos como carga;
- Utilizar outros tipos de matrizes;
- Confeccionar materiais compósitos com inserção de fibras tratadas quimicamente e não tratadas em diferentes dimensões;
- Confeccionar materiais compósitos com outras proporções de fibras/resíduos.

REFERÊNCIAS

- ALBERS, A. P. F. *et al.* Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**, São Paulo, v. 48, n. 305, p. 34-37, 2002.
- ALMEIDA, N. M. B. G. de, **Estudo Estrutural de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras de Juta**. 2012. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Lisboa, 2012.
- ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: Fundamentals and Applications**. 3 ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T.; NAVARRO, G. R. B. Caracterização da lama vermelha brasileira (resíduo do refino da bauxita) e avaliação de suas propriedades para futuras aplicações. **3rd International Workshop Advances in Cleaner Production**, São Paulo, 2011.
- ANJOS, M. A. S. dos; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Compósitos à base de cimento reforçados com polpa celulósica de bambu. Parte II: Uso de resíduos cerâmicos na matriz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, V.7, n.2, p.346-349, 2003.
- ASTM D 3039 – 08, “**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic (Metric)**”. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, EUA, 2005
- 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.
- BARROS, A. R. F. **Compósitos híbridos: desenvolvimento de configuração e efeitos de umidificação**. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- BERALDO, A.L.; RIVERO, L.A. Bambu laminado colado (BLC). **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v.10, n.2, p. 36-46, 2003.
- BERALDO, A. L. *et al.* **Bambu características e aplicações**. Disponível em: https://bambubioartefato.files.wordpress.com/2014/07/1996-bambu_-_caracterc3adsticas-e-aplicac3a7c3b5es-a-beraldo-24pg.pdf. Acesso em 31 de maio de 2019.
- BEZERRA, A. F. C. **Desenvolvimento de compósito poliéster insaturado/ fibras vegetais (caroá e coco)**. 2014. 160f. Tese (Doutorado em ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, Campina Grande, 2014.
- BORGES, D. R. **Influência do uso de fibras de bambu (*Bambusa Vulgaris*) tratadas quimicamente em compósitos de polímero termofixo carregadas com resíduo da**

indústria de beneficiamento de minério de cobre. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

BRANDÃO, A. T. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar.** 2015. 55f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) - Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2015.

BRASKEM. **Glossário de termos aplicados a Polímeros.** Boletim Técnico, n. 08 PVC, 2002.

CALLISTER JR, W. D.; Rethwisch, William D. **Ciência e Tecnologia de Materiais: Uma Introdução.** Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CANDIDO, Geraldo Maurício *et al.* Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido ao ensaio de tenacidade à fratura interlaminar em Modo II. **Polímeros**, São Carlos, v. 24, n. 1, p. 65-71, 2014 .

CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiro.** São Paulo: Artliber, 2010.

CASARIL, A. *et al.* Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 408-419, 2007.

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. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2016.

DALPIAZ, G. **Estudo do efeito de cargas minerais em compósitos poliméricos particulados em matriz de polipropileno.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

EL BANNA, W. R. **Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (*musa sapientum, musacae*).** 2017. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

FONTES, R. S. **Compósito polimérico híbrido: comportamento mecânico, descontinuidade geométrica e resistência residual.** 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos materiais.** 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GARCÍA, G. O. **El bambú como agente de cambio la actualización de su aprovechamiento en la región da Bengala.** 102 f. Trabajo fin de grado (graduación) – Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2018.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.1, p.107-114, Mar. 2005.

GUIMARÃES JÚNIOR, M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 11(7), p. 442-456, 2010. Disponível em: <<http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/DIC10/guimaraes.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

GIACOMINI, N. P. **Compósitos Reforçados com Fibras para a Indústria Automobilística**. 2003. 197f. Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GOMES, M. A. **Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de folhas de abacaxizeiro (PALF)**. 2015. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2015.

HYDRO. Depósitos de resíduos sólidos. 2019. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/hydro-worldwide/south-america/brazil/barcarena/alunorte/deposito-de-residuos-solidos/> Acesso em: 10 de junho de 2019.

JESUS, M. S.; SOUSA, T. B.; MORI, F. A.; GUIMARÃES, B. M. R. Fibras vegetais com potencial para reforço de compósitos poliméricos analisados a partir da microscopia eletrônica de varredura – MEV. **O papel**, vol. 76, num. 8, pp. 61-63 ago. 2015.

LEÃO, M. A. **Fibras de Licuri: um Reforço Alternativo de Compósitos Poliméricos**. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

LIMA, A. B. T. **Aplicações de Cargas Mineraias em Polímeros**. 2007. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LIMA, S. C. **Estudo da técnica de difração de raios x**. 2006. 69 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Física), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2006.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo: 6ª Reimpressão – 2011, Editora Edgar Blucher, 2011.

MARGEM, J. I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciência, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2013.

MARTINS NETO, J. A. **Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal**. 2016. 100f. Tese (Doutorado em

Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MARTINS NETO, S. F. **Material compósito de matriz frágil reforçado com fibras naturais de sisal e malva:** caracterização e correlações das propriedades e mecânicas. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

MERSON, E. *et al.* The use of confocal laser scanning microscopy for the 3d quantitative characterization of fracture surfaces and cleavage facets. **Procedia Structural Integrity**, v. 2, p. 533–540, 2016.

MILANESE, A. C. **Caracterização de compostos de matrizes poliméricas reforçadas com fibra de sisal e de vidro.** 2008. 130 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

NASSEH, J. **Barcos - métodos avançados de construção em compostos.** Rio de Janeiro, 2007.

OLIVEIRA, J. A. de. **Fractografia quantitativa:** relações entre diferentes condições de tratamento térmico e a dimensão fractal. 2017. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia Microestrutura e Propriedades.** Curitiba, Humus S.A, 2000.

PADOVAN, R. B. **O bambu na arquitetura:** design de conexões estruturais. 2010. 183 f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Arquitetura, artes e comunicação, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2010.

PAULA, P. G. **Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica.** 2011. 102f. Dissertação (mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

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.

RESENDE, E. C. de. **Aplicação da lama vermelha como catalisador em processos oxidativos/redutivos.** 2013. 145 p. Tese (Doutorado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

REZENDE, M. C. Fractografia de Compósitos Estruturais. **Polímeros**, São Carlos, vol. 17, n. 3, p. E4-E11, set. 2007.

- RONG, M. Z. *et al.* The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. **Composites Science and Technology**, vol. 61, p. 1437-1447, 2001.
- SANCHEZ, Elisabete 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 Carlos, v. 20, n. 3, p. 194-200, Set. 2010.
- SANTOS, A. M. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- SANTOS, E. A. dos. **Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- SANTOS, F. R. S. dos. **Desenvolvimento e aplicação de compósitos à base de matriz polimérica reforçado com fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e resíduos de madeiras amazônicas**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.
- SANTOS, R. M. P. dos. **Análise mecânica de tração de compósitos híbridos de matrizes poliméricas com resíduo de caulim e fibra de bambu (*bambusa vulgaris*)**. 2018. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
- SARAIVA, M. P. **Laminado de madeira reforçado com fibras naturais**. 2013. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- SHIMIZU, V. K. **Classificação e caracterização de tipos de minérios de cobre da Mina do Sossego - região de Carajás**. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- SILAEX, POLIESTER INSATURADO: Disponível em:
<<http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>> Acesso em: 07 de novembro de 2018.
- SILVA FILHO, E. B., ALVES, M. C. M., DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.12, n.2, p. 322-338, 2007.
- SILVA, I. L. A. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.
- SILVA, Rafael *et al.* Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009 .

SILVA, R. V. da. **Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOUZA, J. A. S. da. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria-prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. 2010. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SOUZA, S. A. de, **Ensaio mecânicos de materiais metálicos, fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

TARGA, G.N. **Compósito reforçado por laminado de bambu com matriz de poliuretano e epóxi: desenvolvimento, produção e caracterização mecânica**. 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2011.

TARGA, G. N. et al. Produção e caracterização mecânica de um compósito de fibra de juta e resina de poliéster insaturado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 10, 2009, Foz do Iguaçu, PR, **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, 2009.

TIMARCO, L. R. Desenvolvimento de materiais compósitos híbridos, compostos de fibras de carbono e fibras de aramida reforçadas com resina epóxi parte I. **XIII Semana de Engenharia Aeronáutica**, São Carlos, 2016.

VASCONCELLOS, R. M. de. **Cartilha de Fabricação de Móveis de Bambu**. Maceió: Instituto do Bambu, 2004.

VENTURA, Ana Mafalda F.M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **C.Tecn. Mat.**, Lisboa , v. 21, n. 3-4, p. 10-19, jul. 2009 . Disponível em: <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122009000200003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 03 maio 2019.