



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

ERYCK EDUARDO SIMPLICIO DOS SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS RESÍDUOS DE LAMA
VERMELHA NAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER**

Ananindeua – Pará
2022

ERYCK EDUARDO SIMPLICIO DOS SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS RESÍDUOS DE LAMA
VERMELHA NAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais, pela Universidade Federal do Pará.

Orientador: 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)**

S237e Santos, Eryck Eduardo Simplicio dos.
Estudo da influência da granulometria dos resíduos de lama vermelha nas propriedades dos compósitos de matriz poliéster / Eryck Eduardo Simplicio dos Santos. — 2022.
89 f. : il. color.

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

1. Materiais. 2. Resíduos. 3. Granulometria. 4. Flamabilidade. I. Título.

CDD 620.11

ERYCK EDUARDO SIMPLICIO DOS SANTOS

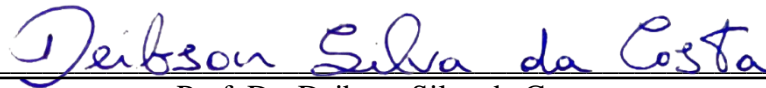
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS RESÍDUOS DE LAMA VERMELHA NAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais, pela Universidade Federal do Pará.

Data da Aprovação: 06/07/2022

Conceito: Exceleente

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
(FEMat/CANAN/UFPA – Orientador)



Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
(FEMat/CANAN/UFPA – Examinador Interno)



Prof. Dr. Diego Hildebrando dos Santos
(FEI/CABAE/UFPA – Examinador Externo)

Dedico este trabalho à minha família, nomeadamente aos meus pais, que me deu suporte em todos os momentos, me auxiliou e que não mediu esforços para tornar a realização deste sonho possível.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo a Deus, por me dar forças durante esse processo de formação acadêmica e tornar possível a conclusão dessa etapa profissional.

À minha família. Nomeadamente aos meus pais, Erisvaldo Santos e Edinalva Santos, que acreditaram no meu potencial e investiram em mim, realizando diversos sacrifícios para tornar tudo isso possível.

À minha tia Elisangela Simplicio que sempre me apoiou, ajudou e acreditou em tudo o que eu me propus a fazer.

Ao Prof. Dr. Deibson Silva da Costa, por toda paciência e empenho para me orientar com excelência, além de não medir esforços para proporcionar um bom ambiente de trabalho e formas de aprendizado. Por todas as críticas construtivas, e momentos de exigência profissional que ajudaram a me qualificar. Sem a sua confiança, depositada em mim, este trabalho não teria evoluído.

Aos meus amigos e colegas de classe, principalmente aos “Cavernas”, que eu tive o prazer de conviver e aprender com eles durante os anos de graduação. Ajudaram-me e incentivaram-me em diversos momentos do curso. Em especial, agradeço ao meu amigo Lucas Rezende por me ajudar sempre que pôde sem hesitar.

Ao grupo de pesquisa do LAMPS, em especial ao Victor Ferreira, Karla Lino, Eng. Alice dos Prazeres e Eng. Bruno Mendes pelos diversos momentos de ensinamento, ajuda e descontração.

Aos professores da Universidade Federal do Pará, do curso de Engenharia de Materiais, que contribuíram para minha formação acadêmica e para a conclusão desta etapa.

E ao Laboratório de Engenharia Mecânica do Campus Universitário de Belém (LABEM) e ao Laboratório de Ensaios de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus Universitário de Tucuruí (FEM/CAMTUC) pelos ensaios realizados.

“Não temas, porque Eu sou contigo; não te assombres, porque Eu sou teu Deus; Eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça.”

(Isaías 41:10)

RESUMO

O presente trabalho produziu compósitos de resina polimérica utilizando o resíduo industrial de Lama Vermelha (LV), com as granulometrias de 0, 100, 200, 325 e 400 mesh, para avaliar suas propriedades físicas, mecânicas e de inflamabilidade. O método de fabricação manual foi *hand lay-up*, com compressão em molde metálico, e proporções mássicas de 10 % e 20 %. Fez-se uso da resina poliéster insaturada isoftálica, atrelada ao iniciador e o ativador de cobalto nas proporções de 1 % e 1,5 %, em v/v, respectivamente. A análise mineralógica do resíduo foi realizada pela técnica de Difração de Raios-X, a análise morfológica foi realizada com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscópio Óptico (MO), e a análise química foi através da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Foram realizados ensaios físicos seguindo as normas e diretrizes estabelecidos pela ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792 para Absorção de Água, Porosidade Aparente e Massa Específica Aparente, respectivamente. Já os ensaios mecânicos de flexão e tração seguindo as normas ASTM D 790 e ASTM D 3039, na devida ordem. Para realizar os ensaios de inflamabilidade se utilizou a norma ASTM D 635. As análises mineralógicas, químicas e morfológicas do resíduo indicaram picos mais intensos de hematita e sodalita, e elementos mais evidentes como ferro e titânio. No que diz respeito aos ensaios físicos, a redução das faixas granulométricas indicou uma diminuição gradual de absorção de água e porosidade aparente, e a massa específica aparente apresentou um crescimento em relação a matriz. Na maioria das composições e granulometrias, os ensaios mecânicos indicaram um aumento da resistência à tração e valores ainda mais expressivos para flexão. Ademais, a inflamabilidade dos compósitos fabricados indicou taxas de queima mínimas em relação as normas de comparação, apresentando uma boa resistência à chama. A menor taxa de queima obtida com a composição de 400 mesh e 20 % de LV se destacou, principalmente quando comparadas as normas estabelecidas: ASTM D 635 e CONTRAN 498. Diante disso, ficou evidente que a variação da granulometria influenciou nas propriedades dos compósitos fabricados.

Palavras-chave: Materiais. Resíduos. Granulometria. Inflamabilidade.

ABSTRACT

The present work produced polymeric resin composites using the industrial waste of Red Mud (RM), with granulometries of 0, 100, 200, 325 and 400 mesh, to evaluate its physical properties, mechanics and flammability. The manual manufacturing method was hand lay-up, with compression in a metallic mold, and mass proportions of 10 % and 20 %. Was used isophthalic unsaturated polyester resin, linked to the initiator and cobalt activator in proportions of 1 % and 1,5 %, in v/v, respectively. The mineralogical analysis of the residue was carried out by the X-Ray Diffraction technique, the morphological analysis was carried out with Scanning Electron Microscopy (SEM) and Optical Microscope (OM), and the chemical analysis was carried out through Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). Physical tests were performed following the standards and guidelines established by ASTM D 570, ASTM D 2734 and ASTM D 792 for Water Absorption, Apparent Porosity and Apparent Specific Mass, respectively. The mechanical bending and tensile tests follow the ASTM D 790 and ASTM D 3039 standards, in due order. To carry out the flammability tests, the ASTM D 635 standard was used. Mineralogical, chemical and morphological analyzes of the residue indicated more intense peaks of hematite and sodalite, and more evident elements such as iron and titanium. Regarding the physical tests, the reduction of the granulometric ranges indicated a gradual decrease of water absorption and apparent porosity, and the apparent specific mass showed an increase in relation to the matrix. In most compositions and granulometries, the mechanical tests indicated an increase in tensile strength and even more expressive values for bending. Furthermore, the flammability of the manufactured composites indicated minimum burning rates in relation to the comparison standards, showing good flame resistance. The lowest burn rate obtained with the composition of 400 mesh and 20 % RM stood out, especially when comparing the established standards: ASTM D 635 and CONTRAN 498. In view of this, it was evident that the variation in granulometry influenced in the properties of the manufactured composites.

Keywords: Materials. Waste. Granulometry. Flammability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – a) Bauxita; b) Alumina	19
Figura 2 – Evolução do processo Bayer.....	20
Figura 3 – Esquema do processo Bayer	21
Figura 4 – Ensaio de flexão em 3 pontos	33
Figura 5 – Ensaio de tração	34
Figura 6 – Aparato para o ensaio de flamabilidade horizontal.....	35
Figura 7 – Materiais do sistema catalítico: a) Matriz polimérica; b) Ativador; c) Iniciador ..	39
Figura 8 – Lama vermelha (LV) antes (a) e após secagem e desagregação (b).....	39
Figura 9 – Fluxograma do processo geral de fabricação dos compósitos.....	40
Figura 10 – a) Estufa; b) Moinho de bolas.....	41
Figura 11 – Peneiras: a) 100 mesh; b) 200 mesh; c) 325 mesh; d) 400 mesh.....	42
Figura 12 – a) Série de peneiras; b) Agitador	42
Figura 13 – Resíduo de lama vermelha peneirado à úmido	43
Figura 14 – Fluxograma da metodologia de fabricação e caracterização dos compósitos	45
Figura 15 – Equipamentos: a) Balança analítica; b) Molde metálico; c) Prensa hidráulica; d) Máquina de corte	46
Figura 16 – Dimensões dos corpos de prova para os ensaios físicos	46
Figura 17 – a) Corpos de prova; b) Aparato.....	47
Figura 18 – Corpos de prova para o ensaio de flexão.....	48
Figura 19 – Dimensões do corpo de prova para flexão	48
Figura 20 – Máquina utilizada para o ensaio de flexão	49
Figura 21 – Corpos de prova para tração	49
Figura 22 – Dimensões do corpo de prova para tração.....	50
Figura 23 – Máquina utilizada nos ensaios de tração	50
Figura 24 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de flamabilidade.....	51
Figura 25 – Sequência de queima dos corpos de prova	52
Figura 26 – Difratoograma realizado para o resíduo de lama vermelha.....	53
Figura 27 – Microscopia realizada para o resíduo de lama vermelha	54
Figura 28 – Análise MEV/EDS do resíduo lama vermelha: a) ponto de análise; b) espectrografia.....	55
Figura 29 – Micrografia do resíduo lama vermelha com aumento de 50x	56
Figura 30 – Compósitos após cura total.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais constituintes químicos da lama vermelha	24
Tabela 2 – Resultados obtidos para os ensaios físicos dos compósitos	57
Tabela 3 – Resultados obtidos para os ensaios de flexão dos compósitos	60
Tabela 4 – Comparativo dos resultados de TRF com a literatura.....	65
Tabela 5 – Resultados obtidos para os ensaios de tração dos compósitos	66
Tabela 6 – Comparativo dos resultados de TRT com a literatura	72
Tabela 7 – Resultados obtidos para os ensaios de flamabilidade dos compósitos	73
Tabela 8 – Comparativo dos resultados da taxa de queima com a literatura	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação entre massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente dos compósitos com as diferentes granulometrias.....	59
Gráfico 2 – Relação da resistência à flexão dos compósitos com as diferentes granulometrias	62
Gráfico 3 – Comparativo de desempenho à flexão dos compósitos com a variação granulométrica, 10 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	63
Gráfico 4 – Comparativo de desempenho à flexão dos compósitos com a variação granulométrica, 20 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	64
Gráfico 5 – Relação carga x alongamento para as composições com resíduo de lama vermelha	68
Gráfico 6 – Comparativo de desempenho à tração dos compósitos com a variação granulométrica, 10 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	70
Gráfico 7 – Comparativo de desempenho à tração dos compósitos com a variação granulométrica, 20 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	71
Gráfico 8 – Comparativo de desempenho à flamabilidade dos compósitos com a variação granulométrica, 10 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	75
Gráfico 9 – Comparativo de desempenho à flamabilidade dos compósitos com a variação granulométrica, 20 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	76

LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

A	Área útil da seção transversal
AA	Absorção de água
ANOVA	Analysis of variance
ASTM	American Society for Testing and Materials
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CP's	Corpos de Prova
CV	Cinza Volante
DRX	Difração de Raios-X
E	Módulo de elasticidade
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
F	Carga instantânea
FM	Fibra Metálica
HIPS	Poliestireno de alto impacto
LV	Lama vermelha
LV 0 # 10 %	Lama vermelha, granulometria bruta e 10 % de resíduos
LV 0 # 20 %	Lama vermelha, granulometria bruta e 20 % de resíduos
LV 100 # 10 %	Lama vermelha, 100 mesh e 10 % de resíduos
LV 100 # 20 %	Lama vermelha, 100 mesh e 20 % de resíduos
LV 200 # 10 %	Lama vermelha, 200 mesh e 10 % de resíduos
LV 200 # 20 %	Lama vermelha, 200 mesh e 20 % de resíduos
LV 325 # 10 %	Lama vermelha, 325 mesh e 10 % de resíduos
LV 325 # 20 %	Lama vermelha, 325 mesh e 20 % de resíduos
LV 400 # 10 %	Lama vermelha, 400 mesh e 10 % de resíduos
LV 400 # 20 %	Lama vermelha, 400 mesh e 20 % de resíduos
MEA	Massa específica aparente
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
Mi	Massa imersa
MO	Microscopia Óptica
Ms	Massa seca
Mu	Massa úmida
NBR	Norma Brasileira
PA	Porosidade aparente

PI	Poliéster Insaturado
PP	Polipropileno Puro
PP-g-MA	Polipropileno graftizado com anidrido maleico
TRT	Tensão de resistência à tração
TRF	Tensão de ruptura à flexão
TSD	Tukey Significant Difference
UFPA	Universidade Federal do Pará
ε	Deformação de engenharia
ρ	Massa específica
#	Tamanho da abertura na malha (mesh)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa e motivação	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo geral.....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Estrutura do trabalho	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Processo Bayer	19
2.2 Lama vermelha	22
2.2.1 Impactos ambientais	24
2.2.2 Aplicações	25
2.3 Compósitos	26
2.3.1 Compósitos com matriz polimérica.....	28
2.3.2 Compósitos com carga de enchimento	29
2.3.3 Compósitos com lama vermelha	30
2.4 Propriedades dos compósitos	32
2.4.1 Físicas	32
2.4.2 Mecânicas	33
2.4.2.1 Flexão	33
2.4.2.2 Tração	34
2.4.3 Flamabilidade.....	35
2.5 Granulometria	36
2.5.1 Influência da granulometria nas propriedades dos compósitos	36
3. MATERIAIS E METODOLOGIA	38
3.1 Equipamentos	38
3.2 Materiais	38
3.2.1 Matriz plena	38
3.2.2 Lama vermelha.....	39
3.3 Metodologia	40
3.3.1 Preparação da lama vermelha	40
3.3.2 Determinação das faixas granulométricas	41
3.3.3 Confecção dos corpos de prova	43

3.3.4 Caracterização física.....	46
3.3.4.1 Ensaio físicos.....	46
3.3.5 Caracterizações mecânicas	47
3.3.5.1 Ensaio de flexão	47
3.3.5.2 Ensaio de tração	49
3.3.6 Caracterização de flamabilidade	50
3.3.6.1 Ensaio de flamabilidade.....	50
3.4 Análise estatística	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Caracterizações do resíduo de lama vermelha	53
4.1.1 Difração de Raios-X (DRX)	53
4.1.2 Morfológica	54
4.2 Viabilidade de confecção dos compósitos	56
4.3 Caracterizações dos compósitos fabricados	57
4.3.1 Física	57
4.3.2 Mecânica.....	60
4.3.2.1 Ensaio de flexão	60
4.3.2.2 Ensaio de tração	66
4.3.3 Flamabilidade.....	72
5. CONCLUSÕES	78
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	79
REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e motivação

A grande quantidade de resíduos gerada por atividades industriais tem sido um impasse para o desenvolvimento econômico de maneira ambientalmente sustentável. Além de gerar um alto custo para a sua disposição e gerenciamento ambiental devido a sua grande quantidade gerada, os resíduos industriais são fatores alarmantes para um equilíbrio ambiental. Diante disso, visando minimizar impactos ambientais e reduzir custos com matérias primas, a reutilização de resíduos sólidos é uma alternativa para tal questão.

Apesar dos recentes avanços na área de reciclagem, os resíduos industriais, nomeadamente provenientes da mineração, são uma grande preocupação atualmente devido ao seu descarte impróprio; o que causa um desperdício mercadológico.

Nesse sentido, problemas especiais ocorrem com rejeitos que contêm vários componentes nocivos (íons de metais pesados, reagentes de flotação, ácidos e outros) que podem pôr em risco seriamente a qualidade das águas de superficiais e subterrâneas. Um destes resíduos é a lama vermelha, gerada na produção da alumina a partir do processo Bayer que, além de grandes quantidades de partículas muito finas e óxido de ferro, contém uma quantidade significativa de óxidos de sódio extremamente perigosos (ANTUNES, 2011).

Sua disposição inadequada gera um alto custo ambiental e pode originar problemas como: contaminação da água de superfície e subterrânea por hidróxido de sódio, ferro, alumínio ou outro agente químico; o vento pode carrear pó dos depósitos de lama vermelha seca, formando nuvens de poeira alcalina (SILVA, 2007).

Sendo assim, com o objetivo de reduzir custos, uma alternativa para a reutilização da lama vermelha é como carga em compósitos, pois a utilização de cargas tem o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas, térmicas e tribológicas e reduzir os custos dos componentes (OLIVEIRA, 2013).

Os materiais compósitos são aqueles formados pela combinação de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, em que a combinação desses materiais origina um material útil para a engenharia, o qual possui propriedades diferentes das encontradas nos constituintes separadamente (ASTM, 2016).

E se tratando de compósitos de matrizes poliméricas, como a lama vermelha apresenta uma compatibilidade razoavelmente boa com resinas poliéster, esse resíduo pode ser utilizado como potencial carga para produzir compósitos de matriz de poliéster de custo efetivo (SILVA, 2007).

Além disso, é necessária a determinação e conhecimento das propriedades de um material, nomeadamente de um compósito, para analisar suas possíveis formas de utilização. Nesse sentido, as propriedades físicas e térmicas são de considerável importância para os compósitos, pois por meio dessas e de outras propriedades é possível avaliar a possibilidade de aplicações (CALLISTER, 2020).

Nesse contexto, o presente trabalho analisou como a variação da granulometria da lama vermelha implica nas propriedades físicas, mecânicas e de inflamabilidade dos compósitos poliméricos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência das faixas granulométricas de 0, 100, 200, 325 e 400 mesh dos resíduos de lama vermelha nas propriedades dos compósitos poliméricos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Processar e caracterizar o resíduo de lama vermelha por meio da determinação das faixas granulométricas, Difração de Raios-X e análise morfológica;
- Verificar a viabilidade de confecção dos compósitos com proporções em massa de resíduos em 0 %, 10 % e 20 % com a variação granulométrica de 0, 100, 200, 325 e 400 mesh;
- Analisar as propriedades físicas de Massa Específica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA) nos compósitos fabricados;
- Averiguar o comportamento mecânico (flexão e tração), correlacionando a influência da fração mássica e variação granulométrica, dos materiais compósitos fabricados;
- Estudar as características de inflamabilidade (resistência à chama) dos compósitos de matriz polimérica com adição de diferentes faixas granulométricas de resíduo de lama vermelha.

1.3 Estrutura do trabalho

A seção 1 apresenta uma introdução a respeito do trabalho, a justificativa e os objetivos da pesquisa. Também contextualiza a importância e o potencial uso de resíduos industriais, nomeadamente o resíduo de lama vermelha proveniente dos processos indústrias para a produção de alumínio.

A seção 2 aborda um referencial teórico acerca do resíduo de lama vermelha e seus impactos ambientais. Além disso, disserta sobre os materiais compósitos com matriz polimérica, com ênfase nos materiais que atuam como carga de enchimento, e sobre a influência de uma variação granulométrica nas propriedades dos materiais.

A seção 3 discorre a respeito da metodologia aplicada à pesquisa, descrevendo os materiais e apresentando fluxogramas dos processos de fabricação e experimentais, tais como: caracterização física, mecânica e de inflamabilidade.

A seção 4 apresenta os resultados obtidos através da metodologia aplicada e do tratamento dos dados obtidos, sendo exibidos na forma de Tabelas e representações gráficas com suas respectivas discussões.

A seção 5 aborda as conclusões obtidas durante a realização do trabalho, correlacionando os objetivos iniciais e os resultados encontrados, e sugestões para futuros trabalhos.

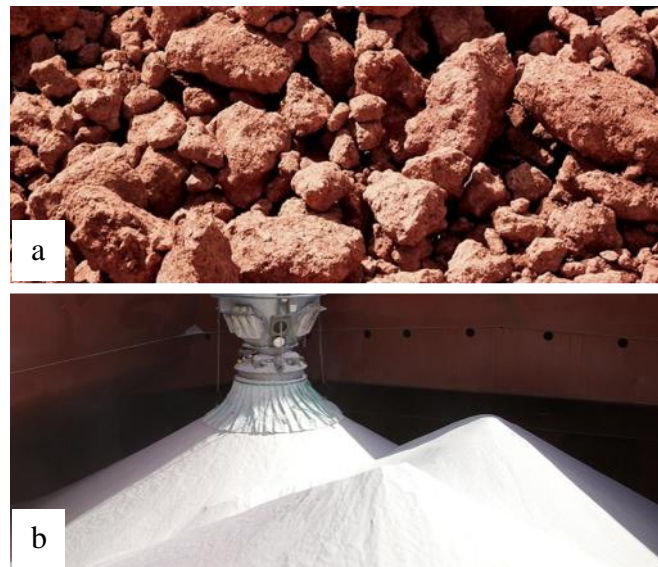
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo Bayer

A bauxita é uma mistura de minerais que contém variações de óxidos de alumínio hidratados, bem como impurezas. Os principais minerais do minério são gibbsita (tri-hidrato de alumina), boemia e diásporo (monohidratos de alumina). Sua produção mundial é de cerca de 250 milhões de toneladas e tem crescido até uma taxa anual acima de 5 % na última década, impulsionada principalmente pelo crescimento da demanda chinesa (HYDRO, 2020).

Geralmente, a bauxita possui coloração marrom-avermelhada, mas também pode ser branca, marrom e amarela, dependendo do tipo e concentração de minerais de ferro presentes, que por sua vez é matéria prima para a produção da alumina, ambas são ilustradas na Figura 1. Ela também tem uma ampla gama de texturas, mas é tipicamente opaca a terrosa em termos de brilho, e pode parecer argila ou terra. Uma bauxita rica em gibbsita é mais requisitada, uma vez que ela pode ser refinada a temperaturas de digestão mais baixas do que outros tipos de minerais portadores de alumina (HYDRO, 2020).

Figura 1 – a) Bauxita; b) Alumina.



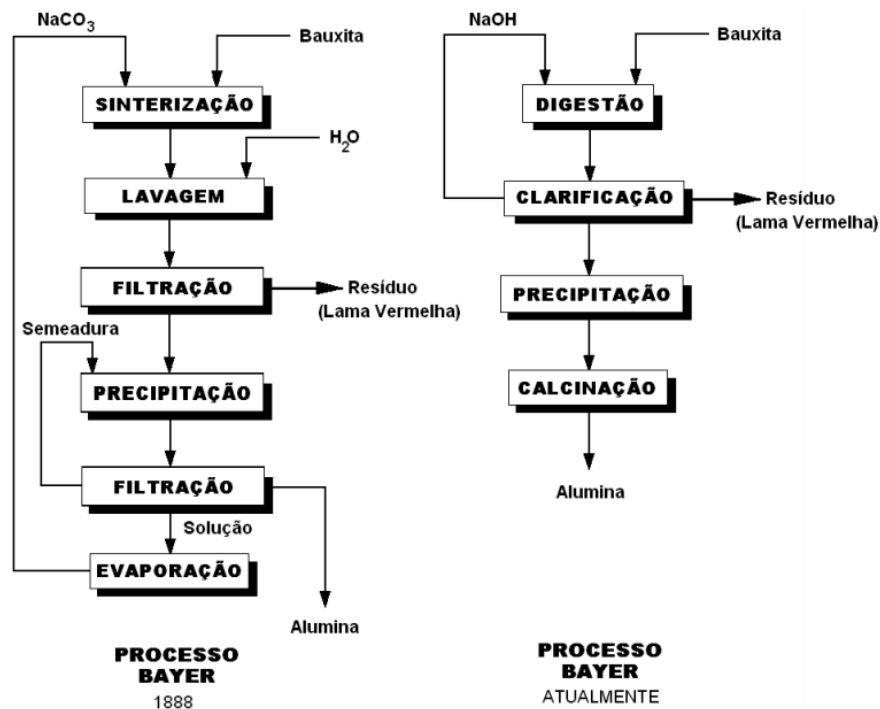
Fonte: Hydro, 2020.

Para se obter a alumina se faz uso do processo Bayer criado por Karl Josef Bayer em 1888, que utiliza como matéria-prima a bauxita. Esse processo industrial consiste em refinar quimicamente a bauxita e é constituído, de maneira simples, por quatro etapas principais:

digestão, clarificação, precipitação e calcinação. Durante a etapa de digestão os hidróxidos de alumínio (gibbsite, boehmite e diásporo) sofrem ataque cáustico, formando aluminato de sódio ($\text{NaAl}(\text{OH})_4$), o qual após a etapa de clarificação retorna à forma de hidróxido de alumínio na etapa de precipitação, ocorrida através da aplicação de pequenos cristais de alumina, induzindo essa precipitação. Esse precipitado é então calcinado em forno rotativo para então se obter a alumina pura (HIND *et al.*, 1999).

O processo Bayer foi rapidamente inserido nas indústrias, devido à drástica redução no custo de produção da alumina (Al_2O_3) que este proporcionou e é utilizado até hoje praticamente sem mudanças significativas, somente com a substituição do NaCO_3 pelo hidróxido de sódio e pela utilização de pressão durante a digestão (HIND *et al.*, 1999). Essa evolução pode ser observada na Figura 2.

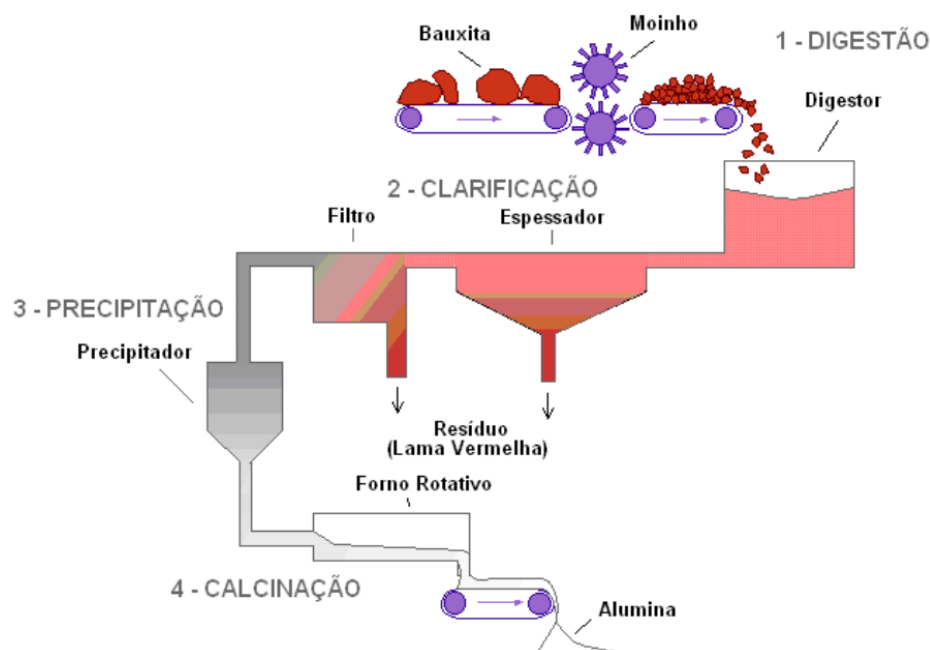
Figura 2 – Evolução do processo Bayer.



Fonte: Adaptado de Silva Filho *et al.*, 2007.

Nesse sentido, desconsiderando as peculiaridades de cada planta ao longo da história, a fabricação de alumina através do processo Bayer pode ser esquematicamente observada na Figura 3, de maneira simplificada, levando em conta seus estágios.

Figura 3 – Esquema do processo Bayer.



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

O estágio da digestão consiste na moagem da bauxita, seguida pela digestão de fato com uma solução cáustica de hidróxido de sódio (NaOH) sob temperatura e pressão. As condições concentração, temperatura e pressão variam de acordo com as propriedades da bauxita. Plantas modernas comumente operam em temperaturas entre 200 e 240 °C, e pressão em torno de 30 atm (WAO, 2020).

Na etapa de clarificação ocorre a separação entre as fases sólida (resíduo insolúvel / lama vermelha) e líquida (licor). Geralmente, as técnicas empregadas envolvem espessamento seguido de filtração. No espessamento ocorre a decantação, onde resíduo proveniente da digestão é encaminhado para unidades denominadas de espessadores (lavadores).

O objetivo destas unidades é condensar o resíduo de lama vermelha, aumentando seu teor de sólidos, para recuperar a maior quantidade de NaOH possível e fornecer um “overflow” para a filtragem. Nesta fase é comum a adição de polímeros (como hidroxamatos e poliacrilamida) para induzir a floculação das partículas nos espessadores ou até mesmo a utilização de processos de separação com membranas poliméricas (SILVA, 2007; IOM3, 2020).

Em seguida, na etapa de precipitação, acontece o esfriamento do licor. Posterior ao esfriamento são adicionados cristais de alumina (semeadura) para estimular a precipitação, em uma operação reversa à digestão. A alumina cristalizada é direcionada para a calcinação e o licor residual contendo NaOH e alguma alumina é recirculado para a etapa de digestão (HIND *et al.*, 1999; IOM3, 2020).

Finalmente, acontece a calcinação. Nessa etapa, a alumina é lavada para remover qualquer resíduo do licor e posteriormente é seca. Após isso, a alumina é calcinada a aproximadamente 1000 °C para desidratar os cristais, gerando cristais de alumina puros, de aspecto arenoso e branco (HIND *et al.*, 1999; IOM3, 2020; ABAL, 2020; WAO, 2020).

O resíduo insolúvel formado durante a clarificação é denominado de lama vermelha pela indústria de refino da alumina, é composto por óxidos insolúveis de ferro, quartzo, aluminossilicatos de sódio, carbonatos e aluminatos de cálcio e dióxido de titânio (geralmente presente em traços). A lama vermelha sofre uma lavagem, por meio de um processo de sedimentação com fluxo de água em contracorrente e posterior deságue para a recuperação do NaOH (SILVA, 2007).

2.2 Lama vermelha

Um dos principais minerais extraídos no Pará é a bauxita, que é amplamente utilizada pela indústria de alumínio. Nesse contexto, 98 % da produção de bauxita no Brasil, é destinada às refinarias de alumina, enquanto que o restante dirige-se à indústria de produtos refratários e químicos. As maiores reservas desse minério, o equivalente a 95 %, localizam-se no estado do Pará (IBRAM, 2021).

A bauxita é constituída por variações de óxidos metálicos, predominantemente óxido de alumínio (Al_2O_3), com teores da ordem de 40 % a 45 %, sendo composta por um ou mais hidróxidos de alumínio, encontrados em proporções variadas (gibbsita e os polimorfos: boemita e diásporo), diversas misturas de sílica, óxido de ferro, dióxido de titânio, silicato de alumínio e outras impurezas presentes em menores quantidades. Tais características fazem com que este seja o minério mais importante para a produção de alumínio (ABAL, 2020). Atualmente, o Brasil é o décimo primeiro país produtor de alumínio primário e o terceiro tanto na produção de alumina quanto na extração de bauxita (BABISK *et al.*, 2020).

Durante a produção da alumina, é gerado um resíduo altamente alcalino denominado lama vermelha. Esse resíduo pode causar a contaminação do solo, de águas subterrâneas e superficiais, acarretando danos à flora e à fauna, além do risco do rompimento dos diques de disposição (KOCSEHA *et al.*, 2018). Ainda não há produção em escala industrial que utilize este resíduo (RICHARD, 2018).

O resíduo de lama vermelha pertence a um grupo de rejeitos denominados "*tailings*" que são resultantes do beneficiamento de minérios pela indústria extrativista mineral. Estes rejeitos são solos que continham o mineral de interesse ou resultam da moagem de rochas.

Dependendo do processo de extração, podem ser adicionadas substâncias químicas como, por exemplo, a solda caustica empregada no refino da alumina. Os "tailings" caracterizam-se por serem lamas formadas por partículas muito finas (NEVES, 2017).

Comumente, a lama vermelha retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino, associado ao sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica. Além disso, a lama vermelha apresenta um alto teor de ferro e sódio, além de cálcio e outros óxidos fundentes que podem representar vantagens técnica quanto à sua incorporação em possíveis produtos e aplicações (ALAM *et al.*, 2017; BABISK *et al.*, 2020).

Os minerais presentes na lama vermelha podem ser classificados segundo duas categorias: as provenientes da bauxita e formados durante processo Bayer. A lama vermelha é rica em sílica, Ferro, Titânio, Alumínio, pode ser usada em tratamento de água, coagulante adsorvente, ou catalisador para remover poluentes, como fenol, cádmio, fosfatos, fluoreto, cobre, arsênio e corantes. Devido a isso, ela é usada como fase de reforço para materiais poliméricos como cloreto de polivinil (PVC), poliéster isoftálico, polipropileno (ZHANG *et al.*, 2011).

Apesar de esses compostos serem frequentes, a porcentagem e o restante da composição da lama vermelha variam bastante, ainda que no mesmo país, já que a composição deste resíduo depende da fonte e qualidade da bauxita e o método empregado para a obtenção de alumina (SILVA FILHO *et al.*, 2007). Estima-se que cerca de 90 milhões de toneladas desse resíduo são gerados todos os anos no mundo (KOCSEHA *et al.*, 2018; SONG *et al.*, 2021).

Embora a lama vermelha representar um passivo ambiental importante para a indústria de beneficiamento de alumínio, devido aos riscos de contaminação do meio ambiente e aos custos associados ao seu manejo e disposição, os quais representam uma grande parte dos custos de produção da alumina, alguns métodos de disposição produzem uma menor quantidade de lama vermelha como a disposição seca ao invés da disposição úmida (SILVA, 2007).

A lama vermelha é constituída por partículas muito finas (cerca de 95 % < 44 µm, i.e. 325 mesh) e tem como principal característica uma elevada alcalinidade. A norma ABNT NBR 10004 indica que substâncias com pH $\geq 12,5$ são perigosas por serem bastante corrosivas. Em virtude do elevado teor de cálcio a lama vermelha pode ser relativamente tóxica. Nesse sentido, a reciclagem segura dessa enorme quantidade de resíduos alcalinos é considerada um sério desafio para as indústrias de alumínio devido ao seu pH (ARROYO *et al.*, 2020).

Os principais constituintes da lama vermelha gerada no processo Bayer da Hydro Alunorte são listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais constituintes químicos da lama vermelha.

Constituintes da LV	(%) peso
Fe ₂ O ₃	29,538
SiO ₂	17,283
CaO	1,082
Al ₂ O ₃	22,539
TiO ₂	4,058
Na ₂ O	12,508
V ₂ O ₅	0,280
MgO	0,148
K ₂ O	0,027
PF (Perda ao fogo)	12,035

Fonte: Adaptado de Quaresma, 2012.

Os métodos convencionais de disposição de lamas, ou métodos úmidos, são assim denominados devido à grande quantidade de água de processo que segue com o material sólido para disposição. Os métodos úmidos aplicáveis à lama vermelha consistem em grandes diques onde a lama vermelha é disposta com baixo teor de sólidos. Porém o potencial de impacto sobre o meio ambiente é alto. A área de disposição final necessária é grande, 100 a 200 acres em média (SILVA, 2007).

Atualmente os métodos conhecidos como métodos secos ou semissecos de disposição tendem a serem aplicados com mais frequência. Os métodos secos de disposição apresentam as seguintes vantagens sobre os métodos úmidos: melhor manuseio, maior segurança, geração de um menor volume de lama, menor área ocupada e reabilitação mais fácil da área. Nestes métodos a lama é disposta com um teor de sólidos mais elevado, resultando em uma textura pastosa.

Dentre os métodos de disposição a seco, os mais comumente aplicados à lama vermelha são os “*drystacking*”, secagem solar, tailing espessado (Thickened tailing disposal), “*off-shore disposal*”, a neutralização da lama vermelha com a utilização de ácido sulfúrico (SILVA, 2007).

2.2.1 Impactos ambientais

Embora os avanços tecnológicos obtidos nos últimos anos, a disposição da lama vermelha ainda é um grande problema para a indústria de beneficiamento do alumínio. Os gastos com a disposição e o gerenciamento da lama vermelha representam grande parte dos

custos de produção da alumina. Os custos ambientais associados à disposição da lama vermelha também são altos (SILVA, 2007).

Quando não disposta adequadamente, a lama vermelha pode acarretar em problemas como: impacto visual sobre uma extensa área; contaminação da água de superfície e subterrânea por hidróxido de sódio, ferro, alumínio ou outro agente químico; o vento pode carrear pó dos depósitos de lama vermelha seca, formando nuvens de poeira alcalina; contato direto com animais, plantas e seres humanos (SAMAL, 2013).

Alguns casos de desastres já foram registrados. Em São Paulo (SP) ocorreu um vazamento em 2004, de cerca de 900.000 litros de lama vermelha, atingindo o córrego do Bugre, rio Varzão e Pirajibu, na bacia do Rio Sorocaba. Como consequência houve alteração da qualidade das águas tornando-as impróprias (ofensivas à saúde), além de provocar danos à fauna (mortalidade de peixes) e à vegetação (CANDIDO, 2017).

Em Barcarena (PA) houve um vazamento de lama vermelha em 2003 que atingiu as nascentes do rio Murucupi. Da nascente a foz do rio houve mudança na tonalidade das águas, com o aumento nos teores de alumínio e sódio e possível contaminação do aquífero. No exterior, na Jamaica, a não utilização de técnicas adequadas de disposição da lama vermelha resultou na contaminação de aproximadamente 200 milhões de m³ de águas subterrâneas (SILVA, 2007).

Também ocorreu a contaminação de águas superficiais, a disposição de lama vermelha em lagoas na localidade de Mont Diablo acarretou na contaminação das águas do lago Moneague, as quais se tornaram impróprias, devido ao elevado pH. Este tipo de impacto afeta o turismo, outra atividade econômica muito importante da ilha. Além disso população da Jamaica apresenta uma pré-disposição genética para a hipertensão, a qual pode ser agravada pelos altos níveis de sódio devido à contaminação da água subterrânea (SILVA, 2007).

2.2.2 Aplicações

Por um longo período a lama vermelha foi considerada um resíduo inaproveitável para a indústria do alumínio. Entretanto, os custos econômicos e os riscos ambientais associados à disposição da lama vermelha têm motivado companhias e pesquisadores na busca por alternativas ambientalmente mais seguras, que possibilitem a redução do volume de resíduo encaminhado para a disposição final.

Pesquisas têm sido desenvolvidas visando à recuperação de ferro, titânio e outros metais. A enorme quantidade de lama vermelha descarregada por indústrias produtoras de

alumina a partir da bauxita representa um problema ambiental e econômico, alguns relatórios propondo reutilizar a lama vermelha têm avançado, especialmente para a produção de corpos cerâmicos ou cimentos (SGLAVO, 2000).

Babisk (2015) estudou e observou que a incorporação da lama vermelha em cerâmica causa mudanças significativas na retração linear, absorção de água e resistência mecânica, a princípio depreciam as propriedades. Porém, como uma solução ambientalmente correta, poderia, no entanto, ser justificada por incorporações que atendam a norma técnica necessária para um determinado produto.

Vieira (2012) procurou analisar se composição química da lama vermelha contém elementos que favorecem a sua utilização como matéria-prima para a obtenção de vidros, com o auxílio de sílica sendo adicionada para permitir a obtenção de fases amorfas, mesmo que a adição de sílica aumente a temperatura de fusão dos materiais de partida.

Chagas (2018) desenvolveu o preparo de material a partir de lama vermelha impregnada com Fe (III) e aplicação em processos oxidativos avançados e observou que de acordo com os resultados dos testes o material enriquecido com Fe foi mais ativo em comparação com o material precursor, mostrando potencial para ser usado como catalisador. As pesquisas envolvendo a aplicação de processos de resíduos contribuem diretamente para minimizar os impactos causados pela sua eliminação e, ao mesmo tempo, levam à produção de materiais com valor agregado.

Manfroi (2009) fez uma avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas e os resultados da avaliação da atividade pozolânica, formação de compostos hidratados e calor de hidratação em pastas mostraram que a lama vermelha apresenta certa atividade pozolânica e poderia substituir parcialmente o cimento para produção de argamassas.

2.3 Compósitos

De forma ampla, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, tal que é obtida a melhor combinação de propriedades. De acordo com esse princípio da ação combinada, melhores combinações de propriedades são criadas por uma combinação de dois ou mais materiais distintos e desta forma, possuem um incontável número de aplicações técnicas (CALLISTER, 2020).

São materiais com propriedades específicas e não usuais, são necessários para uma gama de aplicações de alta tecnologia, tais como as encontradas nas indústrias aeroespacial, submarina, de bioengenharia e de transporte (CALLISTER, 2020). Os compósitos podem ser classificados como materiais constituídos por uma mistura de fases macrocomponentes compostas por materiais que, geralmente, são diferentes sob os pontos de vista de composição química e forma. O aglomerante do material é chamado de matriz, que tem por função envolver os componentes, ou seja, compõe a forma do material (DAVALLO *et al.*, 2010).

As matrizes típicas são feitas de materiais poliméricos, metálicos e cerâmicos. As matrizes poliméricas são divididas em dois tipos principais: termofixos e termoplásticos (CAMPBELL, 2010). A matriz atua ainda como uma base que confere ductilidade e mantém a estrutura coesa e que, em resumo, contribui para que o conjunto se caracterize por boas condições de fabricação e a necessária flexibilidade. Os componentes inseridos na matriz atuam normalmente como substâncias de reforço ou enchimento da matriz, sendo as propriedades dos compósitos dependentes da natureza e das propriedades do reforço e da matriz (QUINHONES, 2007).

O intuito da etapa de mistura no processamento dos compósitos é a distribuição de maneira homogênea garantindo a completa dispersão das cargas/reforços dentro da matriz. Existe uma ampla variedade de equipamentos de mistura que podem ser utilizados nesta etapa, tais como misturadores internos e as extrusoras de rosca simples ou dupla (MANO *et al.*, 2010).

O processo de moldagem do material tem como função proporcionar a forma e dimensão final desejada, através de processos como moldagem por compressão, extrusão e injeção (MANO *et al.*, 2010). Pontualmente, as propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos podem ser afetadas pelo processamento e pela temperatura na qual ele foi realizado (MANO *et al.*, 2010).

Diversos equipamentos e produtos são confeccionados com materiais compósitos como, por exemplo, suportes para circuitos impressos, telhado de casas, painéis de automóveis, lanchas, aviões, tubulações e até mesmo artigos esportivos como raquetes de tênis e quadros de bicicleta. Além destes, materiais bastante utilizados, como a madeira e o concreto (inclusive o concreto armado), são considerados materiais compósitos (SHACKELFORD, 2008).

2.3.1 Compósitos com matriz polimérica

Os materiais poliméricos são compostos por grandes cadeias moleculares estruturalmente mais complexas do que os metais e cerâmicos. Essas cadeias são formadas por átomos de carbono ligados covalentemente, o que resulta em materiais geralmente com baixa condução de calor e eletricidade. Em contrapartida, esses materiais são normalmente baratos e de fácil processamento, além de apresentar considerável resistência química (MENDES, 2019).

Diversos materiais plásticos, borrachas e materiais fibrosos que são úteis nos dias de hoje consistem em polímeros sintéticos. Os materiais sintéticos podem ser produzidos de maneira barata, e as suas propriedades podem ser administradas num nível em que muitas delas são superiores as suas contrapartes naturais. Em algumas aplicações, peças metálicas e de madeira foram substituídas por plásticos, que possuem propriedades satisfatórias e podem ser produzidos a custos mais baixos (CALLISTER, 2020).

Compósitos de matrizes poliméricas estão sendo muito utilizados em uma ampla faixa de aplicações onde serviços de longo prazo em ambientes hostis (ambientes ácidos ou alcalinos) são requeridos (BAGHERPOUR, BAGHERI e SAATCHI, 2009).

Os polímeros termoplásticos e termofixos têm sido utilizados como matrizes em compósitos. Os termofixos mais empregados em compósitos de alto desempenho são os, epóxis, as fenólicas, bismaleimidas e poliamidas. Essas resinas exibem excelente resistência a solventes assim como a altas temperaturas. Estima-se que mais de três quartos de todas as matrizes de compósitos poliméricos sejam constituídas por polímeros termofixos (PAIVA *et al.*, 1999).

Depois de curada (polimerizada), uma matriz termofixa não pode ser remoldada, dissolvida ou fundida. Ao contrário das resinas termofixas, as resinas termoplásticas, tais como poliestireno, polipropileno, polietileno e outros, não requerem qualquer reação química de cura. Elas se fundem sob aquecimento e se convertem para um estado sólido sob resfriamento (VASILIEV e MOROZOV, 2001).

Os polímeros termoplásticos deformam quando aquecidos e endurecem quando são resfriados, processos que são totalmente reversíveis e que podem ser repetidos. Esses materiais são fabricados normalmente pela aplicação simultânea de calor e pressão. Em nível molecular, à medida que a temperatura é elevada as forças de ligação secundárias são diminuídas (devido ao aumento do movimento molecular), de modo tal que o movimento relativo de cadeias adjacentes é facilitado quando uma tensão é aplicada. Além disso, os termoplásticos são relativamente moles e dúcteis (NUNES, 2015).

As resinas de poliéster insaturadas são amplamente utilizadas como matrizes para compósitos poliméricos por causa de seu custo relativamente baixo, bom equilíbrio de propriedades, e adaptabilidade a diversos processos de fabricação. Elas são utilizadas principalmente em moldagem por compressão, moldagem por injeção, moldagem por transferência de resina, pultrusão, enrolamento filamentar, e em processos hand lay-up (NUNES, 2015).

É comumente referida como poliéster de uso geral, e típicos exemplos são ortoftálico, isoftálico, bisfenol-A poliésteres de ácido fumárico. Poliésteres insaturados são amplamente utilizados como laminados, materiais de construção, adesivos, revestimentos, na indústria da construção, a indústria elétrica, etc. Apesar de muitas vantagens, tais como a capacidade de temperatura ambiente, a transparência, a densidades baixas, os poliésteres típicos tem algumas desvantagens. Eles não são duros o suficiente, altamente inflamável, e a sua resistência ao impacto é mais baixa do que a de outros polímeros termoendurecíveis como, por exemplo, o epóxi (WORZAKOWSKA, 2009).

2.3.2 Compósitos com carga de enchimento

Incorporar resíduos industriais numa matriz polimérica pode trazer bons resultados, ou seja, compósitos de boa qualidade que diminuam o envio para aterros sanitários tanto de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos quanto de resíduos industriais. A obtenção de compósitos poliméricos a partir da incorporação de resíduos industriais visa solucionar pelo menos três situações: 1) o fato de que polímeros geralmente possuem as propriedades mecânicas inferiores às dos materiais de reforço; 2) o acondicionamento do resíduo, num produto durável, fazendo com que sua destinação final não seja o aterramento e 3) em alguns casos, em virtude do custo da matriz pode ter um valor agregado superior, a adição de resíduos como carga, pode baratear o custo do produto final (BARBOSA, 2019).

De forma geral, várias propriedades dos materiais compósitos particulados seguem a regra da mistura, dependendo somente das quantidades relativas e das propriedades individuais, conforme representado pela Equação 1.

$$\rho_c \sum (f_i \rho_i) \quad (1)$$

Onde: ρ_c é a massa específica do compósito; ρ_i e f_i são a massa específica e o teor do componente i (MENDES, 2019).

Nesse contexto, vale ressaltar trabalhos que demonstram a influência da adição de resíduos em compósitos com matriz polimérica. Cunha (2012) estudou que a adição de lama vermelha em resina termofixa de poliéster insaturado reduz as resistências à tração e à flexão e provoca um aumento significativo na densidade. Porém, a redução de propriedades mecânicas pode ser contornada através da adição de fibras de reforço, geralmente em pequenas concentrações, onde fibras naturais são bastantes investigadas devido ao apelo ambiental.

Jena e Satapathy (2011) observaram redução de propriedades mecânicas em compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibra de vidro e lama vermelha, porém notaram uma melhora significativa da resistência à abrasão do material com o aumento dos teores de lama. Contudo, Oliveira (2013) obteve bons resultados para a fibra de curauá associada à lama vermelha em matriz de resina de poliéster insaturado.

Costa (2016) ao estudar a adição de resíduos de mineração e fibras vegetais em matriz de poliéster insaturado, notou que os compósitos ao serem uniformemente preenchido pelas partículas apresentaram as mesmas propriedades em quaisquer direções de esforço, sem apresentar, contudo, uma direção preferencial.

Freitas *et al.* (2009) ao preparar e caracterizar materiais compósitos com carbetto de silício, caulim e alumínio observou que dependendo da composição, os compósitos SiC/caulim/Al, podem ser usados em aplicações que envolvam elevada resistência mecânica à flexão, pois apresentaram bons resultados. Com o aumento da concentração em caulim verificou-se um aumento na resistência mecânica e dureza dos compósitos. Acima de 40 % em caulim, verificou-se uma pequena diminuição na resistência mecânica devido a diminuição na concentração de partículas de SiC, as quais atuam como reforço da matriz. Uma vantagem adicional refere-se ao custo do compósito, já que o caulim é uma matéria-prima natural de baixo custo, fornecedor de sílica e alumina, podendo ser usado em até 40 % em substituição ao SiC na composição, melhorando as propriedades finais.

2.3.3 Compósitos com lama vermelha

Diante da preocupação com a disposição de resíduos industriais, vários estudos vêm sendo desenvolvidos a fim de encontrar aplicações referentes à reutilização desses resíduos, nomeadamente com compósitos que reutilizam a lama vermelha. Com relação à utilização do resíduo lama vermelha como agente de reforço em matrizes poliméricas, evidencia que a maior

parte dos estudos encontrados na literatura está relacionada à utilização de termorrígidos na matriz, especialmente resina de poliéster insaturado. Entre os estudos com matrizes termoplásticas destaca-se o polipropileno (BARBOSA, 2019).

Zhang *et al.* (2011) incorporaram lama vermelha em PP, observando progresso nas propriedades de flexão e piora nas de impacto conforme se aumentou o teor de lama vermelha. Já quando a matriz foi a resina epóxi, Biswas e Satapathy (2010) observaram que a adição de lama vermelha neste polímero tende a aumentar a aderência das fibras, seja de bambu ou vidro. Entretanto, Dash *et al.* (2012) notaram a redução de resistência à tração comparando compósito híbrido de fibras de juta e de vidro em matriz de resina epóxi, com e sem lama vermelha.

Zhang (2018) estudou uma estratégia para tornar o rejunte em um composto orgânico-inorgânico que fosse flexível, elástico e retardante de chamas, baseando-se nas excelentes interações sinérgicas entre pré-polímero de poliuretano, lama vermelha, polietileno glicol e trimetilolpropano. O material de rejuntamento composto de poliuretano e lama vermelha resultou em uma estrutura de rede tridimensional que apresentou uma flexibilidade favorável e boa resistência à compressão. O material de rejuntamento foi composto principalmente de poliuretano amorfo e lama vermelha cristalina, e apresentou estabilidade térmica favorável, retardamento de chama e desempenho de reparo para trincas. Este trabalho evidenciou uma via simples e conveniente para a aplicação massiva de compósitos com lama vermelha.

Lokesh (2018) buscou observar o efeito de partículas de lama vermelha na resistência a arranhões de compósitos matriciais de metal à base de alumínio. Explorando o uso de lama vermelha como material de reforço que levando em conta a composição química, bem como opção de baixo custo quando usado com alumínio, observou-se que a inclusão da lama vermelha afetou drasticamente o fator de dureza dos compósitos e que o aumento da porcentagem de peso do composto de lama vermelha diminuiu a dureza, indicando a formabilidade do material.

Liu (2016) examinou a influência da lama vermelha nas propriedades reológicas, cristalinas e mecânicas de compósitos de lama vermelha / PBAT e pôde constatar o potencial uso de lama vermelha como carga de um polímero biodegradável, poli adipato de butileno-co-tereftalato (PBAT), para preparar materiais compósitos ecológicos. Observou-se que após a incorporação de lama vermelha nos compósitos a temperatura cristalina do PBAT foi bastante melhorada. As propriedades reológicas dos compósitos, como o módulo de armazenamento, o módulo de perda e a viscosidade, bem como a temperatura de fusão e cristalina dos compósitos também foram aumentadas, enquanto a cristalinidade diminuiu ligeiramente com o aumento de uso da lama vermelha. Espera-se que o compósito preparado seja usado no futuro para materiais de embalagem.

Moraes (2019) avaliou a caracterização mecânica e resistência à chama de compósitos poliméricos com adição de resíduos de lama vermelha e caulim. Nesse contexto, as propriedades físicas (absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente) aumentaram conforme se elevaram as composições de resíduo e os materiais ensaiados apresentaram capacidade de retardo à chama quando comparados com as recomendações da norma avaliada no trabalho. Mecanicamente, os resultados foram semelhantes à matriz plena para flexão e notou-se uma tendência de aumento da resistência à tração, evidenciando a possibilidade de uso de compósitos com caulim e lama vermelha;

2.4 Propriedades dos compósitos

2.4.1 Físicas

As caracterizações físicas como os ensaios de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) de materiais compósitos são de elevada importância para o entendimento e correlação das propriedades dos materiais. No caso dos compósitos, nomeadamente com matriz polimérica associada a resíduos, os efeitos podem interferir diretamente nas propriedades mecânicas desses materiais (SANTOS, 2019).

Segundo as normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792, ensaios de AA, PA e MEA, respectivamente, podem ser realizados por meio da aplicação dos dados de massa dos materiais nas Equações 2, 3 e 4 representadas a seguir.

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

$$PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 (\%) \quad (3)$$

$$MEA = \frac{M_s}{M_u - M_i} \times \rho_{H_2O} \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (4)$$

Onde M_u é a massa úmida, M_s é a massa seca e M_i é a massa imersa, todos em gramas (g).

2.4.2 Mecânicas

2.4.2.1 Flexão

O ensaio de flexão permite a determinação da resistência à flexão e o módulo de elasticidade sob esforços de flexão. De acordo com a norma ASTM D 790, os dados gerados pelo ensaio de indicam quais partes do material irão suportar solicitação sem que se flexionem ou fraturem. Na Figura 4 pode-se notar o esquema da realização do ensaio, no qual os cálculos são baseados.

Figura 4 – Ensaio de flexão em 3 pontos.



Fonte: Afinko, 2020.

A Equação 5 demonstra o cálculo que pode ser realizado da tensão de ruptura à flexão (TRF) em MPa, para um ensaio de três pontos, em um material compósito com seção transversal retangular.

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

Onde P é carga do instante da ruptura em Newtons, L é a distância em milímetros entre e b e h são dimensões de altura e largura do corpo de prova, também em milímetros.

2.4.2.2 Tração

Esse ensaio consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova até a ruptura e permite medir mensurar parâmetros de resistência mecânica, o que implica em uma ampla utilidade como teste para os materiais compósitos de engenharia. A Figura 5 ilustra de maneira simples o ensaio de tração.

Figura 5 – Ensaio de tração.



Fonte: Afinko, 2020.

Para os materiais compósitos de matriz polimérica, desde que sejam obedecidos os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM D 3039, a tensão de resistência à tração (TRT) em MPa pode ser determinada pela Equação 6.

$$\text{TRT} = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Onde F é carga aplicada em Newtons, A é área útil da seção transversal do corpo de prova, em milímetros quadrados. O módulo de elasticidade (E) em MPa pode, ainda, ser calculado utilizando-se a Equação 7.

$$E = \frac{\text{TRT}}{\varepsilon} \quad (7)$$

No qual TRT é tensão de resistência à tração em MPa e ε é a deformação do corpo de prova.

2.4.3 Flamabilidade

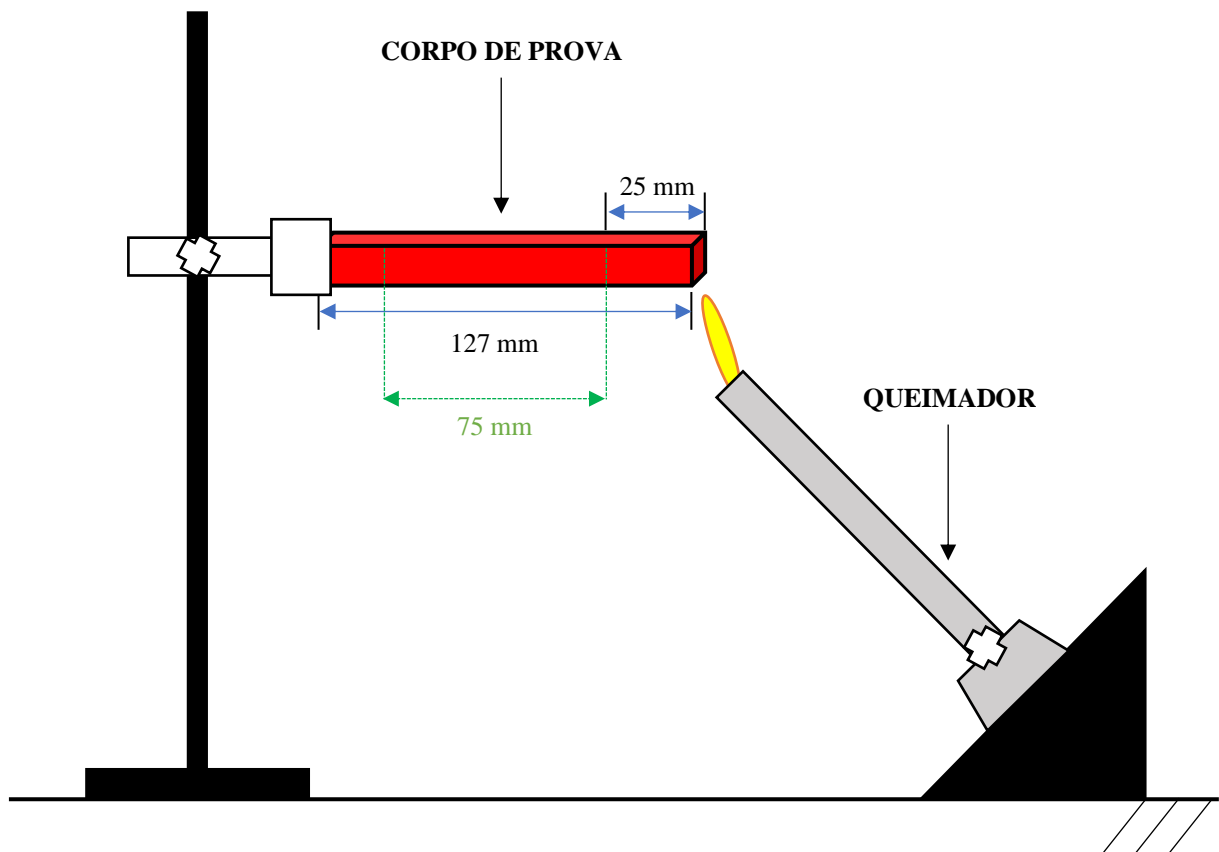
O estudo da flamabilidade de materiais compósitos tem destaque especial nas aplicações que envolvem susceptibilidade de incêndio, tais como revestimento de automóveis, aeronaves e na construção civil (RIBEIRO *et al.*, 2013).

A taxa de propagação de chama pode ser calculada de acordo com os parâmetros da norma ASTM D 635 de flamabilidade horizontal em compósitos poliméricos, através da Equação 8.

$$\text{Taxa} = \frac{L}{t} \quad (8)$$

Onde L é o comprimento útil do corpo de prova em milímetros e t é o tempo, em segundos, no qual a chama leva para percorrer o comprimento útil. O aparato utilizado no ensaio é exibido na Figura 6.

Figura 6 – Aparato para o ensaio de flamabilidade horizontal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

2.5 Granulometria

2.5.1 Influência da granulometria nas propriedades dos compósitos

A granulometria dos resíduos está relacionada com a mineralogia da rocha de origem, processo de extração, processamento e a forma como é despejada na barragem ou dique (PINHEIRO, 2016). A faixa da curva granulométrica é impossível definir um padrão, pois as características como processamento, extração e mineralogia variam de região para região. De modo geral, a granulometria dos rejeitos de lama vermelha está faixa dos síltes que varia de 10 μ m a 100 μ m.

A análise granulométrica de partículas sólidas compreende a determinação do tamanho das mesmas, bem como da frequência com que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho (LIMA e LUZ, 2001). As curvas granulométricas e os índices físicos dos resíduos de mineração, de uma maneira geral, são informações frequentemente utilizadas em correlações empíricas para extrapolar comportamentos no campo tais como taxas de adensamento e mesmo resistência (VILLAR, 2002).

A granulometria de resíduos de mineração e/ou processamento também é uma característica que está estritamente relacionada à mineralogia da rocha de origem mais ao processo de extração e processamento. No caso de resíduos de final de processamento industrial, como as lamas vermelhas, o uso de floculantes ou não durante a fase de decantação é um dado importante, já que alterará todo o produto final (VILLAR, 2002).

O uso destas substâncias não é feito de maneira padronizada, o que aumenta a possibilidade de se ter maiores diferenças entre as granulometrias entre os rejeitos mineração e processamento inclusive de mesma rocha de origem (VILLAR, 2002).

A forma de lançamento nos diques ou barragens de armazenamento influencia na granulometria dos resíduos dentro dos reservatórios, já que pode favorecer a segregação entre as partículas. E com isso, poderão ser criadas zonas com comportamentos diferenciados no lago. As partículas maiores tendem a se depositar próximo aos locais de descarga, enquanto que as mais finas se depositam em locais mais afastados (VILLAR, 2002).

Após um determinado tempo, os grãos maiores podem criar uma barreira para os menores, formando uma zona de deposição de material variado. Portanto, dentro de um mesmo reservatório, certamente vai se ter resíduos de granulometria totalmente diferente entre si e talvez fosse uma boa prática começar apresentar curvas granulométricas destes materiais com

a informação da região do reservatório em relação ao ponto de despejo dos resíduos, as amostras foram coletadas (SILVA, 2007).

Candido (2017) procurou estabelecer uma análise comparativa da granulometria da lama vermelha a partir da sedimentação hidráulica, valendo-se da Lei de Stokes e de ensaios em granulômetro visando conhecimento para a futura aplicação em polímeros. Verificou-se que existe uma variação significativa no tamanho das partículas de lama vermelha, e que é possível proporcionar futuramente a formulação de compósitos a partir de cada faixa granulométrica.

Santos (2019) produziu compósitos de resina polimérica utilizando o resíduo industrial de Lama Vermelha (LV) para avaliar suas particularidades por meio de ensaios físicos, mecânicos e de flamabilidade, com granulometrias de 325 e 400 mesh. Pôde-se observar que os compósitos fabricados apresentaram resultados satisfatórios na resistência à tração e à chama em relação à matriz plena, e os resultados dos para absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente variaram de acordo com as proporções e granulometrias, ratificando uma influência da variação granulométrica nas propriedades dos compósitos.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Equipamentos

Os equipamentos utilizados necessários nas etapas de preparação e separação granulométrica do resíduo, fabricação dos compósitos e, conseqüentemente, corpos de prova estão listados a seguir. Esses instrumentos foram cedidos pelo Laboratório de Engenharia Química (LEQ), da Universidade Federal do Pará, campus Belém.

Preparação e separação granulométrica do resíduo:

- ❖ **MOINHO DE BOLAS**, ;
- ❖ **ESTUFA**, DE LEO – Secagem, T 105 °C;
- ❖ **PENEIRAS**, TYLER – 100, 200, 325 e 400 Mesh;
- ❖ **AGITADOR**, PRODUTEST – Peneiramento;

Fabricação dos compósitos e corpos de prova:

- ❖ **BALANÇA ANALÍTICA**, ELETRONIC COMPACT SCALET;
- ❖ **ESTUFA**, DE LEO – Retirada de umidade, T 105 °C;
- ❖ **MOLDE METÁLICO**, Dimensões (320 mm x 172,5 mm x 5 mm);
- ❖ **PRENSA HIDRÁULICA**, MARCON, modelo MPH-15, com capacidade de 15 ton;
- ❖ **MÁQUINA DE CORTE**, EINHELL, modelo BT-TC-9005.

Além dos equipamentos listados, também se fez uso de EPIs (Equipamentos de Proteção Individual) como: máscaras, luvas, óculos de proteção, jaleco, dentre outros.

3.2 Materiais

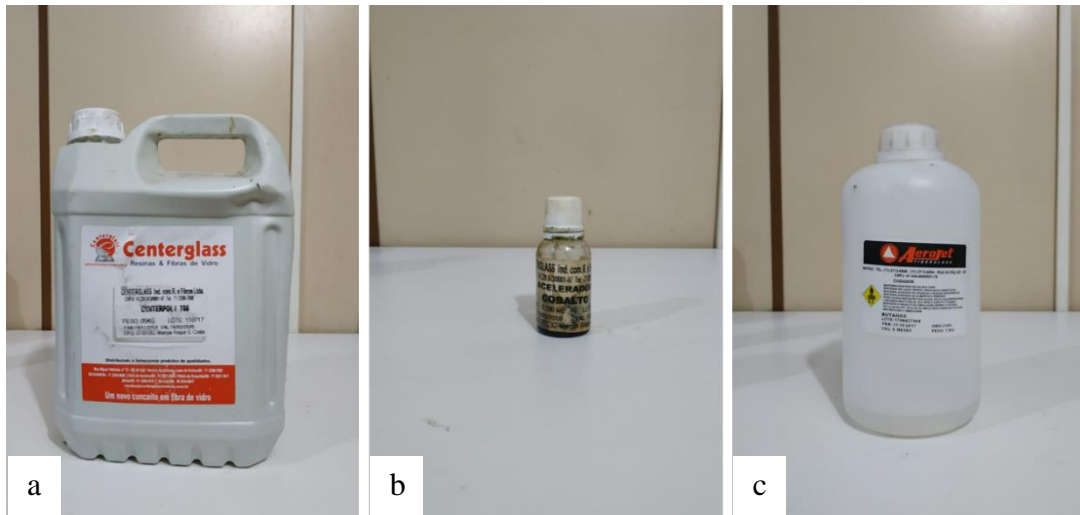
3.2.1 Matriz plena

Para confeccionar os compósitos, foi utilizada a resina poliéster insaturada isoftálica, proveniente da empresa Centerglass Ind, Com. R. e Fibras LTDA, que possui propriedades interessantes como boa resistência química, baixa viscosidade e uma reatividade mediana e, segundo os dados da empresa fabricante, sua massa específica é de 1,157 g/cm³.

O sistema catalítico, atrelado à resina, foi constituído com o auxílio do ativador de nome comercial CAT MET UMEDECIDO 1,5 % (Solução de Octoato de cobalto 1,5 %, em v/v) e o iniciador BUTANOX M-50 (Peróxido de Metil Etil Cetona - MEK-P 1 %, em v/v), adquiridos

da empresa AEROJET Brasileira de Firbeglass LTDA. A Figura 7 mostra os materiais do sistema catalítico.

Figura 7 – Materiais do sistema catalítico: a) Matriz polimérica; b) Ativador; c) Iniciador.

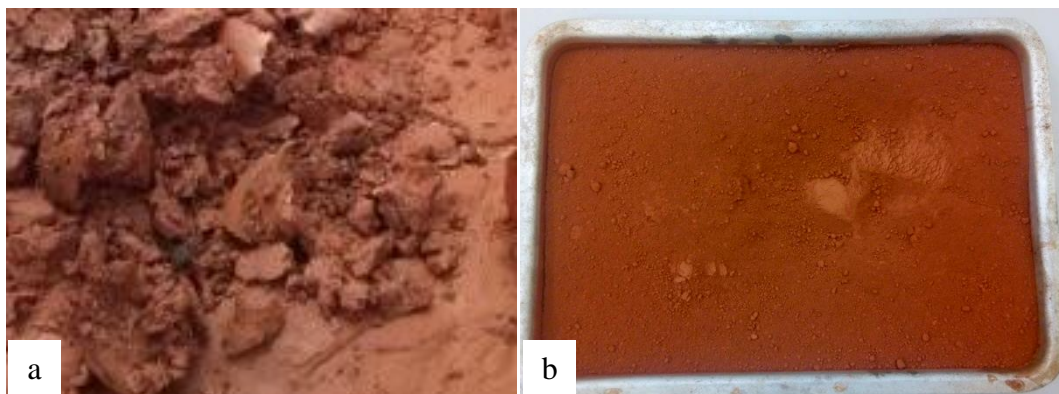


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.2.2 Lama vermelha

O resíduo utilizado nesse trabalho foi a lama vermelha (LV), proveniente da empresa Hydro Alunorte. Essa matéria prima chegou em pequenos contêineres e em formatos de torrões, e precisou passar por processos de secagem e cominuição para então ser trabalhada na fabricação dos compósitos. A Figura 8 demonstra o resíduo após ser secado e desagregado.

Figura 8 – Lama vermelha (LV) antes (a) e após secagem e desagregação (b).



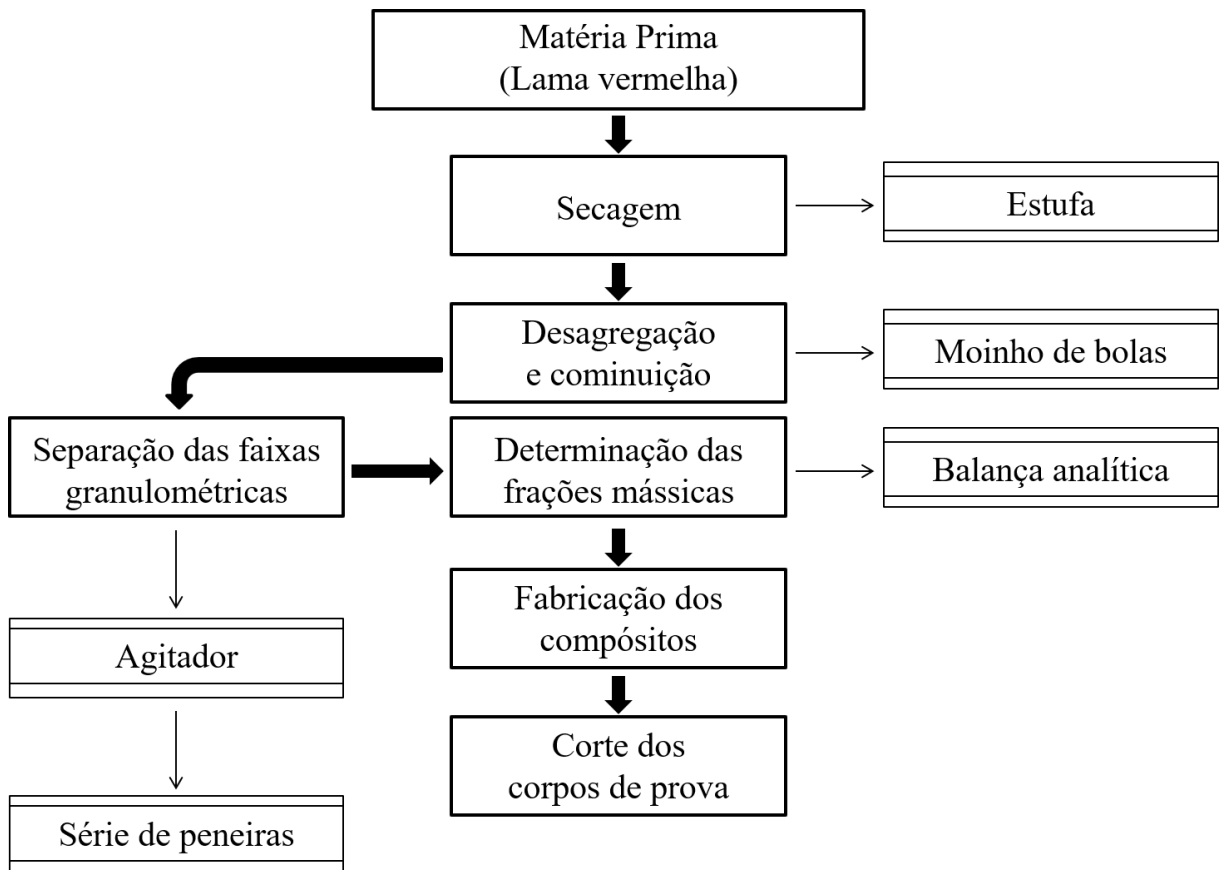
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.3 Metodologia

A fabricação dos compósitos ocorreu na Usina de Materiais (USIMAT) do Laboratório de Engenharia Química (LEQ), na Universidade Federal do Pará. Todos os equipamentos foram cedidos pela Usina, o que possibilitou o bom andamento do trabalho.

A Figura 9 apresenta etapas imprescindíveis com um fluxograma do processo prévio de fabricação dos compósitos, com resíduo de lama vermelha, confeccionados durante a realização deste trabalho.

Figura 9 – Fluxograma do processo geral de fabricação dos compósitos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

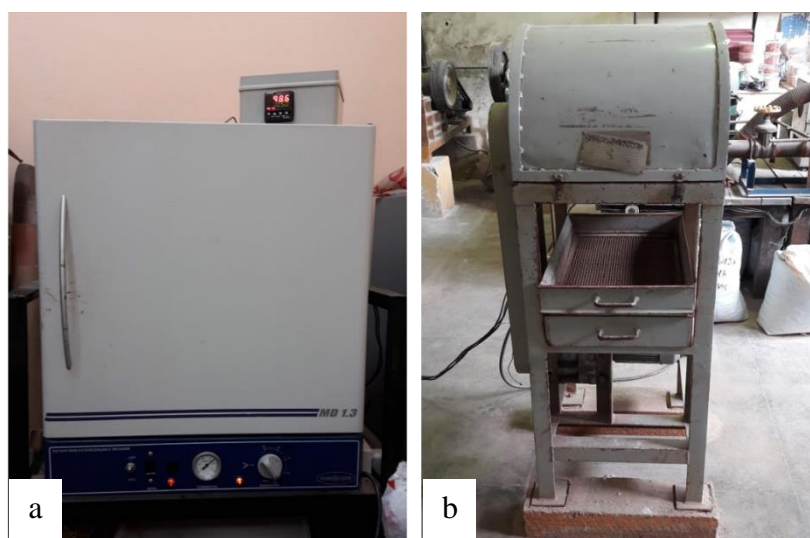
3.3.1 Preparação da lama vermelha

A lama vermelha utilizada não foi fornecida de maneira adequada para ser empregada na confecção dos compósitos, pois estava “bruta”, em forma de torrões, e com granulometria grosseira. Diante disso, foi necessário fazer o beneficiamento do resíduo para poder utilizá-lo.

A princípio, foi feita a secagem da lama vermelha, por 24 h, em estufa a uma temperatura de 105 °C com o intuito de retirar o excesso de água presente no resíduo e tornar possível a sua cominuição.

O processo de cominuição do resíduo foi realizado em um moinho de bolas. As corridas tiveram um intervalo de 20 minutos entre cada uma. Após a cominuição, a lama vermelha foi despejada e armazenada em recipientes para depois passar pelo processo de peneiramento. A Figura 10 demonstra os equipamentos utilizados durante o tratamento da lama vermelha.

Figura 10 – a) Estufa; b) Moinho de bolas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

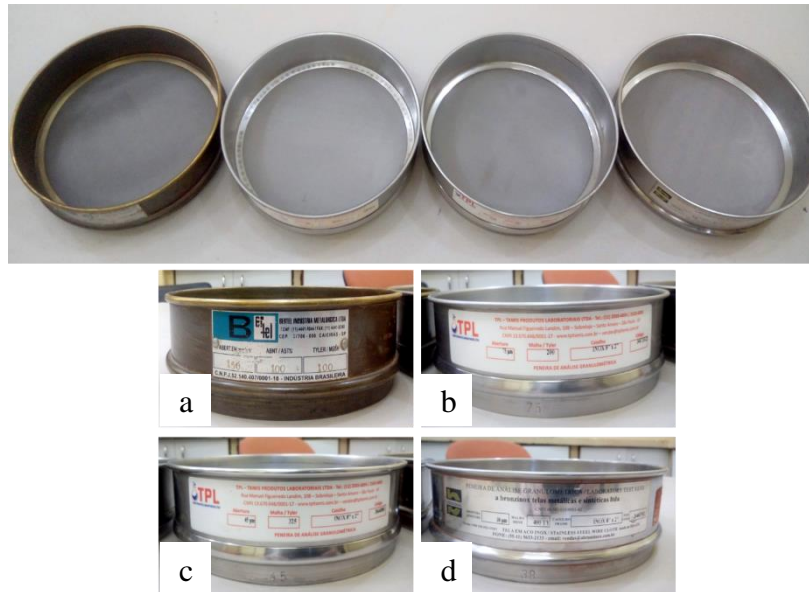
3.3.2 Determinação das faixas granulométricas

Com base em trabalhos já desenvolvidos anteriormente no laboratório de pesquisa e com o objetivo de encontrar uma granulometria ideal para fabricação, foram definidas cinco granulometrias para confeccionar os compósitos. Foram elas:

- Granulometria bruta (0 #): não passou por nenhuma peneira, trabalhada apenas com a lama vermelha após o processo de cominuição;
- 100 Mesh (100 #): resíduo após passar pela peneira de 100 mesh;
- 200 Mesh (200 #): resíduo após passar pela peneira de 200 mesh;
- 325 Mesh (325 #): resíduo após passar pela peneira de 325 mesh;
- 400 Mesh (400 #): resíduo após passar pela peneira de 400 mesh;

Ambas as peneiras utilizadas para a separação granulométrica são da série Tyler e são visualizadas na Figura 11.

Figura 11 – Peneiras: a) 100 mesh; b) 200 mesh; c) 325 mesh; d) 400 mesh.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para essa determinação e separação das granulometrias, se fez uso de um agitador com uma série de peneiras. Com o auxílio desse equipamento foi possível peneirar a lama vermelha de maneira mais eficiente. Esse processo foi feito a seco e é demonstrado na Figura 12.

Figura 12 – a) Série de peneiras; b) Agitador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Contudo, houve uma particularidade quanto à granulometria de 400 mesh onde se encontrou dificuldade para peneirar a seco. Diante disso, o processo de peneiramento dessa

granulometria foi feito à úmido. A Figura 13 ilustra a lama vermelha sofrendo o processo de decantação, depois de ser peneirada com o auxílio de água destilada. Finalmente, foi retirado o excesso de água e o resíduo foi seco novamente, em estufa, por 24 h.

Figura 13 – Resíduo de lama vermelha peneirado à úmido.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.3.3 Confecção dos corpos de prova

A metodologia de fabricação foi a de laminação manual “*hand lay up*”, que consistiu em algumas etapas.

Primeiramente, com a proporção mássica de lama vermelha pré-definida em 10 % e 20 % para cada granulometria, realizou-se a determinação das massas e em seguida a retirada da umidade em uma estufa por um período de 20 minutos a uma temperatura de 105 °C. As proporções mássicas foram estabelecidas com base em trabalhos já realizados como o de Santos (2019), Moraes (2019) e Queiroz (2018).

Ademais, determinou-se a massa da resina, com as devidas proporções para cada porcentagem de resíduo. Enquanto se esperava o tempo necessário para a retirada de umidade do resíduo, fez-se o nivelamento do molde metálico retangular e aplicou-se desmoldante no mesmo com o objetivo de facilitar a remoção da mistura após a etapa de prensagem e evitar o contato direto com o molde.

Por conseguinte, o preparo da mistura foi feito após a retirada do resíduo da estufa. A ordem de preparação aconteceu da seguinte forma: resina, ativador de cobalto (1,5 %, em v/v), resíduo e iniciador (1 %, em v/v) MEK-P (Butanox M-50). Após a adição do acelerador à resina, fez-se a mescla com o auxílio de um bastão de vidro até haver uma mistura visualmente

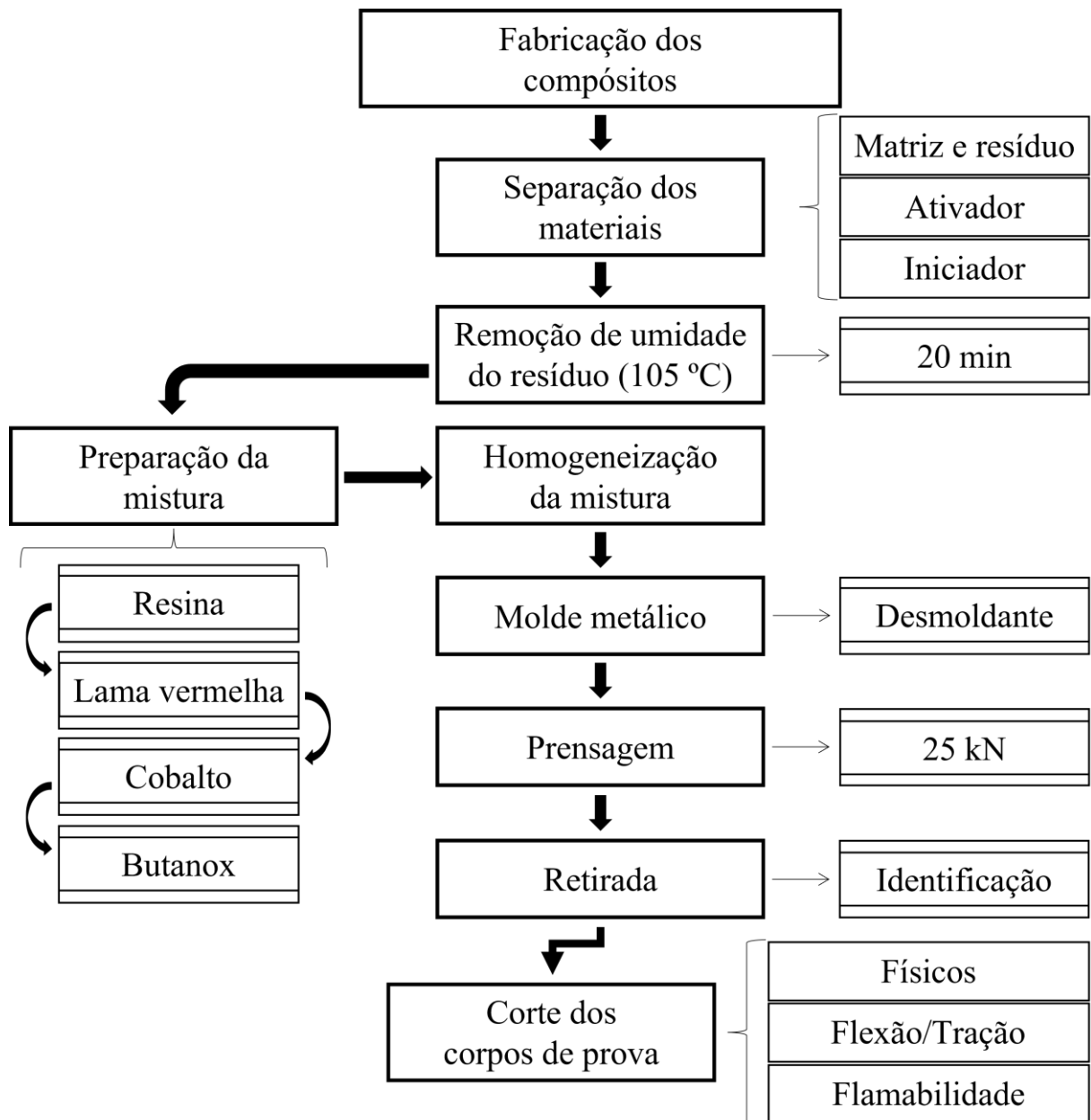
homogênea no recipiente. Em seguida, incorporou-se o resíduo e após homogeneização foi adicionado o iniciador Butanox para começar o processo de cura.

Subsequentemente, a mistura foi despejada de maneira homogênea no molde metálico, e esperou-se alguns minutos para atingir o ponto de gel. Após isso, o molde foi fechado e levado à prensa hidráulica. Na prensa, o molde foi estabilizado e submetido a uma compressão de aproximadamente 25 kN, por vinte minutos. Posteriormente, retirou-se o compósito do molde metálico e se fez a identificação.

Por fim, as placas, de formato retangular, foram condicionadas em uma superfície plana, aplicando-se pesos distribuídos uniformemente para evitar defeitos. Ademais, foi necessário esperar 24 h para o processo de cura total.

Além disso, realizou-se o corte das placas para os ensaios a serem realizados baseando-se nas recomendações das suas respectivas normas. A Figura 14 apresenta um fluxograma da metodologia empregada.

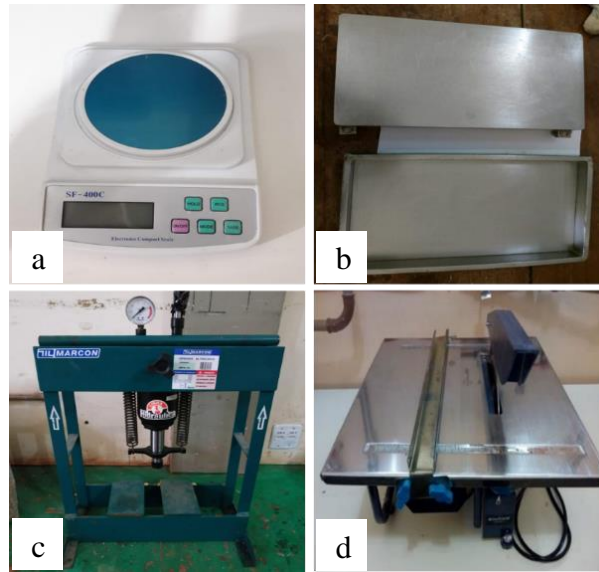
Figura 14 – Fluxograma da metodologia de fabricação e caracterização dos compósitos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 15 apresenta os equipamentos utilizados que foram usados durante a realização do trabalho.

Figura 15 – Equipamentos: a) Balança analítica; b) Molde metálico; c) Prensa hidráulica; d) Máquina de corte.



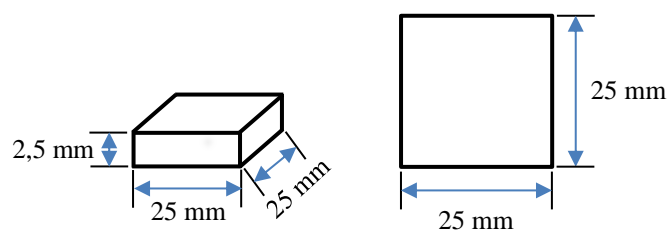
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.3.4 Caracterização física

3.3.4.1 Ensaio físicos

As propriedades físicas dos materiais compósitos que foram analisadas seguiram os padrões estabelecidos pelas normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792 para Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA), respectivamente. Os processos foram executados na Usina de Materiais do Laboratório de Engenharia Química, da Universidade Federal do Pará. Para a realização dos ensaios físicos foram preparados cinco corpos de prova de cada série fabricada, nas dimensões especificadas pela norma (Figura 16), e de acordo com as respectivas frações mássicas de 10 % e 20 % de resíduo para cada granulometria utilizada (0, 100, 200, 325 e 400 mesh).

Figura 16 – Dimensões dos corpos de prova para os ensaios físicos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Após a obtenção dos corpos de prova, foram realizadas as seguintes etapas:

- Os corpos de prova foram colocados na estufa durante 24 h a uma temperatura de 105 °C;
- Após isso, cada um foi pesado em balança de precisão para determinação da massa seca (M_s);
- Em seguida, foram imersos em água destilada, por 24 h, retirados e pesados novamente para se determinar a massa úmida (M_u);
- Por fim, foi verificada a massa imersa (M_i) através de um aparato instalado na balança analítica onde os corpos de prova foram pesados imersos em água destilada.

Os dados foram coletados e aplicados nas Equações 2, 3 e 4, e empregados para analisar as propriedades de Absorção de Água, Porosidade Aparente e Massa Específica Aparente, cujas equações foram mencionadas no tópico 2.4.1. A Figura 17 mostra os corpos de prova utilizados nos ensaios físicos e o aparato utilizado para se obter a massa imersa.

Figura 17 – a) Corpos de prova; b) Aparato.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.3.5 Caracterizações mecânicas

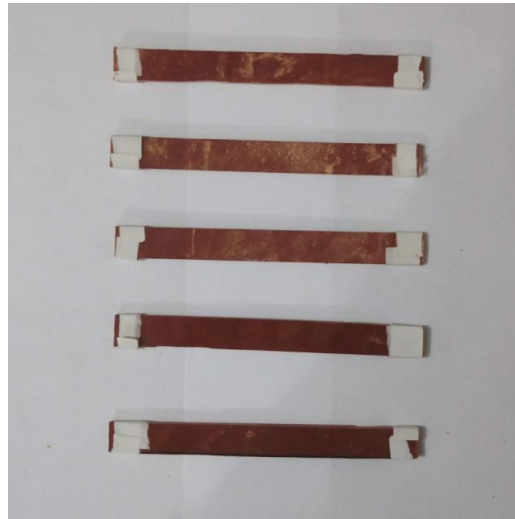
3.3.5.1 Ensaio de flexão

Após serem confeccionados, os corpos de prova receberam acabamento manualmente com o auxílio de uma lixa. Foram fabricados oito corpos de prova de acordo com as respectivas

frações mássicas de 10 % e 20 % de resíduo para cada granulometria empregada no trabalho (0, 100, 200, 325 e 400 mesh).

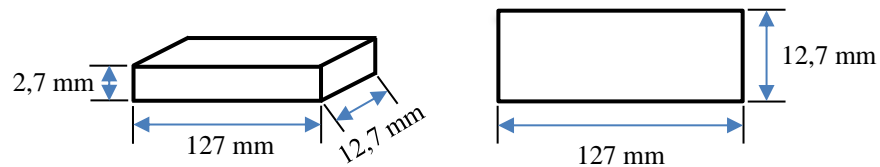
Os corpos de prova para o ensaio de flexão e suas respectivas dimensões estão apresentadas na Figura 18 e 19.

Figura 18 – Corpos de prova para o ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 19 – Dimensões do corpo de prova para flexão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O ensaio de flexão foi realizado em uma máquina da marca AROTEC, modelo WDW 100e com célula de carga de 5 kN, e seguiu a norma ASTM D 790. A velocidade de deslocamento do cabeçote no ensaio foi configurada em 2 mm/min.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí. A Figura 20 apresenta a máquina utilizada para execução do ensaio de flexão dos compósitos.

Figura 20 – Máquina utilizada para o ensaio de flexão.



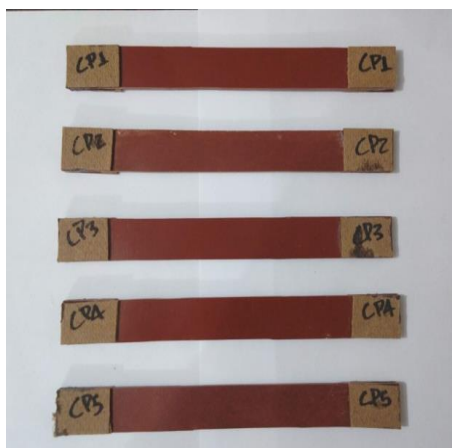
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.3.5.2 Ensaio de tração

A partir dos compósitos fabricados, foram cortados corpos de prova em dimensões específicas e testados mecanicamente por meio de ensaio de tração uniaxial, obedecendo aos parâmetros da norma ASTM D 3039. Na Figura 21 e 22 são ilustrados alguns dos corpos de prova e a especificação das suas dimensões.

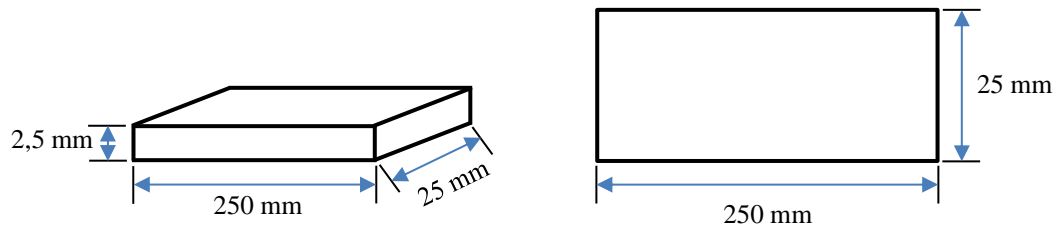
Foram fabricados oito corpos de prova de acordo com as respectivas frações mássicas de 10 % e 20 % de resíduo para cada granulometria empregada no trabalho (0 , 100, 200, 325 e 400 mesh).

Figura 21 – Corpos de prova para tração.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 22 – Dimensão dos corpos de prova para tração.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi uma máquina modelo KE 2000 MP da marca KRATOS, configurada com célula de carga de 5 kN a uma velocidade de 2 mm/min. Os ensaios foram realizados no laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM) da Universidade Federal do Pará, Campus Belém, e a máquina utilizada é ilustrada na Figura 23.

Figura 23 – Máquina utilizada nos ensaios de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.3.6 Caracterização de flamabilidade

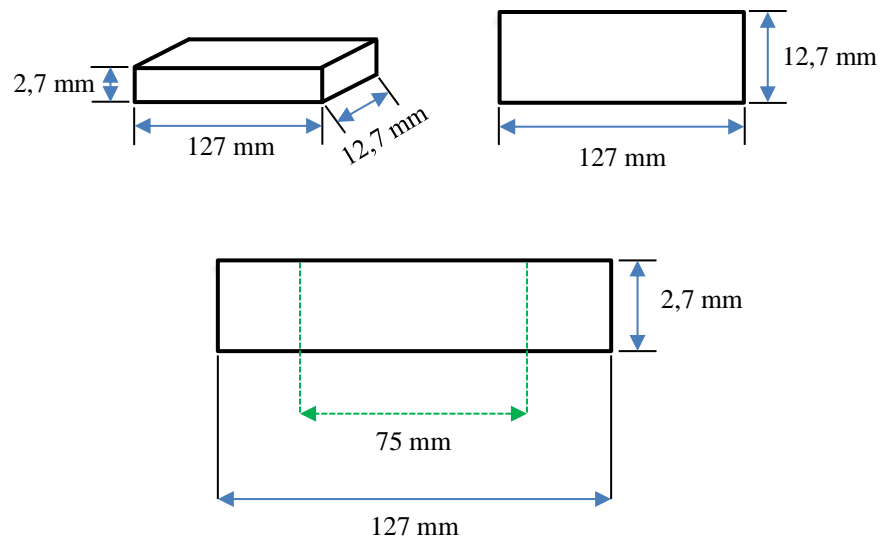
3.3.6.1 Ensaio de flamabilidade

Buscando analisar a resistência à chama dos materiais compósitos fabricados, realizaram-se ensaios de flamabilidade respeitando seguindo as diretrizes da norma ASTM D 635, de teste de flamabilidade horizontal.

Foi utilizado um aparato para possibilitar a sustentação dos corpos de prova, juntamente a um bico de Bunsen. Foram fabricados cinco corpos de prova para cada série e de acordo com as respectivas frações mássicas de 10 % e 20 % de resíduo para cada granulometria utilizada (0, 100, 200, 325 e 400 mesh).

As dimensões foram as mesmas utilizadas para os corpos de prova de flexão. Contudo, a taxa de queima foi calculada somente com a área útil de 75 mm e o tempo necessário para queima. A Figura 24 mostra a representação das dimensões dos corpos de prova.

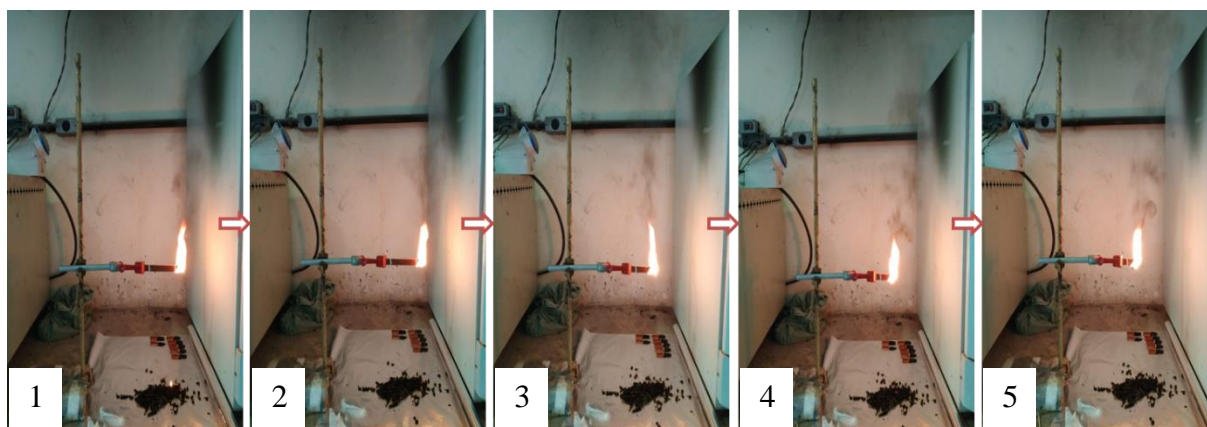
Figura 24 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de flamabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os ensaios ocorreram na Usina de Materiais (USIMAT) do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) onde também foi utilizado um exaustor de parede para evitar a inalação de fumaça. Na Figura 25 é possível observar a queima do corpo de prova durante a realização do ensaio.

Figura 25 – Sequência de queima dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.4 Análise estatística

Os resultados dos ensaios físicos, mecânicos e de flamabilidade foram analisados estatisticamente pelo método de análise de variância (ANOVA) de fator único, com 95 % de confiança, que verifica as hipóteses de igualdade entre as médias dos resultados avaliados ou descarta a igualdade entre as médias, indicando que existe ao menos uma diferença entre os resultados.

Para os resultados que atendam a condição para rejeição da hipótese nula, ou seja, na qual ao menos um dos níveis seja, em média, estatisticamente diferente dos demais foi realizado o teste de Tukey Significant Difference (TSD), onde se avalia a significância ($\alpha=0,05$) entre cada resultado pertencente ao grupo amostral, relatando quais são as diferenças representativas e não representativas.

Os cálculos relativos ao teste de Tukey e a ANOVA foram realizados com o auxílio do software livre PAST 4.03, utilizado para análise de dados científicos, com funções de manipulação de dados, plotagem, estatística univariada e multivariada, análise ecológica, séries temporais e análises espaciais, morfometrias e estratigrafias (MENDES, 2019; COSTA NETO, 2002).

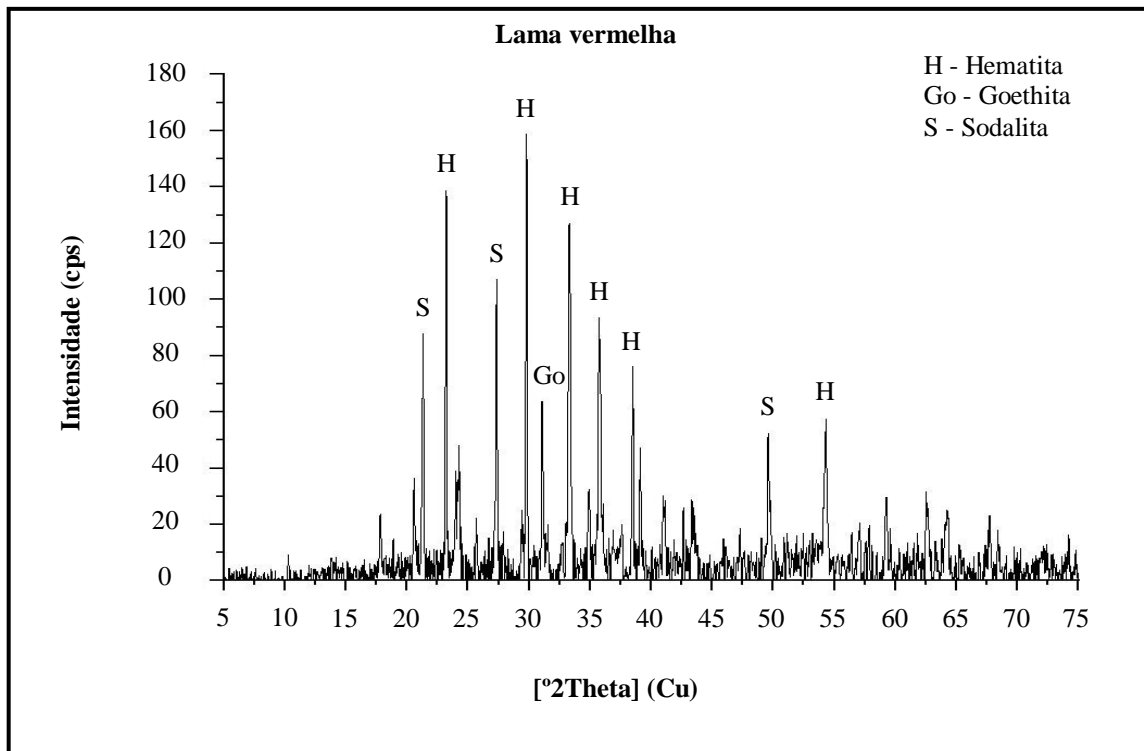
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterizações do resíduo de lama vermelha

4.1.1 Difração de Raios-X (DRX)

As composições mineralógicas foram observadas por meio da Difração de Raios-X (DRX), apresentando as principais fases minerais presentes no resíduo na Figura 26.

Figura 26 – Difratoograma realizado para o resíduo de lama vermelha.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

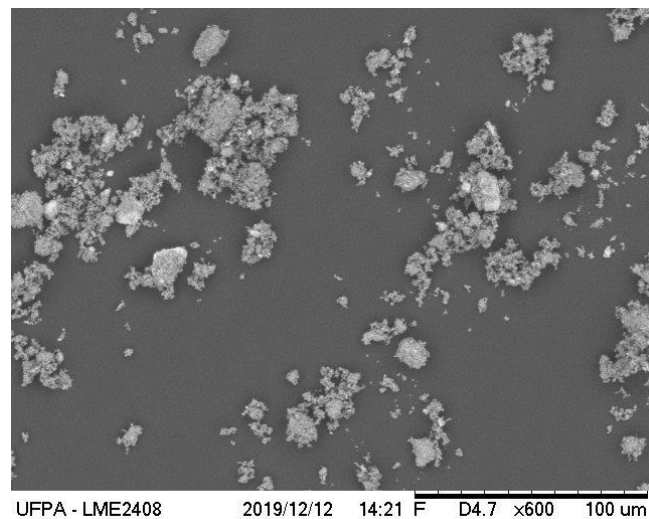
É possível observar por meio do difratograma que os principais picos sinalizados são de hematita (H) - PDF 01-073-2234 e sodalita (S) - PDF 01-089-8955. As características da lama vermelha podem variar dependendo da técnica empregada durante o processo Bayer e da composição química do minério de bauxita, contudo, levando em consideração a insolubilidade de compostos férricos e que a lama vermelha em questão foi obtida através de um processo hidro metalúrgico, torna-se compreensível a maior presença de hematita no difratograma. Além disso, é possível que os picos não identificados possam significar a presença de outros componentes como a gibbsita, calcita e anatase.

Cunha (2015) e Queiroz (2018) analisaram por intermédio da Difração de Raios-X os componentes presentes na lama e encontraram, também, como picos mais intensos a hematita e sodalita.

4.1.2 Morfológica

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostra a característica morfológica do resíduo de lama vermelha utilizado, as distribuições dos tamanhos e formatos das partículas com uma análise química semiquantitativa pontual.

Figura 27 – Microscopia realizada para o resíduo de lama vermelha.



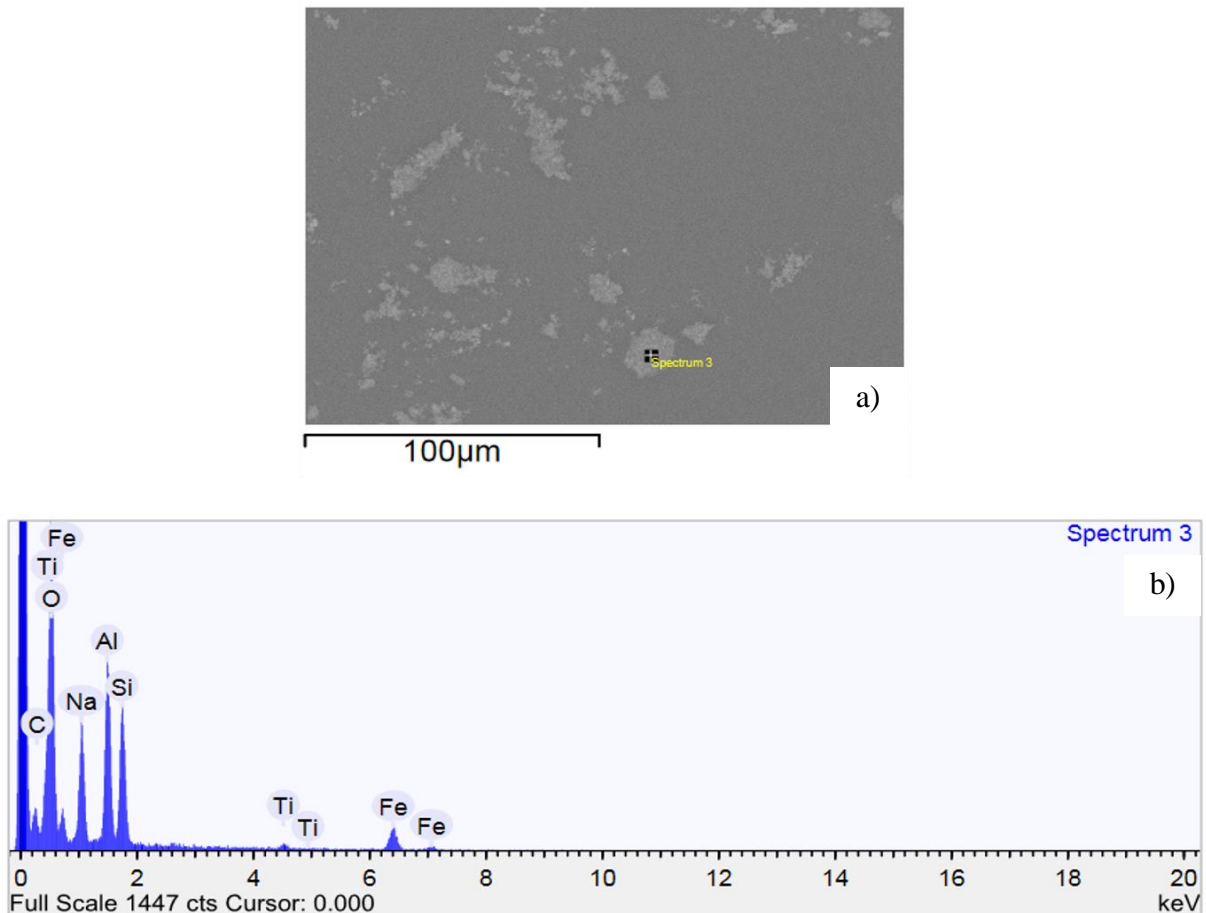
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Na Figura 27 é possível notar a dispersão de partículas finas com formas arredondadas e também irregulares e aglomerados de partículas com tamanhos menores. Alguns aglomerados porosos na forma de flocos maiores também estão presentes.

É possível que as partículas sólidas maiores pertençam ao grupo dos minerais de ferro ou a minerais presentes na bauxita que relativamente não sofreram alteração durante o processo de extração (hematita, quartzo), enquanto que as partículas mais finas e de menor tamanho em forma de flocos ou aglomerado porosos pertençam a aluminossilicatos, conhecidos como produtos de dessilicação, conforme é destacado nos trabalhos de Mercury (2010) e Santos (2016).

Em associação à análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada uma análise química pontual por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) na amostra do resíduo de lama vermelha. A Figura 28 apresenta a micrografia e demarca o ponto selecionado para análise química semiquantitativa por MEV/EDS.

Figura 28 – Análise MEV/EDS do resíduo lama vermelha: a) ponto de análise; b) espectrografia.

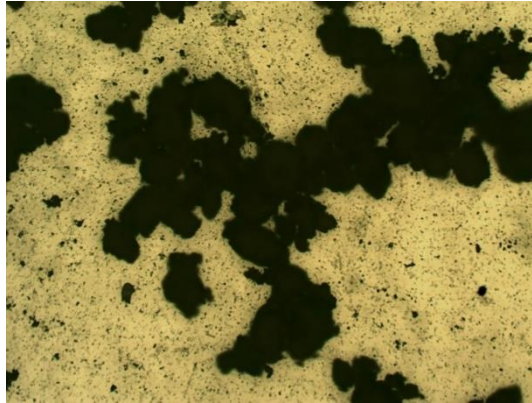


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De acordo com o gráfico de EDS (Figura 30b), foi possível identificar os elementos presentes na amostra. O ponto escolhido mostrou a presença de elementos característicos da constituição de argilominerais tais como ferro (Fe), titânio (Ti), oxigênio (O), silício (Si), Alumínio (Al), sódio (Na) e carbono (C). Os resultados mostram que os elementos presentes estão de acordo com os obtidos em estudos previamente realizados por Barbosa (2019).

A Figura 29 apresenta a microscopia óptica (MO), empregando luz visível que incide sobre a amostra e é refletida até o observador com aumento de 50x. Corroborando ao MEV pode-se verificar que o resíduo é constituído de partículas arredondadas de diversos tamanhos.

Figura 29 – Micrografia do resíduo lama vermelha com aumento de 50x.



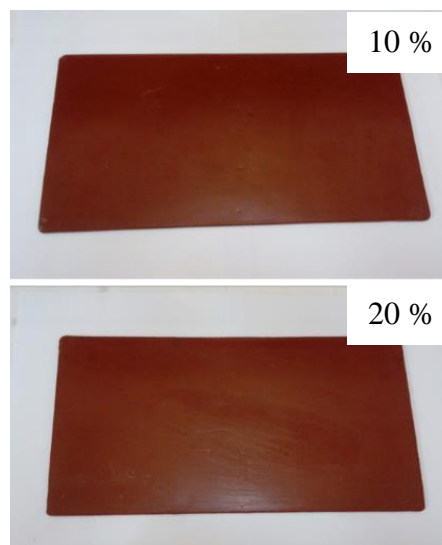
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

4.2 Viabilidade de confecção dos compósitos

Uma vez que as faixas granulométricas (0, 100, 200, 325 e 400 mesh) e composições foram estabelecidas, abrangendo as proporções de 0 %, 10 % e 20 % de massa de resíduo, foi possível constatar a viabilidade de confecção de compósitos através do método manual *hand lay up*, haja vista que estes apresentaram boa homogeneidade e distribuição do resíduo, boa aparência e bom acabamento superficial, resultando em placas com poucos defeitos, bolhas e vazios.

A Figura 30 exibe alguns compósitos obtidos após o processo de cura total, sendo possível observar a insignificância de defeitos, tais como trincas e outras deformidades que inviabilizariam sua aplicação.

Figura 30 – Compósitos fabricados após cura total.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Estas frações mássicas em volume de resíduo de lama vermelha foram escolhidas baseadas na viabilidade de confecção e em trabalhos anteriormente realizados, onde pôde-se observar que o resultado final era satisfatório. Trabalhos com frações acima de 40 % apresentaram dificuldade para homogeneização e preenchimento do molde, visto que a resina atingiu o tempo de gel antes do completo preenchimento do molde (ALMEIDA, 2020).

4.3 Caracterizações dos compósitos fabricados

4.3.1 Física

A caracterização física dos compósitos seguiu as normas e diretrizes estabelecidas e anteriormente citadas no tópico 3.3.4.

A Tabela 2 demonstra os resultados de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) obtidos para os compósitos poliméricos com resíduo de lama vermelha.

Tabela 2 – Resultados obtidos para os ensaios físicos dos compósitos.

Mesh (#)/ Composição (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (%)
Matriz plena	0,2815 ± 0,0520	0,3447 ± 0,0636	1,2243 ± 0,0007
LV 0 # 10 %	1,0894 ± 0,3704	1,3561 ± 0,4521	1,2469 ± 0,0082
LV 0 # 20 %	1,3005 ± 0,3042	1,7139 ± 0,3905	1,3191 ± 0,0096
LV 100 # 10 %	0,4813 ± 0,1850	0,6328 ± 0,2443	1,3139 ± 0,0040
LV 100 # 20 %	1,0032 ± 0,1548	1,3371 ± 0,2082	1,3325 ± 0,0077
LV 200 # 10 %	0,6021 ± 0,0610	0,7601 ± 0,0758	1,2625 ± 0,0052
LV 200 # 20 %	0,7799 ± 0,0892	1,0475 ± 0,1190	1,3432 ± 0,0019
LV 325 # 10 %	0,3654 ± 0,0478	0,4636 ± 0,0603	1,2688 ± 0,0011
LV 325 # 20 %	0,4680 ± 0,0408	0,6367 ± 0,0545	1,3605 ± 0,0026
LV 400 # 10 %	0,6094 ± 0,1593	0,7639 ± 0,1944	1,2554 ± 0,0099
LV 400 # 20 %	0,5662 ± 0,0451	0,7393 ± 0,0744	1,3044 ± 0,0463

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De acordo com a Tabela 2, há um aumento nos índices de absorção de água e porosidade aparente com a inserção tanto de 10 % quanto de 20 % do resíduo de lama vermelha. Ao relacionar a maior proporção de resíduo na matriz, com granulometria bruta, (LV 0 # 20 %) com a matriz plena, observa-se que AA e PA apresentam um aumento de cerca de 78,3 % e 79,9 %, respectivamente.

O aumento da absorção de água dos compósitos a partir da inserção do resíduo pode ser atribuído à presença de hidroxila na lama vermelha, que se origina do processo da Bayer durante a extração da alumina (KUNTIKANA E SINGH, 2017). Entretanto, com a diminuição da granulometria observou-se uma diminuição gradual de absorção de água e porosidade aparente. A composição com 325 mesh e 10 % apresentou os menores valores, chegando próximo aos da matriz.

Esses resultados correspondem ao que Melnyk (2018) observou quando utilizou a lama vermelha como carga de enchimento, notando uma dependência das propriedades do compósito com a quantidade de carga. Também observou uma diminuição de absorção de água com o aumento do resíduo inserido no polímero, além de um aumento de porosidade; o que o autor determinou como fatores de influência nas propriedades e na estrutura do compósito.

Segundo Fang *et al.* (2013), a absorção de água em compósitos ocorre principalmente por meio da presença de poros e através da interface entre as fases, o que pode indicar maior ou menor compatibilidade entre os componentes. Nesse sentido, o aumento dos índices relacionados a composição com granulometria bruta (zero mesh) pode ser explicado tanto pela hidrofília do resíduo, como também pelo método de fabricação manual utilizado para a fabricação do compósito, que possibilita o surgimento de vazios, trincas e defeitos internos.

Já a diminuição dos demais índices, pode estar ligada ao fato de que à medida que se diminuiu a granulometria do resíduo lama vermelha, se reduziu também a quantidade de partículas (sílica e hematita, por exemplo) que influenciam nas características hidrofílicas do compósito e que podem ter ficado retidas nas faixas granulométricas anteriores; o que pode indicar melhoria na incorporação entre as partículas e o polímero.

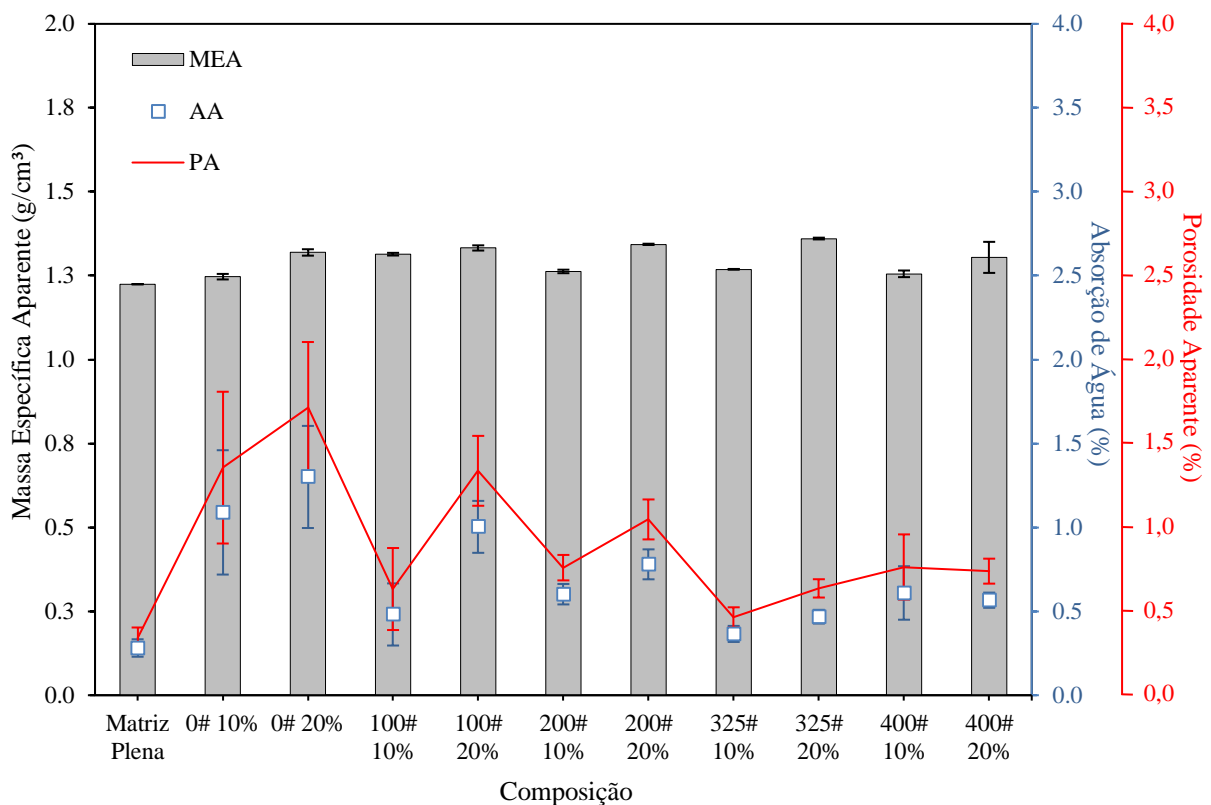
Dentre os resultados para MEA, à medida que se diminuiu a granulometria e se aumentou a proporção de resíduos houve uma tendência de aumento. A composição LV 325 # 20 % apresentou um crescimento de 3,1 % em relação a composição LV 0 # 20 %, e de 10,1 % em relação a matriz plena, e de. Isso pode estar relacionado com a massa específica estar diretamente proporcional a quantidade de lama vermelha presente na mistura, e pela massa específica do resíduo ser maior que da matriz. Além disso, pode estar relacionado a granulometria menor, possibilitando um condicionamento melhor das partículas.

Considerando que a MEA da resina utilizada é de aproximadamente $1,157 \text{ g/cm}^3$, e que a da lama vermelha é de aproximadamente $2,11 \text{ g/cm}^3$ (COSTA, 2016), os resultados estão de acordo com o exposto pela regra da mistura, a qual diz que as propriedades do novo material são resultado das características de seus constituintes separados e das frações volumétricas das fases, considerando estimativas aproximadas (CALLISTER, 2020).

De acordo com o trabalho realizado por Ferreira (2020), também foi possível observar a influência da variação granulométrica e quantidade de carga na massa específica de compósitos com cinza volante. O autor enfatiza que com o aumento do percentual em massa dos compósitos para 30 % de resíduo, ocorreu crescimento significativo, variando de 10 % à 17 %, na MEA para as granulometrias 100, 200, 325 e 400 mesh, quando comparados com a matriz plena. Estes resultados são similares com os obtidos para lama vermelha neste trabalho.

O Gráfico 1 demonstra um comparativo entre a matriz plena e os compósitos com adição e variação da granulometria de resíduo de lama vermelha em relação às suas propriedades físicas.

Gráfico 1 – Relação entre massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente dos compósitos com as diferentes granulometrias.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

4.3.2 Mecânica

4.3.2.1 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão dos compósitos seguiu as normas e diretrizes estabelecidas e anteriormente citadas no tópico 3.3.5. Através do ensaio de flexão em 3 pontos é possível observar nomeadamente a propriedade do limite de tensão de resistência à flexão (TRF), o que implica em determinar o desempenho de um material quando for flexionado. A Tabela 3 expõe os resultados obtidos no trabalho para este ensaio.

Tabela 3 – Resultados obtidos para os ensaios de flexão dos compósitos.

Mesh (#)/ Composição (%)	Tensão de Resistência à Flexão (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz plena	65,40 ± 6,06	1,80 ± 0,08	1,80 ± 0,13
LV 0 # 10 %	76,37 ± 16,13	3,03 ± 0,59	0,34 ± 0,21
LV 0 # 20 %	47,84 ± 2,42	1,82 ± 0,71	0,29 ± 0,21
LV 100 # 10 %	88,48 ± 9,64	2,90 ± 0,45	0,10 ± 0,02
LV 100 # 20 %	64,41 ± 9,03	3,26 ± 0,65	0,06 ± 0,01
LV 200 # 10 %	103,41 ± 4,99	3,57 ± 0,34	0,24 ± 0,14
LV 200 # 20 %	82,39 ± 9,95	2,70 ± 0,74	0,10 ± 0,03
LV 325 # 10 %	108,43 ± 2,64	2,77 ± 0,32	0,40 ± 0,18
LV 325 # 20 %	85,17 ± 7,24	2,36 ± 0,46	0,11 ± 0,02
LV 400 # 10 %	115,74 ± 14,69	3,07 ± 0,34	0,46 ± 0,08
LV 400 # 20 %	89,08 ± 7,27	2,41 ± 0,43	0,28 ± 0,19

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Por meio dos dados da Tabela 3, pode-se observar que as composições com frações não peneiradas de LV, com 10 % e 20 %, tiveram parâmetros mais aproximados do da matriz. Porém, nota-se um crescimento na TRF quando foi empregado 10 % de resíduo, e quando se utilizou 20 % de resíduo houve um desempenho inferior. Isso pode estar relacionado a saturação da matriz com a maior quantidade de LV, aumentando a massa específica e rigidez, além de impurezas e intertícios, resultando em uma perda na flexibilidade do compósito.

Os resultados obtidos por Prabu *et al.* (2012), ao investigar o efeito da adição de carga de lama vermelha nas propriedades mecânicas da resina de poliéster, indicaram que na propriedade de flexão, houve mudança significativa na resistência quando se adicionou mais de 20 % de lama vermelha. A redução na resistência à flexão foi de cerca de 34 % para o compósito com 45 % de lama vermelha em relação à resina pura, o que era esperado devido a uma provável má dispersão e compactação entre a lama vermelha e o poliéster.

Os resultados da Tabela 3 também demonstram que houve aumento da resistência à flexão de todas as composições, com exceção de LV 0 # 20 % e 100 # 20 %. Ou seja, as composições com 20 % de carga obtiveram os menores resultados de resistência a flexão dentre as demais, principalmente quando foi utilizada a granulometria bruta, com apenas 47,84 MPa. Esse resultado, abaixo até mesmo dos valores obtidos pela matriz, era esperado devido a essa faixa granulométrica ter obtido um maior resultado em relação a porosidade aparente, resultando em um aumento da probabilidade de interstícios, defeitos internos e aglomeração de partículas maiores e irregulares.

Joseph (2011) também corrobora com os resultados obtidos, pois em seu estudo afirma que a aglomeração de partículas com tamanhos aleatórios tende a reduzir a resistência de um material, haja vista que os aglomerados geralmente são pontos frágeis que atuam como concentradores de tensões. As aglomerações de partículas maiores, as quais contêm mais espaços vazios, dão origem a materiais mais fracos que acarretam uma depreciação da resistência à flexão quando comparados a compósitos com a homogeneização e dispersão de partículas menores.

A maior TRF obtida foi com a granulométrica de 400 mesh, com 115,74 MPa, quando se utilizou 10 % de LV; um aumento de 43,5 % quando comparada a matriz plena. Isso implica que houve boa compactação e homogeneização das partículas de lama vermelha com a resina, e que a lama vermelha atuou como um reforço eficaz dentro da matriz, acarretando uma melhoria na propriedade de resistência a flexão.

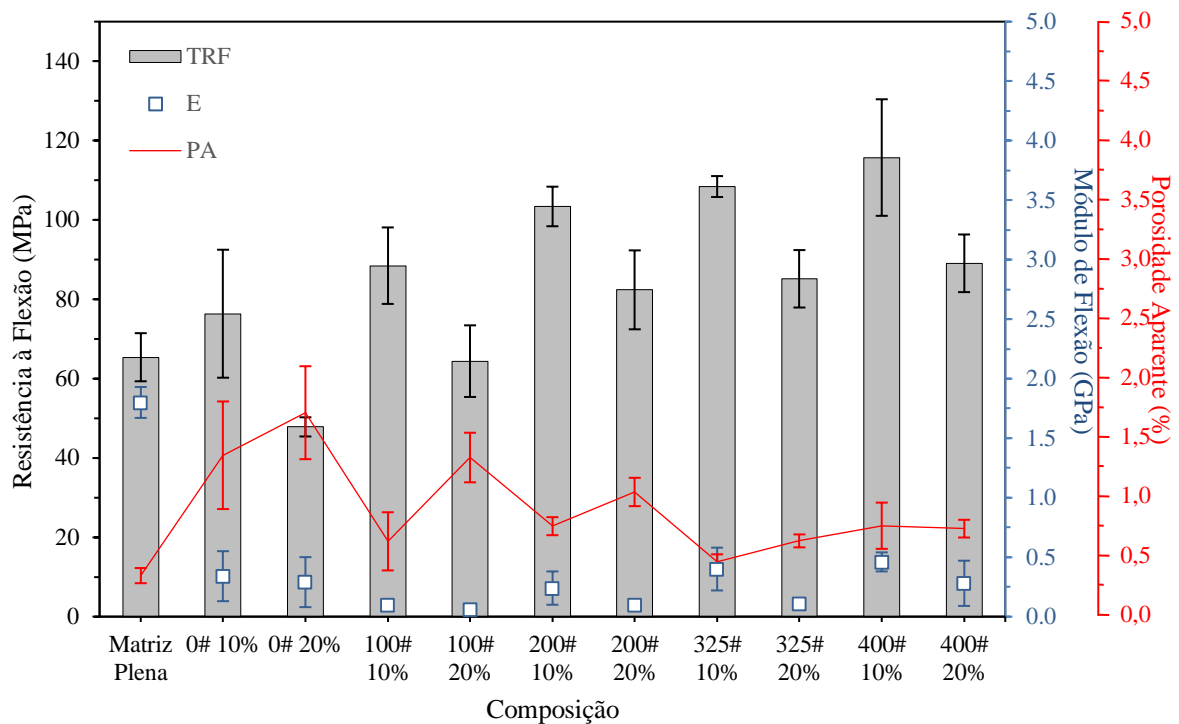
Esse comportamento está de acordo com o que Girimonte (2019) observou, onde as propriedades mecânicas de um material são influenciadas pela presença do particulado e que boas propriedades mecânicas são mais facilmente obtidas quando a carga se dispersa bem na matriz. Nesse sentido, uma menor abertura de malha para o peneiramento, que resulta em partículas menores e com maior área superficial, pode melhorar a interação com a matriz, ocasionando uma melhor distribuição de tensões no interior do compósito.

Segundo Garay (2010) a matriz perde flexibilidade com maiores teores de cargas inorgânicas e aumentam os pontos de falha, com isso diminui a resistência à flexão. Contudo,

pode-se perceber a influência benéfica da variação granulométrica quando há um crescimento na TRF a medida que se diminuiu a granulometria do resíduo. Comparando as composições que passaram pelo peneiramento de 100 mesh com as que passaram por 400 mesh houve um acréscimo tanto para a proporção de 10 % quanto para a de 20 % de resíduo.

O Gráfico 2 expõe o comparativo entre a tensão de resistência e módulo de elasticidade em função das granulometrias empregadas e o percentual de resíduo de lama vermelha.

Gráfico 2 – Relação da resistência à flexão dos compósitos com as diferentes granulometrias.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

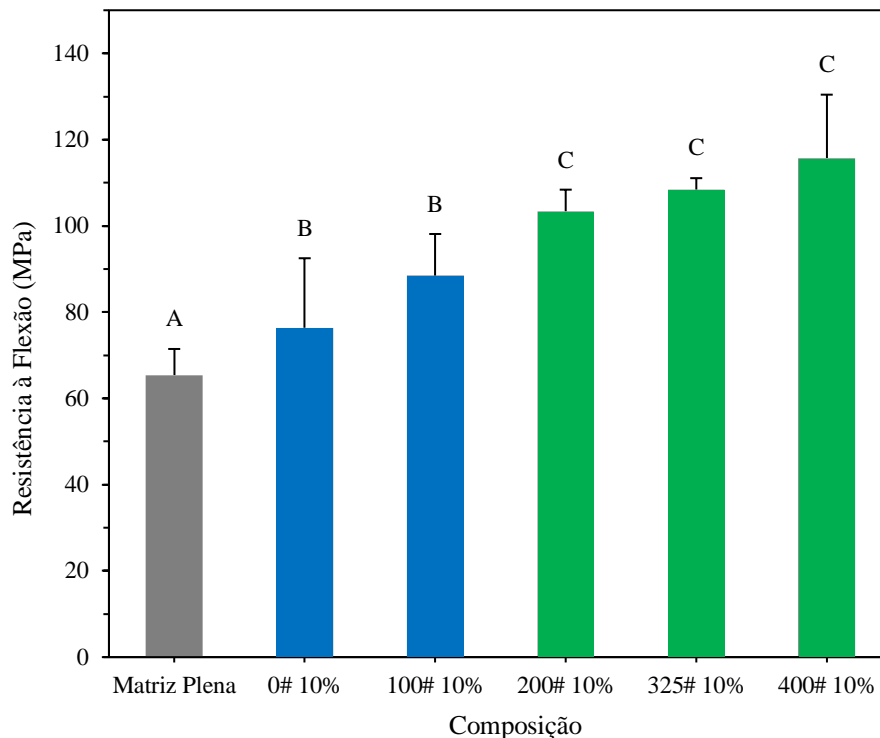
Os valores do módulo de elasticidade dos compósitos fabricados apresentaram ser menores em relação ao da matriz, em todas as faixas granulométricas, e em ambas frações mássicas empregadas. O que quer dizer que a rigidez do material diminuiu com relação a matriz plena, e nesse sentido a TRF foi melhorada consideravelmente.

Esse aumento na resistência à flexão pode ser atribuído ao preenchimento de vazios presentes nos compósitos pela adição da carga de como reforço. E o crescimento gradativo da resistência quando se variou as faixas granulométricas, pode ser explicado pela atuação dos agregados cada vez mais finos de lama vermelha. Chen *et al.* (2020) observou esse mesmo comportamento ao adicionar LV e resíduo papel xuan em compósitos com polietileno.

Além disso, Ashraf *et al.*, (2018) e Fu *et al.*, (2008) dizem que o teor ideal de enchimento, ou seja, a quantidade de lama vermelha em um compósito, seria de fato influenciado pelo tamanho médio de partícula, a distribuição de tamanho dessas partículas e a área de superfície específica dos enchimentos.

O Gráfico 3 apresenta o comparativo da resistência à flexão dos compósitos com 10 % de lama vermelha e da matriz, em todas as granulometrias empregadas, seguindo análise de variância (ANOVA) e o método Tukey Significant Difference (TSD). Através do Software livre PAST, a análise de variância indicou efeito significativo na granulometria, com valores de probabilidade de significância de 2,917 E-06.

Gráfico 3 – Comparativo de desempenho à flexão dos compósitos com a variação granulométrica, 10 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).

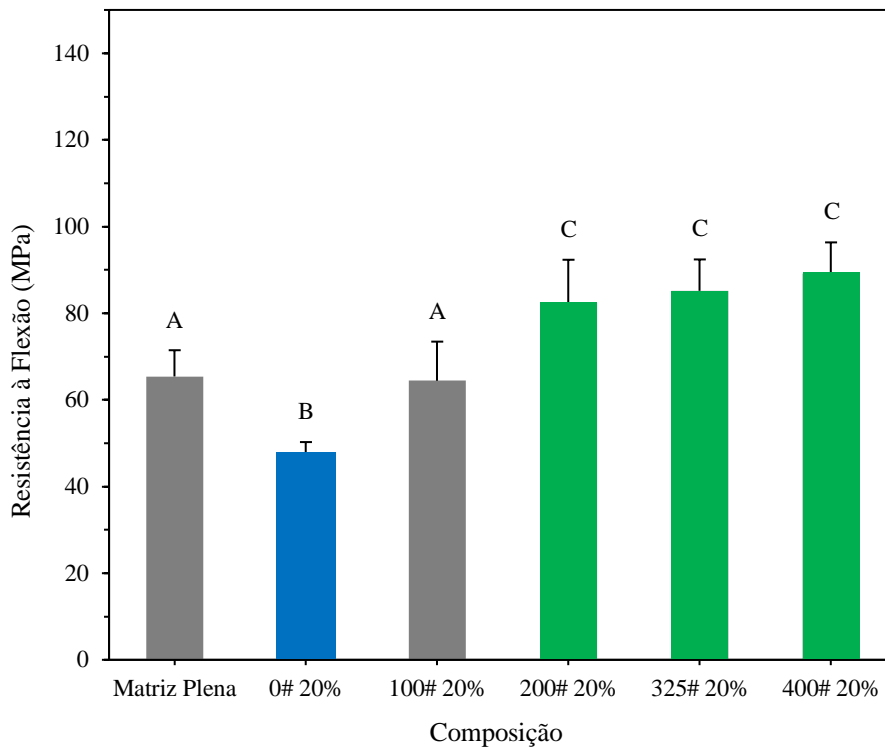


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O comparativo entre pares indica que o grupo C foi significativamente diferente dos grupos A e B. Nesse sentido, as granulometrias de mesh 200, 325 e 400 influenciaram diretamente no aumento da resistência à flexão, apesar de estatisticamente apresentarem ser equivalentes entre si. Contudo, a simples inserção de LV e a granulometria de 100 mesh (grupo Tukey B) também se mostraram influentes na melhoria da TRF e estatisticamente diferentes da matriz (grupo Tukey A).

O Gráfico 4 apresenta o comparativo da resistência a flexão dos compósitos e da matriz, em todas as granulometrias empregadas, mas com 20 % de lama vermelha. A análise de variância não indicou efeito significativo na granulometria, com valores de probabilidade de significância de 7,125 E-08.

Gráfico 4 – Comparativo de desempenho à flexão dos compósitos com a variação granulométrica, 20 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De acordo com os grupos Tukey, as granulometrias 200, 325 e 400 mesh (grupo C), e a fração não peneirada de resíduo (grupo B), se apresentaram estatisticamente diferentes da matriz plena (grupo A) também para as composições com 20 % de LV, o que valida a influência da variação da granulometria para estes compósitos. O grupo Tukey C novamente influenciou diretamente no aumento da TRF, todavia, a granulometria de 100 mesh e a matriz apresentarem ser estatisticamente equivalentes entre si.

O comparativo entre pares também mostrou que o grupo Tukey B é significativamente diferente dos outros dois grupos. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de os compósitos feitos com a granulometria bruta da lama vermelha conterem partículas de tamanhos variados e irregulares, aumentando a probabilidade de defeitos internos, trincas,

interstícios e bolhas, principalmente quando foi empregada a fração maior de carga com 20 % de LV.

A Tabela 4 exibe um comparativo entre a composição com granulometria de 400 mesh e 10 % de resíduo de lama vermelha, por ser a proporção que apresentou a TRF mais elevada em relação aos demais compósitos confeccionadas, com resultados encontrados por outros autores com composições diferentes.

Tabela 4 – Comparativo dos resultados de TRF com a literatura.

Composição	Fonte	Tensão de Resistência à Flexão (MPa)
LV 400 # 10 %	Este trabalho	115,74
CV 400 # 30 %	Ferreira (2020)	86,62
LV 25 %	Moraes (2019)	49,32
PP + 5 % PP-g-MA + 5 % argila	Gomes (2015)	39,9
Diatomita 20 %	Santos (2007)	33,3

Fonte: Adaptado dos autores citados, 2022.

Por meio das informações da Tabela 4, pode-se observar, que na granulometria empregada, os compósitos contendo lama vermelha obtiveram resultados de TRF superiores aos encontrados na literatura.

Entretanto, é importante salientar que a comparação dos resultados dessa pesquisa com a de outros autores é superficial, levando em conta que apenas este trabalho teve o intuito de avaliar a influência da granulometria da LV nas propriedades dos compósitos fabricados.

Além disso, foi observado no trabalho dos outros autores que eles focaram em observar os resultados principalmente a partir da fração mássica do material com qual trabalharam. Ademais, além da fração mássica, existem diversos fatores que podem influenciar nas propriedades mecânicas destes materiais, como: o método de fabricação, composição química da matriz e dos particulados, até mesmo os parâmetros utilizados nos ensaios.

4.3.2.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração dos compósitos também seguiu as normas e diretrizes estabelecidas e anteriormente citadas no tópico 3.3.5. O ensaio de tração permite medir as características de tensão de resistência à tração (TRT) do material, o que é um recurso importante quando se tem o objetivo de análise para posterior aplicabilidade. A Tabela 5 expõe os resultados obtidos neste trabalho para este ensaio.

Tabela 5 – Resultados obtidos para os ensaios de tração dos compósitos.

Mesh (#)/ Composição (%)	Tensão de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz plena	21,34 ± 7,06	6,49 ± 1,60	0,63 ± 1,57
LV 0 # 10 %	29,76 ± 8,04	8,38 ± 2,13	0,72 ± 0,08
LV 0 # 20 %	22,64 ± 8,93	5,77 ± 2,12	0,75 ± 0,11
LV 100 # 10 %	40,35 ± 3,63	11,61 ± 1,12	0,82 ± 0,05
LV 100 # 20 %	21,60 ± 5,23	6,60 ± 1,45	0,66 ± 0,06
LV 200 # 10 %	21,27 ± 4,88	6,26 ± 0,97	0,65 ± 0,06
LV 200 # 20 %	26,58 ± 5,07	7,55 ± 1,77	0,72 ± 0,04
LV 325 # 10 %	35,19 ± 10,28	8,32 ± 2,03	0,85 ± 0,08
LV 325 # 20 %	34,59 ± 3,82	7,48 ± 0,59	0,77 ± 0,38
LV 400 # 10 %	37,84 ± 5,41	4,83 ± 1,15	1,61 ± 0,15
LV 400 # 20 %	22,60 ± 2,11	2,72 ± 0,27	1,81 ± 0,29

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De acordo com os resultados obtidos, é possível perceber que houve um aumento das tensões de resistência, mesmo que mínimo, na maioria das composições utilizadas. Na maioria das composições, os compósitos com 10 % de lama vermelha apresentaram valores de TRT melhores do que os compósitos com 20 %, com exceção apenas na granulometria de 200 mesh.

Dentre os valores obtidos, o maior resultado de resistência observado foi com a granulometria de 100 mesh e 10 % de LV, apresentando uma resistência de 40,35 MPa. É válido ressaltar que esse valor significa um aumento de 47,11 % em relação a matriz plena.

Os melhores resultados apresentados de TRT para os compósitos com as granulometrias de 100, 325 e 400 mesh, e proporção mássica de 10 % de lama vermelha, podem estar ligados

a uma boa homogeneização, acomodação e disposição das partículas na matriz durante o processo de fabricação. Além disso, pode ter ocorrido que os compósitos dessas composições terem apresentado melhor acabamento, menos defeitos internos e menor porosidade do que os demais.

Nesse contexto, apesar de ter sido empregada uma variação com cinco granulometrias diferentes, era esperado que houvesse uma diminuição da TRT nas composições com 20 % de lama vermelha em relação as composições com 10 %. Isso se relaciona a maior probabilidade de defeitos e porosidade, haja vista que a matriz foi saturada com, aumentando a possibilidade de pontos de tensões residuais e interstícios com a maior aglomeração de particulados.

Essa relação pode ser observada a partir dos resultados obtidos nos ensaios físicos, onde as composições com 20 % de LV apresentaram os maiores resultados de porosidade aparente, o que pode influenciar negativamente a resistência à tração dos compósitos. O mesmo comportamento de diminuição gradativa da tensão, quando a proporção de resíduo de lama vermelha na resina é maior, foi observado nos ensaios de flexão.

Esse mesmo comportamento foi constatado por Zhang *et al.* (2011), que utilizou a lama vermelha nas proporções de 5 à 50 % como carga na matriz de polipropileno. O autor observou uma melhora na resistência à tração com as proporção de 0 à 15 % de LV, e um decréscimo a partir de 20 %. Ele atribuiu isso a boa dispersão do resíduo na matriz, pelo aumento das propriedades mecânicas. Contudo, nas concentrações acima de 15 %, o desempenho inferior foi atribuído a tendência de aglomeração da lama vermelha.

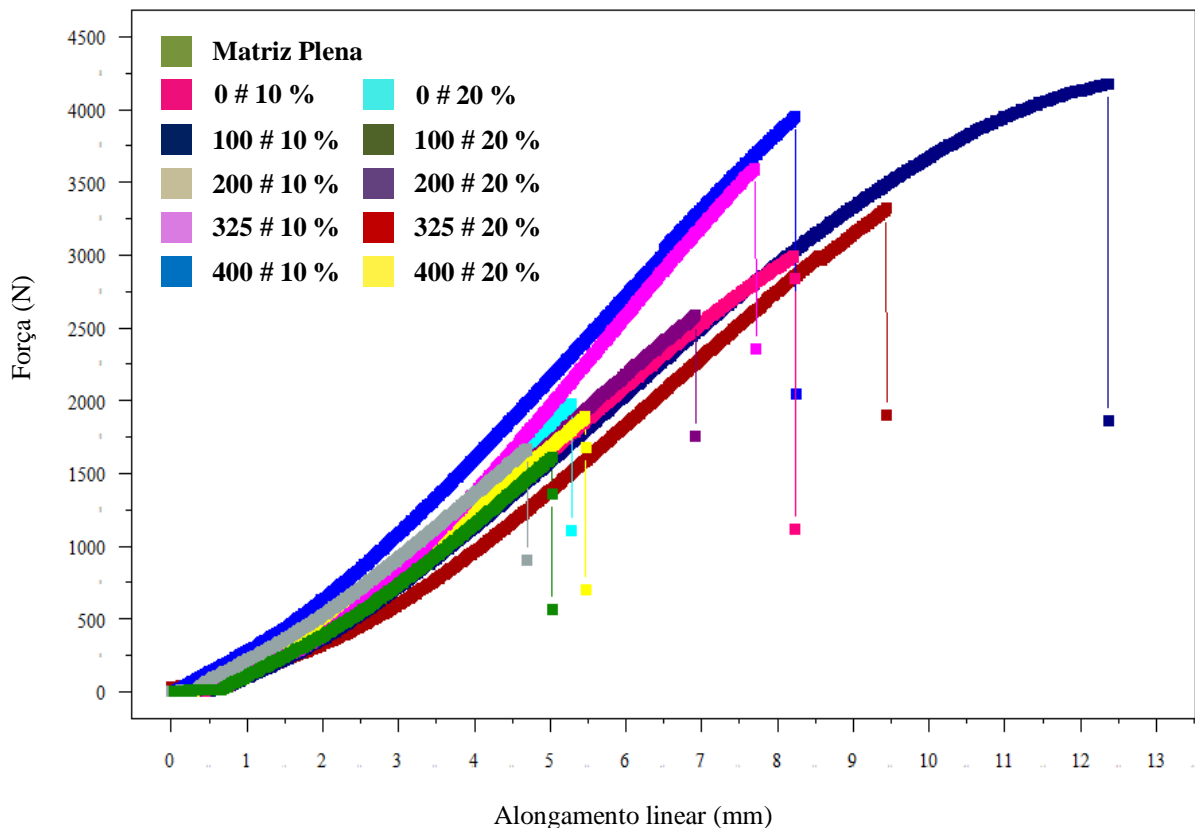
Segundo Liu (2015), a diminuição de resistência à tração e do alongamento até a ruptura, na maioria das granulometrias estudadas com 20 % de LV, também pode ser explicada característica hidrofílica da lama vermelha que pode resultar em microfissuras e descontinuidades. A incorporação de LV restringe a mobilidade molecular das cadeias poliméricas em compósitos e reduz a ductilidade da matriz. Ou seja, mais lama vermelha pode significar uma maior fragilidade dos compósitos, assim o alongamento até a ruptura também diminui com o aumento de LV.

Conforme as imagens obtidas pela MEV e MO (Figuras 28 e 29) do resíduo de lama vermelha, são observados aglomerados de partículas. Nesse sentido, essa a aglomeração também pode aumentar com a quantidade de carga de LV na resina. Esse fator pode levar à maiores concentrações de estresse, que pode ser a razão direta pela qual a resistência à tração dos compósitos declina com o aumento da inserção de lama mesmo com a variação da granulometria.

Em todas as granulometrias e proporções utilizadas, também ocorreu um aumento mínimo no módulo de elasticidade dos compósitos em relação a matriz de comparação. Isso indica que a lama vermelha, nesse caso, se comportou como reforço dentro da matriz, principalmente nas granulometrias de 100, 325 e 400 mesh quando se aplicou a proporção adequando de 10 % de resíduo. O que pode estar ligado a granulometria das partículas de reforço, por serem pequenas, que tendem a restringir o movimento da fase matriz próximo de cada partícula, e a matriz acaba transferindo parte da tensão aplicada às partículas (CALLISTER, 2020).

O Gráfico 5 relaciona a carga (N) a qual foram submetidos os corpos de prova, com todas as faixas granulométricas empregadas na pesquisa e suas respectivas frações mássicas. e o alongamento (mm) que sofreram mediante a solitação mecânica de tração.

Gráfico 5 – Relação carga x alongamento para as composições com resíduo de lama vermelha.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Através da exposição feita pelo gráfico, percebe-se que a composição de LV 100 # 10 % de resíduo suportou uma força superior as demais, aproximadamente 4200 N, sofrendo um alongamento de cerca de 12 mm. Além disso, percebe-se linearidade da curva durante o regime elástico, até o momento de uma queda brusca da carga aplicada, o que caracteriza que os compósitos apresentaram ruptura do tipo frágil.

É possível perceber, também, ao comparar as composições LV 400 # 10 % e LV 100 # 10 %, que as frações suportaram cargas semelhantes, acima de 4000 N. Porém, apesar da granulometria de 400 mesh ter mantido um patamar semelhante a faixa de 100 mesh, no âmbito da tensão de resistência à tração, ela obteve um parâmetro de alongamento inferior, o que acabou refletindo em um módulo de elasticidade 49,1 % maior (1,61 GPa), e resultando em um aumento de rigidez.

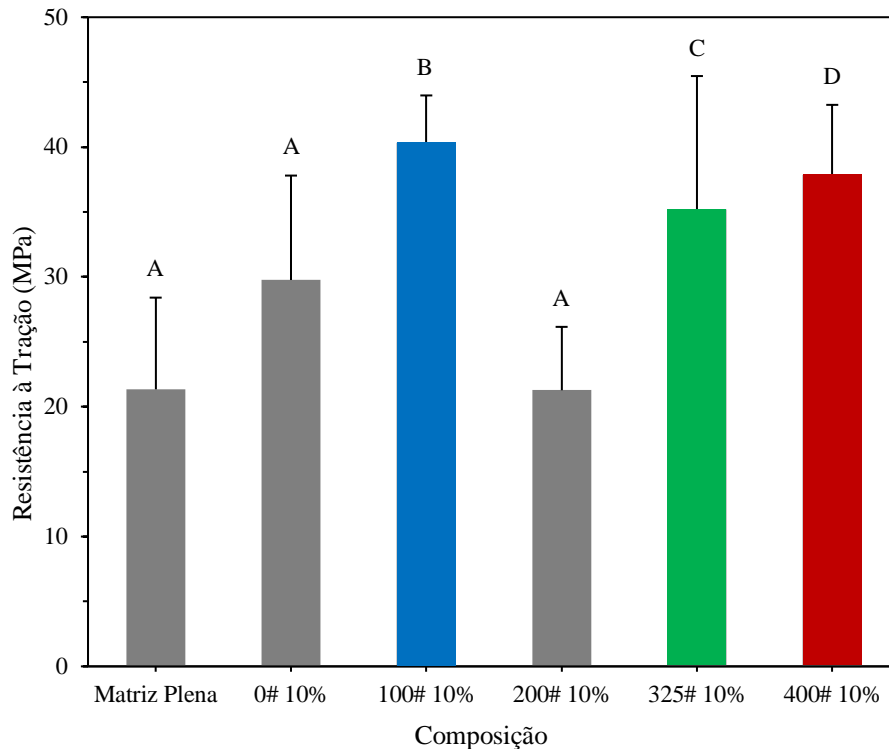
Satapathy *et al.* (2010) realizou experimentos em compósitos de poliéster isoftálico com frações mássicas de 10 à 30 % de lama vermelha, e observou a alteração no módulo de elasticidade de acordo com o teor de resíduo. Nesse sentido, o autor cita a possibilidade das fracas ligações químicas na interface partícula/matriz, e as formas irregulares da geometria das partículas, resultarem em concentrações de tensões na matriz poliéster e diminuir a capacidade de alongamento, e, conseqüentemente, aumentar a rigidez dos compósitos.

Dash, Thatoi e Sarangai (2010) também constataram essa mesma tendência para os valores do módulo de elasticidade quando comparam compósitos híbridos de fibras de juta e de vidro em matriz de resina epóxi, com e sem lama vermelha, e observaram que quanto maior a porcentagem de resíduo incorporado, maior o módulo de elasticidade.

Moraes (2019) e Queiroz (2019) também observaram um aumento na rigidez de compósitos e uma diminuição nos módulos de elasticidade ao fabricar compósitos de matriz polimérica com lama vermelha e ao fabricar compósitos híbridos, com a inserção de fibras metálicas.

O Gráfico 6 apresenta o comparativo da resistência à tração dos compósitos com 10 % de lama vermelha e da matriz, em todas as granulometrias empregadas, seguindo também a ANOVA e o método TSD, assim como nos ensaios de flexão. A análise de variância indicou efeito significativo na granulometria, com valores de probabilidade de significância de 3,205 E-03.

Gráfico 6 – Comparativo de desempenho à tração dos compósitos com a variação granulométrica, 10 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).



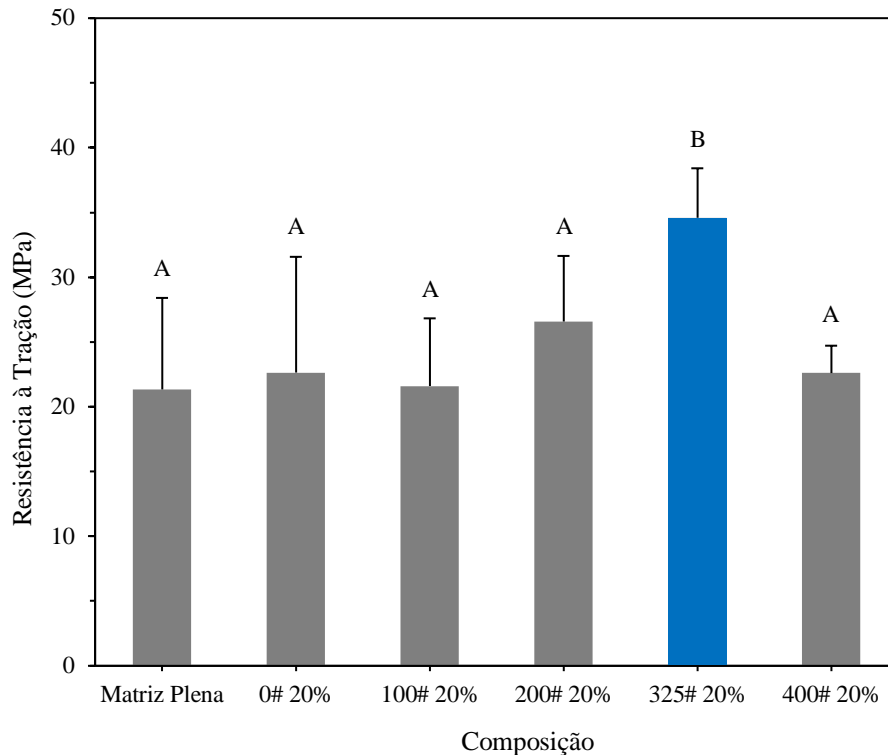
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Embora todas as granulometrias valores maiores que a resina plena para a TRT, a comparação dos pares indica que a granulometria bruta e a de 200 mesh mostraram-se significativamente equivalentes entre si e semelhantes a matriz (grupo Tukey A).

Entretanto, os grupos Tukey B, C e D, constituído por corpos de prova com as granulometrias de mesh 100, 325 e 400 mesh demonstrou ser estatisticamente diferentes das demais composições e diferentes também entre eles mesmo. É válido ressaltar que o grupo Tukey B, com composição de 100 # e 10 % de LV apresentou um comportamento em média superior aos demais, evidenciado pelo melhor resultado de TRT entre os demais compósitos.

O Gráfico 7 apresenta o comparativo da resistência a tração dos compósitos e da matriz, em todas as granulometrias empregadas, mas com 20 % de lama vermelha. A análise de variância não indicou efeito significativo na granulometria, com valores de probabilidade de significância de 8,289 E-02.

Gráfico 7 – Comparativo de desempenho à tração dos compósitos com a variação granulométrica, 20 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Por meio da análise de variância dos compósitos com 20 % de lama vermelha, ficou evidente que o único grupo significativamente diferente dos demais foi o grupo B, de modo que o compósito com granulometria de 325 mesh de resíduo de lama vermelha apresentou um comportamento em média superior aos demais.

As composições com granulometria bruta, 100, 200 e 400 mesh apresentaram resultados equivalentes, indicando que não há nenhuma diferença significativa entre elas. Dessa forma, pode-se inferir que as maiores proporções de resíduo de lama vermelha na matriz polimérica diminuíram significativamente a capacidade de resistir a forças de tração do material compósito.

Além disso, foi possível observar que, dentre as composições estudadas, a variação da granulometria não apresentou ser o principal efeito significativo na resistência à tração, mas sim a quantidade de resíduo aplicada.

Nesse sentido, a análise de variância indicou que ao passar de 10 % para 20 % de resíduo na matriz, na maioria das granulometrias, houve um comportamento de diminuição da TRT e equivalência entre as composições.

A Tabela 6 exibe um comparativo entre a composição de LV 100 # 10 %, por ser a proporção que apresentou a tensão de resistência à tração mais elevada em relação aos demais compósitos confeccionadas, com resultados encontrados por outros autores com composições diferentes.

Tabela 6 – Comparativo dos resultados de TRT com a literatura.

Composição	Fonte	Tensão de Resistência à Tração (MPa)
LV 100 # 10 %	Este trabalho	40,35
CV 400 # 30 %	Ferreira (2020)	30,40
LV 5 % FM 5%	Queiroz (2019)	38,50
Argila 15 %	Azevedo (2019)	23,05
HIPS com 5 % de LV	Barbosa (2019)	19,62

Fonte: Adaptado dos autores citados, 2022.

Por meio dos resultados encontrados por outros autores, é possível observar que os compósitos contendo o resíduo de lama vermelha, estão de acordo com os demais estudos realizados e superiores até mesmo a compósitos com caráter híbrido.

Ademais, é válido salientar novamente que essa comparação é superficial, considerando apenas os resultados obtidos para os limites de TRT. Nesse sentido, é importante lembrar mais uma vez que existem diversos fatores que podem influenciar nas propriedades mecânicas dos materiais, como: o método de fabricação, composição química da matriz e dos particulados, até mesmo os parâmetros utilizados nos ensaios.

4.3.3 Flamabilidade

A observação da característica de retardância à chama dos compósito fabricados seguiu as normas e diretrizes estabelecidas e anteriormente citadas no tópico 3.3.6.

A Tabela 7 demonstra os resultados de para os compósitos poliméricos com resíduo de lama vermelha de acordo com a variação da granulometria.

Tabela 7 – Resultados obtidos para os ensaios de flamabilidade dos compósitos.

Mesh (#)/ Composição (%)	Taxa de Propagação (mm/min)	Redução (%)
Matriz plena	22,60 ± 1,62	-
LV 0 # 10 %	20,07 ± 3,00	11,19
LV 0 # 20 %	16,64 ± 0,65	26,37
LV 100 # 10 %	19,33 ± 1,51	14,47
LV 100 # 20 %	16,32 ± 1,03	27,79
LV 200 # 10 %	22,22 ± 0,31	1,68
LV 200 # 20 %	16,32 ± 0,95	27,79
LV 325 # 10 %	18,43 ± 0,77	18,45
LV 325 # 20 %	15,00 ± 0,51	33,63
LV 400 # 10 %	17,85 ± 0,93	21,02
LV 400 # 20 %	13,02 ± 1,10	42,39

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De acordo com a Tabela 7, ficou evidente que o simples fato de acrescentar o resíduo de lama vermelha como carga de enchimento desencadeou uma melhora no desempenho de retardância à queima. Segundo Arslan (2018) esse comportamento é favorável, pois quanto maior for o tempo de queima do material, menor será a velocidade de propagação da chama, facilitando que medidas de reação/segurança sejam tomadas.

Apesar de matrizes poliméricas geralmente não apresentarem alta resistência à chama e por isso não serem indicadas para aplicações mais propensas a presença de fogo, a resina plena utilizada nos ensaios apresentou resultados adequados quando comparados aos exigidos pela ASTM D 635, que estabelece uma taxa de 40 mm/min. Um regresso de 67,45 %.

A menor taxa de propagação obtida foi com a granulometria de 400 mesh e 20 % de LV, com 13,02 mm/min, o que significou uma redução de 42,39 % em comparação à taxa da matriz polimérica. Em relação à norma do CONTRAN 498, cuja as especificações para a taxa de propagação no âmbito automobilístico é de 100 mm/min, há uma redução ainda mais significativa de 86,98 %.

Ficou evidente, também, que o tempo médio de queima das amostras fabricadas foi semelhante, nas proporções com as granulometrias maiores, quando comparados à resina plena. Porém, conforme se acrescentou resíduo, e variou-se as granulometrias utilizadas, na matriz

polimérica pôde-se observar uma diminuição da taxa de queima, demonstrando que à medida que se aumenta a porcentagem de resíduo na matriz e se diminui a granulometria, há uma diminuição considerável na taxa de queima. O que ratifica que o resíduo, em quantidades mais elevadas, pode ter atuação de retardante de chamas.

Todavia, aumentar demais o nível de carga retardante ao fogo pode não só aumentar o custo de um material, mas também depreciar propriedades mecânicas. É preferível usar uma proporção de resíduo mínima e eficaz (PHAM, 2019). Portanto, as frações mássicas de LV nos compósitos usados para os ensaios de flamabilidade neste trabalho foram selecionadas considerando também as propriedades mecânicas apresentadas anteriormente.

Pôde-se analisar, também, que a proporção de 20 % apresentou valores menores que a de 10 % comparando os resultados de todas as cinco granulometrias empregadas. Desse modo, fica evidente uma correlação entre a melhoria das propriedades antichamas com a diminuição da granulometria da lama vermelha e quantidade de resíduos aplicados em matrizes poliméricas.

Os polímeros, que são à base de materiais com hidrocarbonetos, geralmente são inflamáveis e contribuir para a propagação do fogo quando entram em contato com as chamas. Nesse sentido, as matrizes epóxi são vantajosas devido a sua facilidade de processamento e as suas propriedades química e de resistência térmica.

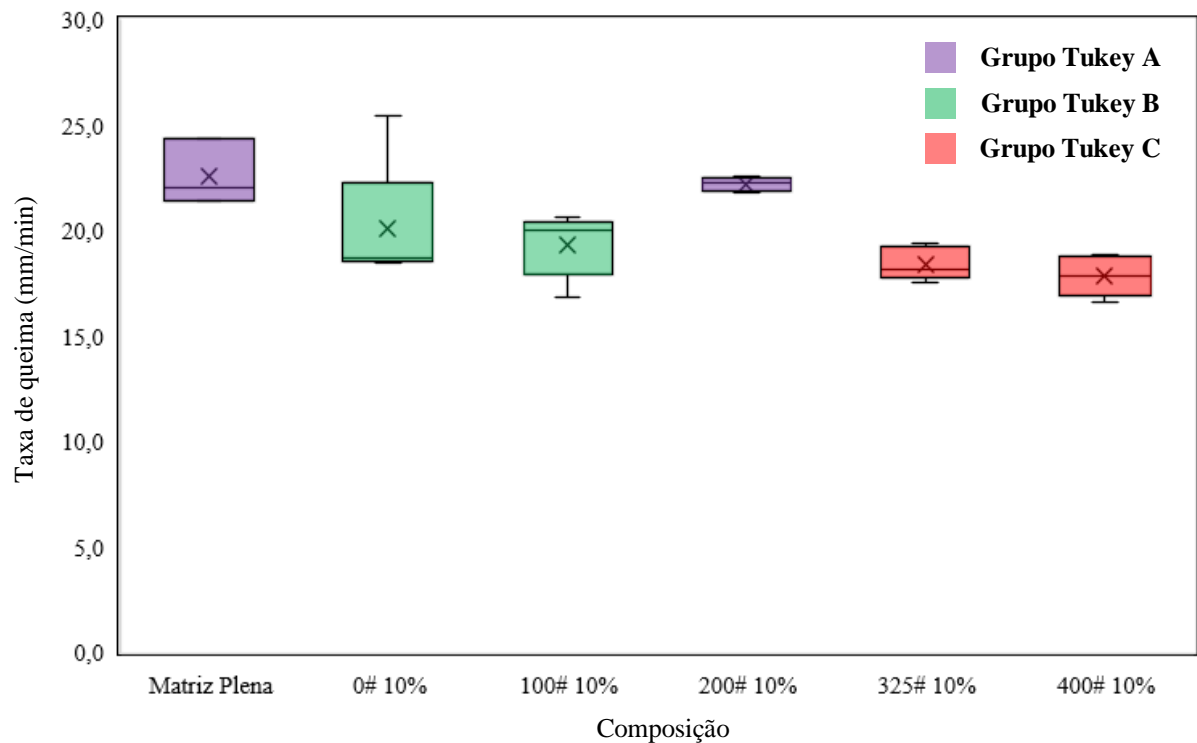
No entanto, como a maioria dos materiais poliméricos, a principal desvantagem termofixos epóxi é a inflamabilidade, o que limita a aplicação em muitas áreas, como veículos de transporte (aviões, barcos, ônibus, dentre outros) onde é necessária alta retardação de chama (CHENG, 2019).

Nesse contexto, trabalhos como o de Kusakli (2020) também observou que ao aplicar lama vermelha, com diferentes frações mássicas, em resina epóxi a área queimada do epóxi diminuiu à medida que foi reforçado com os aditivos LV.

Zhang et al. (2018) também verificou a propriedade de retardância à chama quando expôs a testes de combustão compósitos de poliuretano e lama vermelha, e observou que estes tiveram o desempenho acentuadamente melhor do que o poliuretano puro. Em outro estudo de Qian (2019), a taxa de liberação de calor do copolímero de etileno vinil acetato diminuiu 72,9 % devido à adição de 50 % em peso de lama vermelha.

O Gráfico 8 apresenta o comparativo das taxas de queima dos compósitos com 10 % de lama vermelha e da matriz, em todas as granulometrias empregadas, seguindo também a ANOVA e o método TSD, assim como nos ensaios mecânicos. A análise de variância indicou efeito significativo na granulometria, com valores de probabilidade de significância de 7,743 E-03.

Gráfico 8 – Comparativo de desempenho à flamabilidade dos compósitos com a variação granulométrica, 10 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).

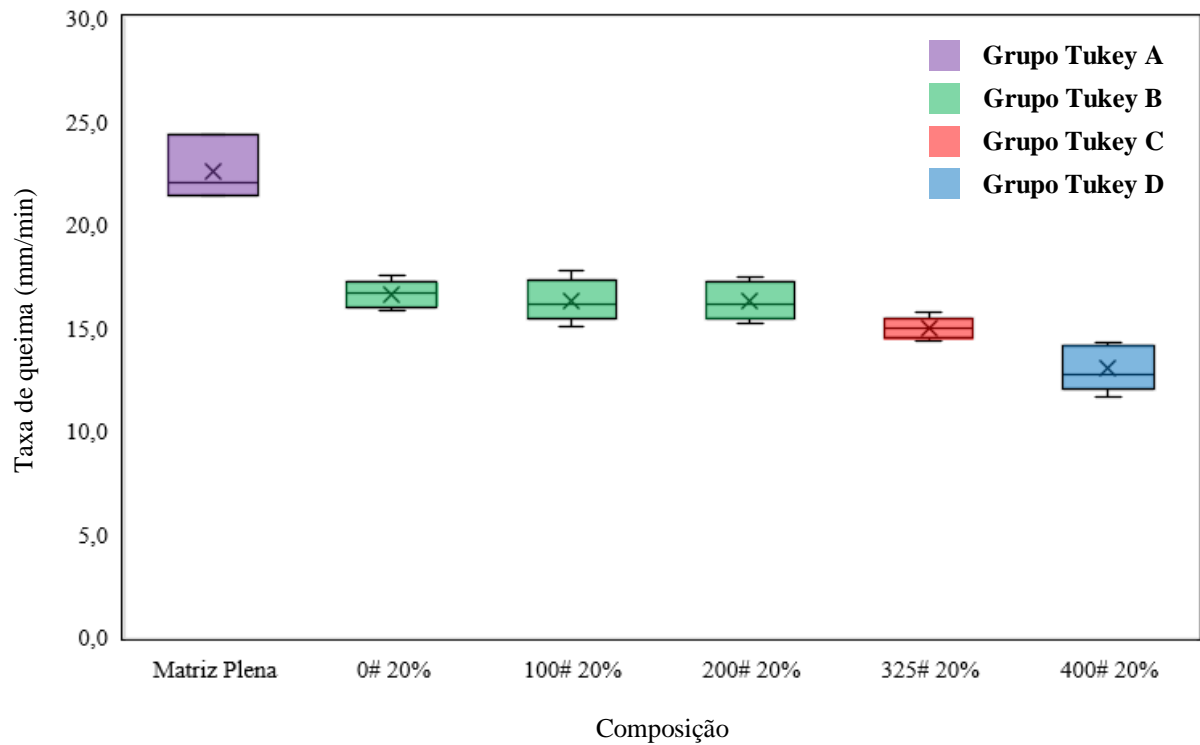


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Através dos resultados expostos pelos boxplots, é possível perceber que apenas a composição com 200 mesh não diferiu estatisticamente da resina (grupo A). Porém, as demais composições com granulometrias diferentes (grupos B e C) apresentaram ter um efeito significativo para a taxa de queima mesmo utilizando apenas 10 % de resíduo.

O Gráfico 9 apresenta o comparativo das taxas de queima dos compósitos e da matriz, em todas as granulometrias empregadas, mas com 20 % de lama vermelha. A análise de variância não indicou efeito significativo na granulometria, com valores de probabilidade de significância de 1,738 E-05.

Gráfico 9 – Comparativo de desempenho à flamabilidade dos compósitos com a variação granulométrica, 20 % de LV e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os boxplots demonstram que o aumento da proporção de lama vermelha na matriz e a diminuição gradativa da granulometria, a taxa de queima dos compósitos tende a diminuir consideravelmente.

Por meio da análise de variância dos compósitos, ficou perceptível que as composições com faixa granulométrica bruta, 100 e 200 mesh, pertencentes ao grupo B, não diferem significativamente entre si. Contudo, os grupos C e D, com granulometria de 325 e 400 mesh e 20 % de lama vermelha se diferem tanto entre si quanto em relação a matriz, apresentando a taxa de queima inferior aos demais.

Nesse sentido, o comportamento dos compósitos, quando submetidos aos ensaio de flamabilidade, demonstra que a variação da granulometria apresentou ter efeito significativo na resistência à chama em ambas as frações mássicas destacadas.

A diminuição da taxa de queima ainda mais acentuada quando se utilizou 20 % de LV, pode estar relacionada ao fato de o resíduo de lama vermelha conter fases como a gibbissita, constituída de partículas de alumina “tri-hidratada”, e a hematita, com elevadas proporções de óxido de ferro. O que pode influenciar significativamente nas propriedades térmicas dos compósitos poliméricos, e também corrobora a relação entre a composição química dos

resíduos e a sua contribuição para a diminuição da propagação da chama durante o processo de combustão (CUNHA, 2015).

A Tabela 8 exibe um comparativo entre a composição de LV 400 # 10 %, por ser a proporção que apresentou a menor taxa de queima em relação aos demais compósitos confeccionadas, com resultados encontrados por outros autores com compósitos poliméricos diferentes.

Tabela 8 – Comparativo dos resultados da taxa de queima com a literatura.

Composição/material	Fonte	Taxa de Propagação (mm/min)
LV 400 # 10 %	Este trabalho	13,02
P.I./Cobre 10%	ELBANA (2017)	14,51
Polietileno	ASTM D 635	15,20
P.I./CV 25 %	ALMEIDA <i>et al.</i> (2019)	20,18
Polietileno de alta densidade	OLIVEIRA <i>et al.</i> (2017)	26,90
Polietileno Tereftalato	ASTM D 635	192,00

Fonte: Adaptado dos autores citados, 2022.

Através dos resultados encontrados na literatura, nota-se que a taxa de queima dos compósitos contendo o resíduo de lama vermelha, estão de acordo com os demais estudos realizados e até mesmo bastante inferior a alguns deles.

Ademais, é válido ressaltar mais que essa comparação é superficial, considerando apenas os resultados obtidos para as taxas de retardância à chama e desconsiderando os processos de fabricação e composição dessas referências.

5 CONCLUSÕES

A produção dos compósitos foi satisfatória, pois os compósitos apresentaram poucos defeitos e boa uniformidade, ratificando que o método de fabricação *hand lay-up* foi eficiente, que houve uma boa compatibilidade dos resíduos de lama vermelha com a matriz polimérica, e que as proporções mássicas de 10 % e 20 % são viáveis para produção.

As análises obtidas por Difração de Raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura do resíduo de lama vermelha mostraram composições mineralógicas e morfológicas já esperadas. Os picos mais intensos foram de hematita e sodalita, e os elementos mais evidentes foram ferro e titânio. Essas características são condizentes com as demonstradas na literatura pesquisada.

No que diz respeito aos ensaios físicos, a diminuição da granulometria indicou uma diminuição gradual de absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA), com a composição com 325 mesh e 10 % apresentando os menores valores, chegando próximo aos da matriz. A massa específica aparente (MEA), a composição com o mesmo mesh, porém com fração mássica de 20 %, apresentou um crescimento de 10,1 % em relação a matriz.

Sobre as caracterizações de resistência mecânica, houve um aumento da resistência à flexão de todas as composições e granulometrias, com exceção de LV 0 # 20 % e 100 # 20 %. O melhor resultado apresentou uma ampliação de mais de 43 % em relação a resina de comparação. Além disso, ficou evidente um crescimento maior na TRF quando foi empregado 10 % de resíduo do que quando se utilizou 20 %, que apresentou um desempenho inferior.

Os resultados de resistência à tração também demonstraram ser favoráveis, com o melhor resultado significando um aumento 47 % em relação a matriz. Contudo, observou-se que, dentre as composições estudadas, a variação da granulometria não apresentou ser o principal efeito significativo na resistência à tração, mas sim a quantidade de resíduo aplicada. E que ao passar de 10 % para 20 % de resíduo na matriz, na maioria das granulometrias, houve um comportamento de diminuição da TRT.

Ademais, a flamabilidade dos compósitos fabricados indicou taxas de queima baixas o suficiente para serem utilizados como bons resistentes à chama. A menor taxa de queima obtida com a composição de 400 # e 20 % de LV se destacou, principalmente quando comparadas as normas ASTM D 635 e CONTRAN 498, com um regresso de 67,45 % e 86,98 %, respectivamente. Diante disso, ficou evidente que a variação da granulometria influenciou nas propriedades dos compósitos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolver trabalhos analisando a variação granulométrica do resíduo de lama vermelha associada a inserção de fibras naturais e sintéticas;
- Verificar a viabilidade de confecção de compósitos com proporção mássica de 15 % de lama vermelha, com faixas granulométricas diferentes;
- Analisar a influência da variação granulométrica com resíduos diferentes;
- Realizar análises fractográficas, por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura, em amostras ensaiadas mecanicamente, para avaliar os mecanismos de falha.

REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, <http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao>. Acessado em maio de 2020.

AFINKO - <https://afinkopolimeros.com.br/servicos/ensaios-laboratoriais/ensaios-mecanicos/>. Acessado em maio de 2020.

ASTM D 2734 – Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2009.

ASTM D 3039 – American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Philadelphia, 2017.

ASTM D 570 – Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1998.

ASTM D 635 – Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM D 790 – "Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2017.

ASTM D 792 – Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.

ALAM, S., Das, S. K., & Rao, B. H. **Characterization of coarse fraction of red mud as a civil engineering construction material**. Journal of Cleaner Production, 168, 679–691. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.210>. Acessado em julho de 2022.

ALMEIDA, L. R.; FERREIRA V.H.; OLIVEIRA, G. C.; COELHO, H. C. M.; COSTA, D. S.; PINHEIRO, A. P.; COSTA, D. S. **Reaproveitamento de resíduos em compósitos poliéster: influência das cinzas nas propriedades mecânicas e térmica**. In: Engenharia no Século XXI, Volume 3. 1. Ed. Belo Horizonte: Poisson, 2019. Cap. 4, p. 23 - 29. Doi:10.5935/978-85-7042-091-6.

ALMEIDA, Lucas Rezende de. **Reaproveitamento do resíduo de minério de ferro em compósitos de matriz polimérica**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2020.

ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F.T.; NAVARRO, G. R. B.: **Caracterização da Lama Vermelha Brasileira (Resíduo do Refino da Bauxita) e Avaliação das suas Propriedades para Futuras Aplicações**. 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2011.

ARROYO, F., LUNA-GALIANO, Y., LEIVA, C., VILCHES, L. F., & FERNÁNDEZ-PEREIRA, C. **Environmental risks and mechanical evaluation of recycling red mud in bricks**. *Environmental Research*, 186(April), 109537. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109537>. Acessado em julho de 2022.

ARSLAN, S. H.; B. ÇELIKEL, M. BAYGÜL, G. K. DEMIR, **In Bauxite Residue Valorisation and Best Practices Conference**, Athens, Greece 2018, p. 53.

ASHRAF, Muhammad Aqeel et al. Effects of Size and Aggregation/Agglomeration of Nanoparticles on the Interfacial/Interphase Properties and Tensile Strength of Polymer Nanocomposites. **Nanoscale Research Letters**, v. 13, n. 1, 17 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2624-0>. Acesso em novembro de 2022.

AZEVEDO, Amanda Chaves de. **Influência da incorporação de argila e tecidos de fibra de juta (Corchorus capsularis) nas propriedades mecânicas e de flamabilidade de compósitos poliméricos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

BAGHERPOUR, S.; BAGHERI, R.; SAATCHI, A. Effects of concentrated HCl on the mechanical properties of storage aged fiberglass polyester composite. **Materials and Design**, vol. 30, nº 2, p. 271-274, 2009.

BABISK, M. P., AMARAL, L. F., RIBEIRO, L. D. S., VIEIRA, C. M. F., PRADO, U. S. DO, GADIOLI, M. C. B., OLIVEIRA, M. S., LUZ, F. S. DA, MONTEIRO, S. N., & GARCIA FILHO, F. D. C. **Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction**. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2186–2195. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.049>. Acessado em julho de 2022.

BABISK, Michelle Pereira. **Incorporação de lama vermelha em cerâmica vermelha**. Tese de Doutorado – Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2015.

BAGHERPOUR, S.; BAGHERI, R.; SAATCHI, A. Effects of concentrated HCl on the mechanical properties of storage aged fiberglass polyester composite. **Materials and Design**, vol. 30, nº 2, p. 271-274, 2009.

BARBOSA, Juliana Thomaz Lefloch. **Caracterização de compósitos poliméricos feitos com resíduos pós-consumo (poliestireno de alto impacto) e industriais (lama vermelha e fibra de vidro/resina epóxi)**. Dissertação de Mestrado – Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2019.

BISWAS, S.; SATAPATHY. A Comparative Study on Erosion Characteristics of Red Mud Filled Bamboo-Epoxy and Glass-Epoxy Composites. **Journal of Materials and Design**, v. 31, n. 4, p. 1752-1767, 2010.

CALLISTER JR., William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2020. 866 p.

CAMPBELL, F. C. Introduction to Composite Materials. In: Structural composite materials. **ASM International**, 2010. p. 1-10.

CANDIDO, Verônica Scarpini; SOUZA, Paulo Victor Campos; SANTOS, Lesley Glenda Sales dos; CUNHA, Edinaldo José de Sousa. **Estudo comparativo da granulometria da lama vermelha de bauxita visando a aplicação em compósitos de matriz polimérica**, p. 3555-3560. In: 72nd ABM Annual Congress, São Paulo, 2017.

CHAGAS, G. M.; RESENDE, E. C.; GUERREIRO, M. C. Preparo de Material a partir de Lama Vermelha Impregnada com Fe(III) e Aplicação em Processos Oxidativos Avançados. **Revista Virtual de Química.**, 2018, 10 (1), 37-49.

CHEN, Chen et al. **Incorporation of Xuan-paper waste residue in red mud/waste polyethylene composites**. Journal of Hazardous Materials, v. 399, p. 123051, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123051>. Acessado em junho de 2022.

CHENG, Kuo-Chung; KUO, Tzu-Hsuan. Flame retardant and mechanical properties of epoxy composites with ammonium polyphosphate and hyperbranched silicon-containing polymers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 28, p. 48857, 26 dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.48857>. Acessado em março de 2022.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). Resolução n°. 498 - "**Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos nacionais ou importados.**", Código de Trânsito Brasileiro – CTB, 29 de julho de 2014.

COSTA, Deibson Silva. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais**. 2016. 228 f. Tese de Doutorado – Engenharia de Recursos Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

COSTA, D.S. et.al. **Aproveitamento da lama vermelha e fibras vegetais (sisal e juta) em compósitos poliméricos**. Congresso Brasileiro de Cerâmica. Águas de Lindoia, São Paulo, 2016.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. Editora Edgard Blucher Ltda., 2002.

CUNHA, E.J.S.; MIRANDA, R.M.; SOUZA, J.A.S; OLIVEIRA, M. Jr. A. Influence of the addition of red mud from Bayer process in polymer matrixes of isophthalix polyester. **International Comitee for the Study of Bauxite Alumina Aluminium – ICSOBA (2012)**.

CUNHA, E. J. S. **Influência do uso do resíduo do processo bayer nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de base polimérica reforçados com fibra de curauá (ananás lucidus)**. 2015. Tese de Doutorado – Engenharia de Recursos Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

DASH, A.K.; THATOI, D.N.; SARANGI, M.K. Analysis of the mechanical characteristics of red mud filled hybridized composites. **Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering (FAME)**, p. 8-11, 2010.

DAVALLO, M.; PASDAR, H.; MOHSENI, M. Mechanical properties of unsaturated polyester resin. **International Journal of Chem Tech Research**, v. 2, p. 2113-2117, 2010.

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

FERREIRA, Victor Hugo Mafra Monfredo. **Caracterização de compósitos poliéster com cinzas volantes**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2020.

FREITAS, M.; PIANARO, S. A.; NADAL, F. N.; TEBCHERANI, S. M.; BERG, E. A. T. Preparação e caracterização de materiais compósitos SiC/caulim/Al via “squeeze-casting”. **Cerâmica**, 55 (2009) 271-280.

FU, Shao-Yun et al. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 39, n. 6, p. 933-961, set. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2008.01.002>. Acessado em fevereiro de 2022.

GARAY, C. A. **Efeito da adição de carbonato de cálcio em compósitos poliméricos moldados por RTM e RTM-Ligth**. Dissertação de Mestrado – Programa de pós graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

GOMES, Leila Verônica da Rocha. **Preparação e caracterização de nanocompósitos de polipropileno reforçados com argila verde lodo e fibra da castanha-do-Brasil**. 89 p. Tese de Doutorado – Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GIRIMONTE, R.; FORMISANI, B.; VIVACQUA, V. Application of the theory of binary fluidization to solids of irregular shape: Choosing the granulometry of sand in processes for energy production from wastes of the olive oil industry. **Powder Technology**, v. 345, p. 563-570, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.054>. Acessado em janeiro de 2022.

HYDRO, <https://www.hydro.com/pt-BR/produtos-e-servicos/bauxita-e-alumina/bauxita>. Acessado em abril de 2020.

HYDRO, <https://www.hydro.com/pt-BR/produtos-e-servicos/bauxita-e-alumina/alumina>. Acessado em abril de 2020.

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCOTT, S.C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces**. p. 359–374. 1999.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração, <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>. Acessado em julho de 2022.

IOM3 – Institute of Materials, Minerals and Mining, <http://www.iom3.org>, Acessado em fevereiro de 2020.

JENA, H.; SATAPATHY, A.K. Fabrication mechanical characterization and wear response of hybrid composites filed with red mud: an alumina plant waste. **Proceedings of International Conference on Advances in Mechanical Engineering**, 2011.

JOSEPH, S., Bambola, V. A., Sherhtukade, V. V., & Mahanwar, P. A. **Effect of flyash content, particle size of flyash, and type of silane coupling agents on the properties of recycled poly (ethylene terephthalate)/flyash composites**. *Journal of Applied Polymer Science*, 119(1), 201-208 (2011).

KOCSEHA, I., HAMZA, A., & GÉBER, R. **The effects of red mud on clay compounds**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 426 (1). 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/426/1/012026>. Acessado em julho de 2022.

KUNTIKANA, G., SINGH, D.N., 2017. **Contemporary issues related to utilization of industrial by-products**. *Adv. Civ. Eng. Mater.* 6 (1), 444–479.

KUSAKLI, Sefa et al. Improving the flame retardancy and mechanical properties of epoxy composites using flame retardants with red mud waste. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, n. 13, p. 50106, 22 out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.50106>. Acessado em fevereiro de 2022.

LIMA, R. M. F.; LUZ, J. A. M. Análises granulométricas por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. **Rev. Esc. Minas**. vol.54 nº 2, Ouro Preto, 2001.

LIU, L.; ZHANG, Y.; LV, F.; YANG, B.; MENG, X. Effects of red mud on rheological, crystalline, and mechanical properties of red mud/PBAT composites. **Polym. Compos.**, 37: 2001-2007. Doi: 10.1002/pc.23378. 2016.

LIU, Leipeng et al. Effects of red mud on rheological, crystalline, and mechanical properties of red mud/PBAT composites. **Polymer Composites**, v. 37, n. 7, p. 2001-2007, 7 fev. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.23378>. Acessado em dezembro de 2021.

LOKESH K. S., BANDU UMMAJI, GURURAJ P., K. RAYAPPA, YASHAVANTHA J., Effect of Red Mud Particles on Scratch Resistance of Aluminum Based Metal Matrix Composites, **American Journal of Aerospace Engineering**. Vol. 5, No. 1, 2018, pp. 24-29. Doi: 10.11648/j.ajae.20180501.14

MANO, E.B.; et al. Polyolefin composites with curaua fibres: Effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions. **Composites Science and Technology**, v. 70, p. 29-35, 2010.

MANFROI, Eliz Paula. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. Dissertação de Mestrado – Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MORAES, Mario Henrique Moreira; QUEIROZ, Diogo Pontes de; NASCIMENTO, Luiz Gabriel da Silva; SOUZA, José Antônio Silva; FUJIYAMA, Roberto Tetsuo; COSTA, Deibson Silva da. Caracterização mecânica e resistência à chama de compósitos poliméricos com adição de resíduos de lama vermelha e caulim. **Ciência e Engenharia de Materiais e o Desenvolvimento Socioambiental**. Vol. 8, p. 74-84, 2019. Doi: 10.22533/at.ed.4891919128

MORAES, Mario Henrique Moreira de. **Caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica com adição de resíduos sólidos industriais**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

McCONCHIE, D., CLARK, M., DAVIES-McCONCHIE, F., “New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud)”, In: **Proceedings of the 6th international alumina quality workshop**, Brisbane, Australia, pp. 327-332, 2002.

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

MELNYK, Liubov et al. **Aspects of making of a composite material when using red mud**. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, v. 2, n. 6 (92), p. 23-28, 13 mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125702>. Acessado em junho de 2021.

MERCURY, J.M. RIVAS; L.G. GALDINO; N.S.L.S. VASCONCELOS; A.E.M PAIVA; A.A. CABRAL; R.S. ANGÉLICA. Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. **Revista Matéria**, v. 15, n. 3, pp. 445 – 460, 2010

NEVES, Manoela Cristina do Amaral. **Caracterização geotécnica e avaliação do comportamento de um resíduo filtrado da produção de alumina (lama vermelha) estocado na forma de aterro densificado**. Dissertação de Mestrado – Engenharia Civil, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2017.

NUNES, Kamila Silva. **Influência da lama vermelha e fibra de curauá *Ananas lucidus*, Mill, nas propriedades físicas e mecânicas em compósitos de poliéster isoftálico**. Dissertação de Mestrado – Engenharia de Processos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

OLIVEIRA M. J. A. de. **Efeito da adição de lama vermelha como carga nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibra natural de curauá (*ananas erectifolius*)**. Dissertação de Mestrado – Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

OLIVEIRA, M. JR. A.; CUNHA, E.J.S.; SOUZA, J.A.S.; NEGRÃO, E.M. Influence of the red mud content in mechanical properties of natural fiber-reinforced polymer composites. **Characterization of Minerals, Metals and Materials TMS (The Minerals, Metals and Materials)**, 2013.

OLIVEIRA, Sara Verusca de et al. **Nanocompósitos de polietileno/argila bentonítica com propriedades antichama**. *Polímeros*, São Carlos, v. 27, n. spe, p. 91-98, Epub 16-Jan-2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2288>.

PAIVA, Jane Maria F., Elisabete Frollini. "Matriz termofixa fenólica em compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar." **Polímeros: Ciência e Tecnologia** (1999).

PHAM, Lam H. et al. Effective Phosphorus/Phosphorus-Nitrogen Fire Retardants Applied to Biocomposites Based on Polypropylene-Wood Flour: Flammability, Thermal Behavior, and Mechanical Properties. **Macromolecular Research**, v. 27, n. 12, p. 1185-1192, 29 jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13233-019-7167-4>. Acessado em janeiro de 2022.

PINHEIRO, E. R.; FERNANDEZ, O. J. C.; COSTA, J. C. **Química-Mineral das camadas inertizadas em lama vermelha da Hydro ALUNORTE**. 22º CBECiMat. 2016.

PRABU A., V.; KALIRASU, S.; UTHAYAKUMAR, M.; MANIKANDAN, V. Investigation of the mechanical properties on red mud filled polyester banana composites using grey relational technique. **Materials Physics and Mechanics**, vol. 14, nº. 1, p.57-63, 2012.

QIAN, Yi; JIANG, Kangjia; LI, Long. Improving the flame retardancy of ethylene vinyl acetate composites by incorporating layered double hydroxides based on Bayer red mud. **e-Polymers**, v. 19, n. 1, p. 129-140, 29 maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/epoly-2019-0015>. Acessado em janeiro de 2022.

QUARESMA, Danielly da Silva. **Estudo hidrometalúrgico de compostos de titânio proveniente do resíduo do processo Bayer**. 107 f. Dissertação de Mestrado – Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

QUEIROZ, D. P.; MORAES, M. H.; COSTA, D. S.; SOUZA, J. A. S.; PINHEIRO, D. R.; COSTA, D. S. Avaliação Mecânica e Flamabilidade de Compósitos com Resíduos de Lama Vermelha e Cobre. In: **23º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2018**.

QUEIROZ, Diogo Pontes de. **Compósito de matriz polimérica com resíduos industriais reforçado com fibras de aço**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

QUINHONES, Rogério. **Fabricação e qualificação de placas compostas de serragem e plástico reciclável**. 47 f. Dissertação de Mestrado – Recursos Florestais, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura, Piracicaba, 2007.

RICHARD, Kay. **Red Mud: Production, Composition and Impact**. [S. l.]: Nova Science Publishers, Incorporated, 2018. 266 p. ISBN 9781536143836. Acessado em outubro de 2021.

SAMAL, S.; RAY, A. K.; BANDOPADHYAY, A. Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India — A review. **International Journal of Mineral Processing**. V. 118, p. 43–55. 2013.

SANTOS, Eyllisson André. **Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de matriz de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais**. 98p. Dissertação de Mestrado – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

SANTOS, E. E. S., FERREIRA V. H., DANIEL, B.T., MENDES, B.H.A, COSTA D. S. Análise da variação da granulometria da lama vermelha nas propriedades dos compósitos. **XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, 2019.

SANTOS, L.G.; E.J. CUNHA; J.A.S. SOUZA; S.C. NASCIMENTO; J.N. QUARESMA; M.S. PACHECO. **Caracterização de partículas de lama vermelha do processo Bayer, separadas por sedimentação hidráulica, visando a aplicação em polímeros**. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2016.

SATAPATHY, A., PATNAIK, A., “Analysis of dry sliding wear behavior of red mud filled polyester composites using the Taguchi method”, **Journal Reinfor Plast and Composites**, v. 29 n. 24: p. 2883-2897, 2010.

SGLAVO, V. M. et al. Bauxite/redmud'in the ceramic industry. Part 1: thermal behaviour. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 20, n. 3, p. 235-244, 2000.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo: Prentice Hall, 2008.

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**, v. 12, n. 2, pp. 322-338, 2007.

SONG, C., ZHANG, H., DONG, Y., PEI, L., LIU, H., JIANG, J., & XU, H. **Investigation on the fabrication of lightweight aggregate with acid leaching tailings of vanadium bearing stone coal minerals and red mud**. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.020>. Acessado em julho de 2022.

VASILIEV, V.; MOROZOV, E.; **Mechanics and Analysis of Composite Materials. 8 th edition, Elsevier Science**, 2001, 424p.

VIEIRA, H.; BROW, R. K.; MARTINELLI, J. R.. Reaproveitamento da lama vermelha como matéria prima na produção de vidros visando o confinamento de rejeitos nucleares. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2012, Joinville, SC, Brasil.

VILLAR, Lúcio Flávio de Souza. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. 156 - 158p. Tese de Doutorado – Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

WAO – World Aluminium Organization, <http://www.world-aluminium.org>. Acessado em agosto de 2020.

WORZAKOWSKA, Marta. Chemical modification of unsaturated polyesters influence of polyester's structure on thermal and viscoelastic properties of low styrene content copolymers. **Journal of applied polymer science**, v. 114, n. 2, p. 720-731, 2009.

ZHANG, Y.; QU, Y.; WU, S.; 2001 apud LIU, Y.; NAIDU, R.; MING, H. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. **Geoderma**. v. 163, p. 1–12. 2011.

ZHANG, Chunjing et al. Polyurethane/Red Mud Composites with Flexibility, Stretchability, and Flame Retardancy for Grouting. **Polymers**, v. 10, n. 8, p. 906, 12 ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym10080906>. Acessado em janeiro de 2022.