



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

JEAN ANTHONY CAVALCANTE NUNES

**COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE FIBRA DE VIDRO E LAMA
VERMELHA:** propriedades físicas, mecânicas e flamabilidade

ANANINDEUA-PA
2023

JEAN ANTHONY CAVALCANTE NUNES

**COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE FIBRA DE VIDRO E LAMA
VERMELHA: propriedades físicas, mecânicas e flamabilidade**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, campus Ananindeua, para obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em tecnologia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientadora: Ma. Karla Suellen Lino Barbosa

ANANINDEUA-PA
2023

**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)**

- N972c Nunes, Jean Anthony Cavalcante.
 Compósitos de fibra de vidro e lama vermelha : propriedades físicas,
 mecânicas e flamabilidade / Jean Anthony Cavalcante Nunes. — 2023.
 58 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
 Coorientador(a): Profª. MSc. Karla Suellen Lino Barbosa
 Trabalho de Conclusão de
 Curso (Graduação) - Universidade
 Federal do Pará, Câmpus Universitário de Ananindeua, Curso de Ciência e
 Tecnologia, Ananindeua, 2023.
1. Fibra. Resina. 2. Poliéster. 3. Propriedades Mecânicas.
 4. Compósito. I. Título.

CDD 620

JEAN ANTHONY CAVALCANTE NUNES

**COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE FIBRA DE VIDRO E LAMA
VERMELHA: propriedades físicas, mecânicas e inflamabilidade**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Ciência e Tecnologia da
Universidade Federal do Pará, campus
Ananindeua, para obtenção do grau de Bacharel
em Ciência e Tecnologia com ênfase em
tecnologia mecânica.

Data de Avaliação: 07/07/2023

Conceito: Bom

Banca Examinadora:

Deibson Silva da Costa

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

Karla Suellen Lino Barbosa

Ma. Karla Suellen Lino Barbosa
(PRODERNA/ITEC/UFPA - Coorientadora)

Disterfano Lima M. Barbosa

Prof. Me. Disterfano Lima Martins Barbosa
(FACET/CAMPANIN/UFPA – Examinador Interno)

Dorivane Cohen Farias

Bela. Dorivane Cohen Farias
(PPGCEM/CAMPANIN/UFPA – Examinadora Externa)

A minha filha Maitê Silva Nunes, aos meus pais, Paulo Sérgio e Maria Augusta, minha companheira Luana Gonçalves, minha tia Maria de Nazaré, aos meus avôs que foram minha inspiração de vida e aos demais amigos e familiares que colaboraram para a minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo o que tem feito na minha vida e todas as bênçãos, aos meus familiares que ajudaram e me incentivaram várias vezes a continuar lutando.

A todos os meus amigos que sempre me descontraram nos momentos mais ruins.

Aos servidores e funcionários dessa instituição, além dos amigos de sala que foram excelentes.

Meus melhores amigos André Luiz e Gabriel Victor que me proporcionaram momentos de alegria e descontração, aos meus amigos William Oliveira, Matheus Carvalho e Madson Leno por me tirarem do tédio dia de domingo e sempre proporcionarem lugares onde eu possa ir para conversar e desabafar.

Ao Projeto Jogo do Amanhã – PJA, do qual faço parte há pouco mais de dois anos, simplesmente é o lugar onde consegui relaxar a mente do mundo. A todos os instrutores e crianças que fazem meus sábados completamente felizes e ao Victor Ferreira (chefe) que recebeu de braços abertos no PJA e me proporcionou algumas viagens e momentos bem divertidos.

Agradeço ao Deibson Costa e a Karla Suellen, por todos seus esforços em ajudar a minha pessoa, e conseguiram me fazer realizar um sonho que parecia distante.

A minha companheira Luana Gonçalves por está presente em minha vida, por me ajudar em inúmeras situações, por me divertir me descontrair, além de ser minha fonte de energia, ela tem sido muito importante para meu crescimento pessoal.

RESUMO

O interesse dos pesquisadores por novas tecnologias que possibilitam a preservação ambiental e o reaproveitamento de resíduos, tem crescido exponencialmente no último século. O estudo com os materiais compósitos mostra um enorme potencial de combinar fibras com resíduos industriais para produzir um novo material sustentável. Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do comprimento da fibra de vidro em um compósito híbrido (fibra de vidro e lama vermelha). O método utilizado para fabricação dos compósitos consistiu no processo de laminação manual *hand lay up*. A matriz polimérica utilizada foi a resina poliéster isoftálica junto com o acelerador de cobalto (1,5 % v/v) e o catalisador MEK-P (1 % v/v), onde foram confeccionados compósitos com fibras de vidro nos comprimentos de 15, 30 e 45 mm e na proporção em massa fixa de 5 %. O resíduo de lama vermelha foi peneirado manualmente na granulometria de 100 mesh (0,149 mm) da série Tyler. O resíduo foi submetido à caracterização morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura e Difração de raios-X. Foram confeccionados compósitos híbridos nas frações mássicas de 5 % de fibra de vidro com o comprimento de 45 mm (comprimento de fibra utilizado após a realização dos ensaios mecânicos onde a FV 45 mostrou um resultado melhor, em relação as demais composições) e a lama vermelha com a fração mássica de 10 %. Após a confecção das placas de compósitos, foram submetidas à realização dos ensaios de caracterizações física de Massa Específica Aparente, Porosidade Aparente e Absorção de Água; ensaio mecânico de resistência à tração e resistência à flexão e ensaio de flamabilidade horizontal. Os resultados mostraram que a lama vermelha possui uma grande diversidade de partículas de diferentes formas e dimensões, conforme a caracterização morfológica. Já a Difração de raios-X mostrou os principais minerais presentes, como Hematita e Sodalita. As propriedades físicas mostraram que o compósito híbrido teve um aumento da Absorção de Água, Porosidade Aparente e Massa Específica Aparente. Já nos resultados mecânicos se observa um aumento na resistência à tração conforme o tamanho da fibra de vidro, e com a adição do resíduo de lama vermelha houve uma melhora significativa, sendo de até 96,45 % superior a fibra de vidro 15 mm. No ensaio de flexão, houve um aumento de tensão de 19,82 % do compósito híbrido em relação a fibra de vidro 15 mm. Quanto ao ensaio de flamabilidade o compósito híbrido mostrou um proveitoso retardo à chamas, classificando o material como SI (sem ignição), mostrando assim que o material tem um bom desempenho nesse quesito.

Palavras-chave: Fibra. Resina Poliéster. Propriedades Mecânicas. Compósito.

ABSTRACT

The interest of researchers in new technologies that enable environmental preservation and reuse of waste has grown exponentially in the last century. The study with composite materials shows a huge potential to combine fibers with industrial waste to produce a new sustainable material. Thus, this work aimed to evaluate the influence of fiberglass length in a hybrid composite (glass fiber and red mud). The method used to manufacture the composites consisted of the hand lay up manual lamination process. The polymeric matrix used was the isophthalic polyester resin together with the cobalt accelerator (1.5% v/v) and the MEK-P catalyst (1% v/v), where composites were made with glass fibers in lengths of 15 , 30 and 45 mm and in the fixed mass proportion of 5%. The red mud residue was manually sieved in the Tyler series 100 mesh (0.149 mm) granulometry. The residue was submitted to morphological characterization by Scanning Electron Microscopy and X-ray Diffraction. Hybrid composites were made in the mass fractions of 5% glass fiber with a length of 45 mm (fiber length used after carrying out the mechanical tests where the FV 45 showed a better result, in relation to the other compositions) and the red mud with a mass fraction of 10%. After making the composite boards, they were subjected to physical characterization tests of Apparent Specific Mass, Apparent Porosity and Water Absorption; mechanical test of tensile strength and flexural strength and horizontal flammability test. The results showed that the red mud has a great diversity of particles of different shapes and sizes, according to the morphological characterization. The X-ray Diffraction showed the main minerals present, such as Hematite and Sodalite. The physical properties showed that the hybrid composite had an increase in Water Absorption, Apparent Porosity and Apparent Density. In the mechanical results, an increase in tensile strength is observed according to the size of the glass fiber, and with the addition of the red mud residue there was a significant improvement, being up to 96.45% superior to the 15 mm glass fiber. In the bending test, there was a tension increase of 19.82% of the hybrid composite in relation to the 15 mm glass fiber. As for the flammability test, the hybrid composite showed a useful flame retardancy, classifying the material as SI (no ignition), thus showing that the material performs well in this regard.

Keywords: Fiber. Polyester resin. Mechanical properties. Composite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos compósitos.....	17
Figura 2 – Estrutura química do poliéster isoftálica.....	19
Figura 3 – Orientação da fibra e sua concentração.....	20
Figura 4 – Fluxograma e Esquema do Processo Bayer	24
Figura 5 – Equipamentos: (a) Balança; (b) Prensa hidráulica; (c) Máquina de corte e (d) Estufa	27
Figura 6 – Manta de fibra de vidro	28
Figura 7 – Lama vermelha.....	29
Figura 8 – Processo de produção dos compósitos.	31
Figura 9 – Fluxograma para produção dos compósitos.	33
Figura 10 – Corpos de prova (ensaio físico).....	34
Figura 11 – Dimensões (mm) para corpo de prova de tração.....	35
Figura 12 – Ilustração do corpo de prova sobre o ensaio de tração.....	35
Figura 13 – Dimensões (mm) para corpos de prova de flexão	36
Figura 14 – Esquema sobre o comportamento do ensaio de flexão em três pontos	37
Figura 15 – Ensaio de flamabilidade	38
Figura 16 – MEV da lama vermelha	40
Figura 17 – Difratometria da Lama Vermelha	41
Figura 18 – Comparação entre massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente.....	42
Figura 19 – Comportamento de resistência à tração dos compósitos.....	45
Figura 20 – Gráfico de força x alongamento.....	46
Figura 21 – Gráfico de tensão das composições.....	49
Figura 22 – Gráfico de força(N) x alongamento (mm) das composições.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado dos ensaios físicos.....	42
Tabela 2 – Resultados do ensaio de tração de todas as composições confeccionadas	43
Tabela 3 – Comparativa entre as médias (teste de Turkey).....	44
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de flexão de todas as composições.....	48
Tabela 5 – Comparativo entre as medias (pelo teste Turkey)	48
Tabela 6 – Resultados do ensaio de flamabilidade.....	50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Absorção de Água
ASTM	American Society Testing Materials
CPs	Corpo de Provas
DRX	Difração de Raios-X
MEA	Massa Específica Aparente
MEK-P	Peróxido de metil etil cetona
MP	Matriz Plena
Ms	Massa seca
Mu	Massa úmida
PA	Porosidade Aparente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
FRP	Fiber Reinforced Polymer
LV	Lama vermelha
FV	Fibra de vidro
FV15	Fibra de vidro 15 mm
FV30	Fibra de vidro 30 mm
FV45	Fibra de vidro 45 mm
UFPA	Universidade Federal do Pará
FV45LV10	Fibra de vidro 45 mm, lama vermelha 10 %.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos.....	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Materiais compósitos	16
2.2	Matrizes poliméricas	18
2.2.1	Resina poliéster isoftálica	18
2.3	Compósitos reforçados com fibras	19
2.3.1	Fibras de vidro	20
2.3.2	Compósitos com incorporação de fibras de vidro	22
2.4	Compósitos reforçados com partículas	22
2.4.1	Lama vermelha	23
2.4.2	Beneficiamento da lama vermelha.....	24
2.4.3	Compósitos com incorporação de lama vermelha	25
2.5	Compósitos híbridos	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Equipamentos.....	27
3.2	Materiais de partida	28
3.2.1	Materiais	28
3.2.2	Fibra de vidro.....	28
3.2.3	Lama vermelha	29
3.3	Métodos.....	29
3.3.1	Métodos de corte da fibra de vidro	29

3.3.2	Desagregação do resíduo de lama vermelha.....	29
3.3.3	Caracterização morfológica	30
3.3.4	Difração de raios-X.....	30
3.3.5	Produção dos compósitos	30
3.3.6	Etapas de fabricação dos corpos de prova	32
3.3.7	Caracterização física	33
3.3.8	Caracterização mecânica.....	35
3.3.8.1	Resistencia à tração.....	35
3.3.8.2	Resistência à flexão	36
3.3.9	Flamabilidade	38
3.3.10	Análise Estatística	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1	Caracterização morfológica.....	40
4.2	Difração de raios-X.....	41
4.3	Ensaio físicos.....	42
4.4	Caracterização mecânica	43
4.4.1	Ensaio de resistência à tração	43
4.4.2	Ensaio de resistência à flexão	47
4.5	Flamabilidade.....	50
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	52
5.1	Conclusões	52
5.2	Sugestões para trabalho futuro.....	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A busca por outros materiais com propriedades mais leves, duráveis e com alta resistência impulsionaram a área dos compósitos. Os materiais compósitos surgiram a partir dos avanços nos estudos de novos materiais para a indústria da construção civil. Nas últimas décadas, com o progresso destas atuais tecnologias agregaram-se mais precaução, economia e aplicabilidade(VIERA *et al.*, 2016).

Os compósitos laminados de matriz polimérica, reforçados com fibras têm uma utilidade progressiva em diversas funcionalidades estruturais, em razão de sua elevada rigidez e resistência específica. A escolha do reforço leva sempre em conta fatoresque diversificam desde o custo desses materiais até o comportamento planejado e a técnica de confecção empregada. Um componente fundamental em um material compósito é buscar-se potencializar o beneficiamento das ótimas propriedades mecânicas associadas aos reforços fibrosos (SILVA,2014; MARINUCCI, 2019)

Observando uma condição de determinados carregamentos, tais como carregamentos estáticos, dinâmicos ou mesmo com esforços combinados, os elementos que se integram têm que estar qualificados a exercer desempenho conforme com as condições suposta ou firmada em um projeto. Essa circunstância nos compósitos é obtida pela eficácia do elemento de reforço, que analisa a estrutura, propriedades específicas de resistência e módulo de elasticidade (MARINUCCI, 2019).

A fibra de vidro é um material feito pela aglomeração de finíssimos filamentos de vidro não rígidos e flexíveis, onde elas são unidas pela ação de uma resina de poliéster (ou outro tipo de resina), compostas por um material plástico derivado do petróleo. Posteriormente, são adicionadas substâncias que catalisam o processo de polimerização ao material. As fibras de vidro são utilizadas para reforçar peças plásticas, promovendo uma melhora em suas características mecânicas, podendo conter as seguintes alterações no produto final: diminuição da higroscopia, aumento da resistência térmica, aumento da resistência à tração e aumento da estabilidade dimensional (SERCEL, 2015; SANTOS, 2018).

Os resíduos industriais são atualmente considerados um delicado problema ambiental, em virtude ao grande volume produzido, diante de materiais perigosos ao meio ambiente, à saúde pública e à dificuldade crescente de se conseguir áreas para a sua disposição. Sendo assim, é essencial para a indústria conhecer a caracterização dos resíduos por ela gerados, especialmente quanto a sua periculosidade, as formas apropriadas de armazenamento, transporte e disposição. Dessa forma, projetos e programas de tratamento têm buscado

maneiras de reintroduzir estes resíduos, que são muitas vezes descartados irregularmente de forma atraente para utilização no mercado (SOUZA *et al.*, 2013)

Uma das formas de reutilização dos resíduos é o uso como carga em um material compósito, em forma de pó ou pequenas partículas misturadas a uma matriz polimérica podendo elevar a resistência ou facilmente reduzir o custo de produção do produto (MILANI, 2015).

Entre as alternativas de aproveitamento da lama vermelha encontra-se a utilização como carga em materiais compósitos, vale ressaltar a apreciação deste resíduo como material interessante vinculado ao fato da lama vermelha apresentar em sua composição quantidades de sílica e alumina (SENHADJI *et al.*, 2014).

Concebendo com que sua aplicação, de certa forma, está arranjada com a utilidade de suprimento de materiais e reciclagem na indústria da construção civil, principalmente para reduzir a geração de gás carbônico (CO_2) pelo processo de fabricação do clínquer (PACHECO, 2013; VIEIRA, 2006).

A próspera procura na aplicação dos materiais compósitos híbridos torna indispensável uma melhor percepção do seu procedimento presente às mais diversas condições de projeto, como o aparecimento das descontinuidades geométricas nos elementos estruturais (FONTES, 2013).

Dessa forma, foi confeccionado um compósito híbrido de fibra de vidro e resíduo de lama vermelha para serem analisadas suas caracterizações mecânicas e físicas além da caracterização de flamabilidade para averiguar quais as suas possíveis utilidades.

1.1 Justificativa

A escolha de realizar um trabalho sobre fibra de vidro e lama vermelha é motivada pelo interesse em explorar duas áreas de estudo relevantes e em constante evolução. A fibra de vidro é um material amplamente utilizado na indústria devido às suas propriedades mecânicas e resistência, enquanto a lama vermelha é um resíduo industrial que demanda soluções eficientes de gestão ambiental. Compreender a produção, as características e as aplicações da fibra de vidro, bem como explorar alternativas sustentáveis para o tratamento e reutilização da lama vermelha, apresenta-se como um desafio acadêmico e uma oportunidade para contribuir com soluções inovadoras. Este trabalho busca fornecer uma análise desses temas, promovendo o conhecimento científico e prático, além de destacar a importância da sustentabilidade e da aplicação responsável de materiais na indústria. A pesquisa realizada tem potencial para

contribuir positivamente aos setores de engenharia, materiais e meio ambiente, fornecendo informações valiosas para profissionais e pesquisadores interessados nessas áreas

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver materiais compósitos poliméricos com fibras de vidro em diferentes dimensões e compósitos híbridos com fibra de vidro e lama vermelha, avaliando os mesmo através dos ensaios físicos, caracterização mecânica e resistência à chama.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a morfologia do resíduo de lama vermelha através da caracterização por microscopia eletrônica de varredura e as características mineralógicas por difração de raios-X
- Confeccionar e caracterizar as placas de compósitos nas proporções mássicas de 5 % de fibra de vidro nos comprimentos de 15 mm, 30 mm e 45 mm, e o compósito híbrido de fibra de vidro (5 %) e resíduo de lama vermelha (10 %);
- Caracterizar fisicamente através das propriedades de Massa Específica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA) todas as séries de compósitos fabricados;
- Avaliar mecanicamente através dos ensaios de tração e flexão todas as séries de compósitos fabricados;
- Caracterizar através do ensaio de flamabilidade o compósito híbrido de fibra de vidro e lama vermelha e a Matriz Plena.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais compósitos

A constatação dessa atual concepção de misturar materiais diferentes durante a produção levou o reconhecimento dos compósitos como uma nova classe distinta dos metais, cerâmicas e polímeros familiares. Nesta ocasião entende-se que a ideia sobre os compósitos multifásicos proporciona possibilidades estimulantes para o planejamento de uma diversidade de combinações e de características que não podem ser atendidas por nenhuma liga metálica, cerâmica ou material polimérico monolítico convencional (CALLISTER, 2020).

Os compósitos caracterizam um caso específico de magnitude elevada introduzida ao círculo das misturas poliméricas imiscíveis. Materiais compósitos são uma aplicação de ligação entre dois ou mais materiais de feito a desenvolver um novo produto com propriedades modificadas dos elementos padrões (MARTINS NETO, 2016).

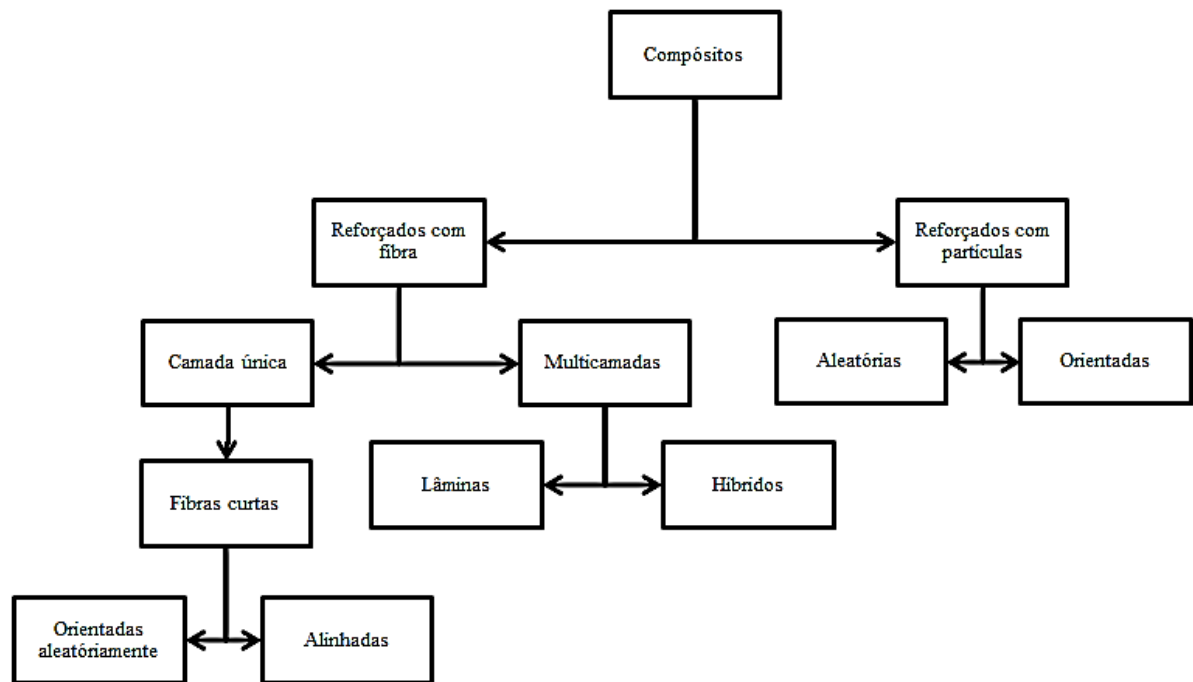
Segundo Levy Neto e Pardini (2006) os materiais que formam o compósito são denominados de fases, onde uma dessas fases é descontínua, intitulada como reforço, responsável por fornecer resistência ao esforço e, a outra fase é contínua, denominada de matriz, correspondendo a forma de transferência desse esforço. Dessa forma, as propriedades dos compósitos são tomadas pelas propriedades dos materiais das fases associadas, pela distribuição e contato entre o reforço e a matriz. Assim, o intuito da combinação dos materiais é proporcionar características específicas para o compósito frente à aplicação.

As combinações e as faixas das características dos materiais estão sendo expandidas pelo progresso dos materiais compósitos. De modo abrangente, um compósito é visto como qualquer material multifásico que expressa uma importância considerada das características de ambas as fases constituintes, de modo que é alcançada a melhor combinação de características. Segundo o princípio da ação combinada, excelentes combinações de características são criadas por uma mistura ponderada de dois ou mais materiais diferenciados (CALLISTER, 2020).

Em uma circunstância bem ampla, os compósitos podem ser classificados em sintéticos e naturais. Em relação aos compósitos que são alvo desse estudo, considerando as diversas classes relacionadas a inúmeras opções de matriz, pode-se enumerar uma série de diferentes classificações sequenciais com base nos tipos de arranjos dos esforços existentes. Constata-se que o reforço em um compósito pode ser feito de fibras ou partículas. Observa-se que o reforço em forma de fibras pode-se utilizar-se de feixes paralelos entre si, de modo a conceber e orientar o esforço em multidireções, multicamadas, também no aspecto de camadas isoladas ou lâminas.

Os compósitos alcançados com reforço multidirecional tem como princípio inicial preformas têxteis e se constituem em um salto tecnológico com o objetivo de se conseguir estruturas maciças de enorme volume e com propriedades estabelecidas à aplicação a que se destinam (LEVY NETO; PARDINI, 2006). A Figura 1 mostra a classificação dos compósitos.

Figura 1 – Classificação dos compósitos



Fonte: Levy Neto; Pardini (2006).

Na classificação dos compósitos, podem-se destacar seus reforços e possíveis matrizes. Segundo Callister (2020):

- Reforçados com partículas: Refere-se à distinção baseada no aumento da resistência;
- Reforçados por dispersão: Os metais e ligas metálicas que podem aumentar sua resistência;
- Reforçados com fibras: Alta resistência e/ou rigidez em associação a seu peso.

2.2 Matriz polimérica

De acordo com Askeland (2014), A matriz une as fibras no material compósito e as mantém em posição adequada. Além disso, ela transfere as tensões às fibras, prevenindo o surgimento de trincas nesses materiais compósitos durante o processo e a utilização, e controlando também as propriedades elétricas..

Na fabricação dos compósitos, as matrizes que se salientam são as poliméricas. As matrizes poliméricas podem ser aplicadas na moldagem de inúmeras variedades de compósitos e compõem em dois grupos fundamentais: os termoplásticos e os termorrígidos (CUNHA, 2018).

As características das matrizes poliméricas dependem da composição da resina e consequentemente do tipo de polímero que as constitui (BORGES, 2018).

A fase matriz é feita para várias funções. Nos compósitos reforçados com fibras. Sua função primordial é incorporar as fibras de modo e permitir que elas interajam entre si, atuando como meio para transmitir e compartilhar as tensões aplicadas às fibras. No entanto, a matriz sustenta apenas uma parcela muito baixa da carga aplicada. Portanto, o material da matriz deve possuir propriedades de ductilidade. Por outro lado, o módulo de elasticidade das fibras deve ser bem maior que o da matriz. A segunda aplicação da matriz é proteger as fibras individuais para defesa de danos superficiais em consequência da ação mecânica ou de ações químicas com o ambiente (CALLISTER, 2020).

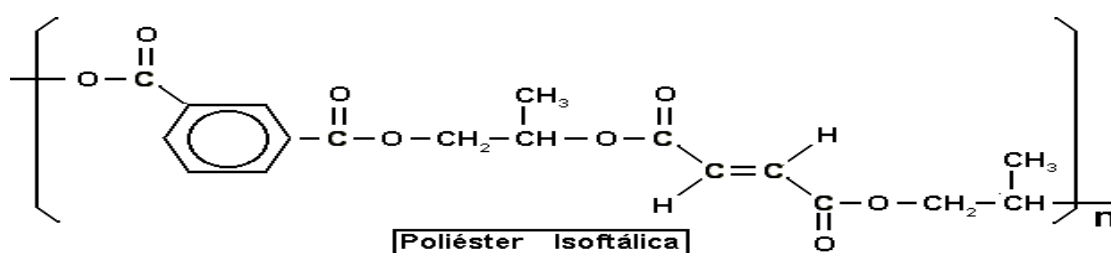
2.2.1 Resina poliéster isoftálica

As resinas poliméricas são voltadas às aplicações como matrizes em compósitos, podem ser feitas por moléculas (curtas ou longas), constituída por uma rede de elementos fundamentais básicas intituladas meras. Tais cadeias moleculares podem pactuar-se entre si, com diversas moléculas similares, ou entre outros compostos (MILANI, 2015).

As resinas de poliésteres pertencem à família de polímeros feitos de reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis, a qual, no momento que reagidos, dão formação as cadeias longas e lineares. Se um ou ambos os elementos fundamentais são insaturados, isto é, abrange uma ligação dupla reativa no meio de átomos de carbono, a resina consequente por condensação é insaturada (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

As resinas de poliéster insaturado constituem o grupo dos polímeros, apresentando grande massa molecular. Essa espécie de resina é uma das mais operadas no meio industrial em motivo das suas propriedades benéficas, por exemplo, preço moderado, compreensibilidade de manuseamento em consequência ao seu estado de fluido, cura ótima e manifesta boas características térmicas e mecânicas. Além disso, a matriz apresenta varias utilidades na indústria aeronáutica, química, construção civil, naval e área automobilística (SILVA, 2008). A Figura 2 mostra a estrutura química do poliéster isoftálica.

Figura 2– Estrutura química do poliéster isoftálica



Fonte: Silaex (2018)

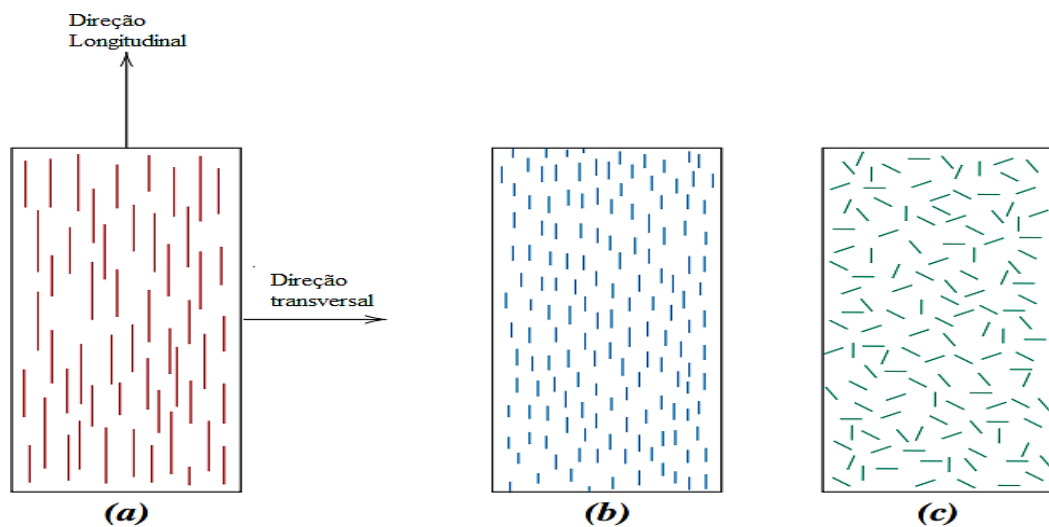
2.3 Compósitos reforçados com fibras

Segundo Oliveira (2019), os compósitos poliméricos reforçados com fibras são muito utilizados na construção civil e na indústria automobilística, por exemplo, em malhas, embalagens e peças que podem ajudar no desenvolvimento dos veículos automotores.

Quando a estrutura é composta por uma matriz e um reforço de fibra, o material é denominado compósito reforçado com fibra. Precisamente, a fibra é o reforço e observa a resistência mecânica e a rigidez, ao mesmo tempo em que a matriz é encarregada pela disposição de cargas e por a resistência do material (QUEIROZ *et al.*, 2018).

Compósitos reforçados com fibras são os mais importantes tecnologicamente, o intuito da confecção é elaborar compósitos com fibras resistentes e com módulos específicos elevados, utilizando materiais com baixo peso específico tanto na matriz quanto na fibra (BRANDÃO, 2015). A Figura 3 representa a orientação dos reforços com fibra e sua concentração (a) contínuas, (b) descontínuas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.

Figura 3 – Orientação da fibra e sua concentração



Fonte: Santos (2019)

2.3.1 Fibras de vidro

As fibras de vidro proporcionam a melhor relação custo/benefício entre os reforços oferecidos para fabricação de materiais compósitos poliméricos. Boa parte disso se deve à origem e abundância das matérias-primas utilizadas para fabricação do material, principalmente o silício contido nas areias, que com calcário, ácido bórico, carvão e argila são os ingredientes utilizados para fabricação do vidro (MARINUCCI, 2019).

A importância do comprimento de fibra está associada à transferência de carga que o material pode sofrer em sua extensão. Sobre uma determinada tensão a matriz sofrer uma deformação padrão onde a fibra cessará em suas extremidades (CALLISTER, 2020).

Esse modelo de material é composto por filamentos demasiadamente finos de vidro, que se unem por meio de usos de resinas, silicones, fenóis e outros compostos solúveis em solventes orgânicos. Podendo também receber outra substância catalisadora que pode comportar óxidos de potássio, ferro, cálcio e alumínio (SOARES *et al.*, 2007).

Fibras de vidro possuem geralmente de 5 a 20 μm de diâmetro e suas superfícies não são livres de falhas, além de estarem intimamente associadas a irritações na pele humana (WAMBUA *et al.*, 2003).

As indústrias de transporte estão usando quantidades cada vez mais elevadas de plásticos reforçados com fibra de vidro, com o intuito de um esforço para diminuir o peso dos veículos e elevar a eficiência dos combustíveis. Uma série de inovações em suas funcionalidades está sendo usada ou está no presente sob averiguação da indústria automotiva (CALLISTER, 2020).

Os compósitos reforçados com fibras de vidro demonstram inúmeras propriedades favoráveis: elevado quociente entre resistência e peso, bom equilíbrio, excelente resistência ao calor, à umidade e a corrosão, compreensibilidade de produção e custo moderadamente baixo (BARCELLOS, 2009). Também demonstra características como ótima disseminação, boa desenvoltura de corte, bom assentamento no molde, a pequena formação de eletricidade estática, ótima conformação em cantos vivos, favorável translucidez e o simples desenrolamento são esperadas numa fibra de vidro de boa propriedade (MARINUCCI, 2019).

Para Kemerich (2013), seu trabalho demonstrou que o polímero reforçado com fibra de vidro (PRVF) tem sido mundialmente usado na produção de inúmeros produtos por ser um material que contém um custo baixo e altamente eficiente.

Oliveira (2019), diz que em sua pesquisa que a análise morfológica sobre uma fibra de vidro com áreas lisas e contínuas, onde seguindo os resultados, essas características influenciaram nos desempenhos físicos e mecânicos.

Segundo Santos (2018), as fibras de vidro mostram propriedades excelentes, para reforçar peças plásticas aprimorando suas características mecânicas, podendo adicionar as seguintes alterações no produto como:

- Baixa absorção de água;
- Aumento da resistência térmica;
- Aumento da rigidez;
- Aumento da resistência ao desgaste;
- Aumento da resistência ao impacto;
- Aumento da resistência à tração.

2.3.2 Compósitos com incorporação de fibra de vidro

Oliveira (2019) retrata em seu trabalho sobre as fibras de vidro e fibras de juta que o aspecto morfológico da fibra de vidro são de fibras longas e contínuas, com áreas lisas, já os fios de juta apresentaram um emaranhado de fibras e poucas áreas lisas tais características influenciaram nos resultados de comportamento físico e mecânico dos compósitos fabricados.

Dias (2018) retrata em sua pesquisa que o módulo de elasticidade aponta a rigidez do material, constatou-se que as fibras de vidro reduziram a rigidez do material resultante relativamente ao da resina plena. Os compósitos com fibra de vidro tiveram os módulos inferiores em relação à matriz. As fibras de vidro comportaram-se como reforço nos compósitos, elevando a resistência a tração.

Silva (2014), conclui que, os compósitos com fibra de vidro são amplamente pesquisados pelo fato da fibra de vidro expressar melhor relação custo/resistência mecânica, em relação às fibras de carbono e aramida.

Haneefa *et al.* (2008), avaliaram em seu trabalho o estudo das propriedades elásticas e flexível de compósitos híbridos de poliestireno reforçado com fibra de banana/vidro. Constataram que a capacidade de deformação do compósito reduziu com o acréscimo da proporção de fibra de vidro, uma vez que os melhores resultados alcançados contemplando resistência de 39 MPa e deformação de 2,9 % foram para a proporção de (70/30) fibra de banana e vidro.

Segundo Tavares (2018), em seu trabalho produzindo compósitos com poliéster isoftálica com inserção de fibra de vidro/palha seus resultados mostraram que houve aumento foi de 59,31 % em relação a matriz plena para o ensaio de tração e 16,74 % em relação ao ensaio de flexão, no limite de resistência à tração e flexão dos compósitos com fibra de vidro em relação à matriz plena.

2.4 Compósitos reforçados com partículas

Os compósitos reforçados com partículas grandes e os reforçados por dispersão condizem na especificação de compósitos reforçados com partículas. A dimensão das partículas é comumente superior nos compósitos com partículas grandes, na qual suas propriedades mecânicas são aperfeiçoadas pela ação do reforço. Portanto, os valores para os modelos de elasticidade superior e inferior baseiam-se dos módulos e das frações volumétricas das fases matriz e particulada, conforme com as expressões da regra das misturas (CALLISTER, 2020).

As propriedades mecânicas de compósito com partículas grandes são aprimoradas pela ação do reforço de fibra, onde já aos compósitos reforçados por dispersão a resistência foi reforçada por pequenas partículas (QUIRINO, 2010).

2.4.1 Lama vermelha

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

A conservação da lama vermelha é um processo de maneira habitual e convencional em lagoas ou empilhamentos, no entanto, apresentam inúmeras desvantagens tais como custo muito alto, amplas áreas ocupadas, sobre supervisão devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, aplicação de materiais impermeáveis para impedir a lixiviação do resíduo, sendo assim o risco de causar uma contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais (RESENDE, 2012).

A bauxita é o minério a qual se obtém o alumínio, a terceira substância em elevada riqueza na crosta terrestre, seguidamente do oxigênio e silício. Com finalidade a fabricação de alumínio faça-se economicamente praticável, a bauxita tem que apresentar não menor que 30 % de óxido de alumínio (Al_2O_3) utilizável. Torna-se necessários 5 a 7 toneladas de bauxita para gerar 2 toneladas de alumina (óxido de alumínio), que se transformam em 1 tonelada de alumínio. A bauxita exhibe pigmentação vermelha e é avistada, sobretudo, em zonas tropicais e subtropicais do planeta, em virtude do intemperismo sobre aluminossilicatos (ABAL, 2017).

A bauxita é, usualmente, descoberta de forma farta em zonas tropicais a subtropicais. É um mineral mesclado, com uma pigmentação vermelha, heterogênea principalmente de um ou mais hidróxidos de alumínio, e inúmeras misturas de sílica, óxido de ferro, dióxido de titânio, silicato de alumínio dentre outras impurezas em proporções menores (CARDOSO, 2012).

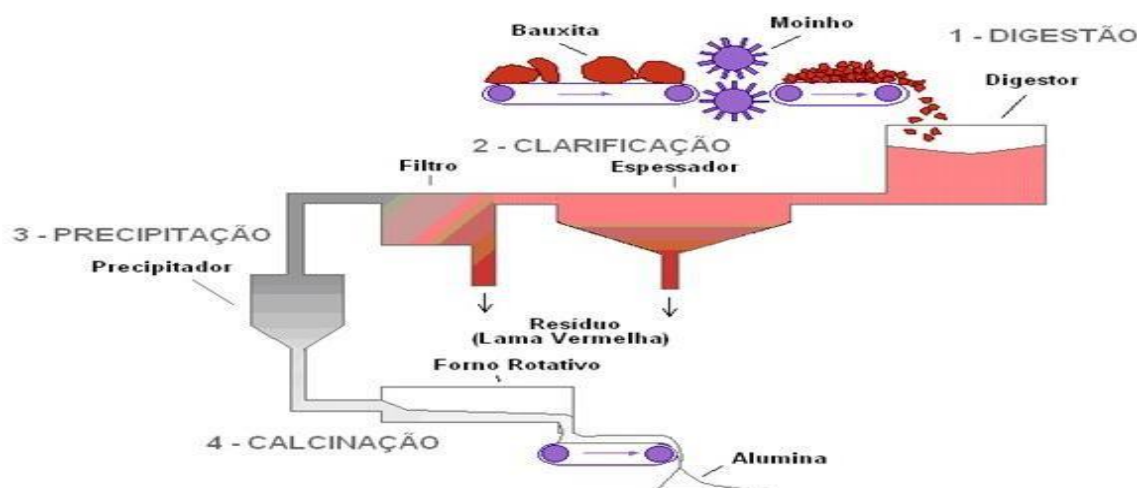
As ocorrências de bauxita são difusas, especialmente em zonas tropicais, onde o intemperismo ocorre em grande escala, resultando na formação de depósitos de bauxita. No entanto, esses processos são frequentemente limitados por certos obstáculos. Normalmente, a bauxita acontece em uma base fina (singularmente entre 2 a 5 metros) sobre ou próxima dela (HYDRO, 2020).

Entre as etapas do processo Bayer, clarificação, é concebida um rejeito insolúvel denominado lama vermelha, usualmente nas indústrias são gerados depósitos de rejeitos de amplo espaço que admitem esse material, no entanto uma boa porção desse rejeito não tem aplicação, deste modo, o aglomerado se torna inevitável acarretando impasses para a empresa e o meio em que está localizada (QUEIROZ *et al.*, 2018).

2.4.2 Beneficiamento da lama vermelha

A lama vermelha, um resíduo resultante do processo de beneficiamento da bauxita para a produção da alumina (Al_2O_3) a partir do processo Bayer (SILVA FILHO, 2007). Apresentação do processo Bayer por meio de diagrama de fluxo e esquema, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma e Esquema do Processo Bayer



Fonte: Wao (2003)

Segundo Sampaio, Andrade e Dutra (2005), o processo Bayer inicia pela moagem da bauxita e posterior adição de solução de NaOH, que dissolve o alumínio virgente no mineral, conforme a pressão, em reatores, formando o íon $Al(OH)^4$. Finalizada a parte da digestão, as impurezas encontram-se em fase sólida, sendo conhecida como “lama vermelha”. O aluminato de sódio, muito solúvel em água, é isolado da lama vermelha por etapas de espessamento, seguidas de filtragem.

Inúmeras averiguações são feitas desejando reaproveitar resíduos e materiais naturais, com interesse de reduzir as perturbações ambientais provocados por estas indústrias (BANNA, 2017).

Segundo Pedro (2014) é essencial o progresso de tecnologias que visem à reutilização apropriada de lama vermelha. Uma de suas utilidades encontra-se associada às características catalíticas relacionadas aos seus elementos, de modo que é capaz de ser aplicada no método de efluentes para oxidação de compostos orgânicos.

2.4.3 Compósitos com incorporação de lama vermelha

Além da sílica, a lama vermelha demonstra elevadíssimos teores de ferro, sódio, cálcio e demais itens que juntam propriedades significativas aos produtos cerâmicos (RIBEIRO *et al.*, 2010).

Com associação à aplicação do resíduo lama vermelha como agente de reforço em matrizes poliméricas, demonstra que grande parte dos estudos descobertos na literatura está referente ao uso de termorrígidos na matriz, particularmente resina de poliéster insaturado (BARBOSA, 2019).

Pedro (2014) desenvolveu um trabalho sobre lama vermelha que teve como propósito a síntese e caracterização de catalisadores heterogêneos preparados com base da calcinação de lama vermelha em atmosfera de ar, avaliando-se diferentes temperaturas de tratamento térmico. Observou-se a presença das seguintes fases cristalinas SiO_2 , Fe_2O_3 , $Na_4Ti_5O_{12}$, $Al(OH)_3$ e $AlNa(SiO_4)$. Observou-se também a presença predominante de óxidos de Fe^{3+} nas amostras calcinadas.

Segundo Silva (2019), a sua pesquisa sobre os resíduos de lama vermelha, possibilitou exibir possíveis soluções para problemas confrontados pelas indústrias mineradoras, que formam grande quantidade de resíduos, e com isso desenvolver um novo material que apresenta um bom comportamento mecânico, contribui de maneira efetiva para preservação do meio ambiente. Esse material é sustentável e de baixo custo, podendo ter várias aplicações nos setores industriais. Trata-se de um compósito formado por resíduos de lama vermelha e fibras de bambu.

2.5 Compósitos híbridos

As principais finalidades dos materiais compósitos híbridos localizam-se na produção de elementos estruturais com pequeno peso para o deslocamento aquático, terrestre e aéreo, artigos de esportes e automobilísticos (CALLISTER, 2020).

Os materiais compósitos híbridos mostram em sua propriedade, combinações de inúmeros tipos de reforços, juntando fibras e partículas em um só material ou ainda utilizando

na fabricação mais de um modelo de partícula ou de fibra no próprio material (BARROS, 2006).

Segundo Barbosa (2018), seu compósito híbrido de fibra de bambu e resíduo de caulim apresentaram um resultado significativo em valores de resistência mecânica, além do mesmo possuir um limite de resistência maior comparado com o compósito de matriz plena.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

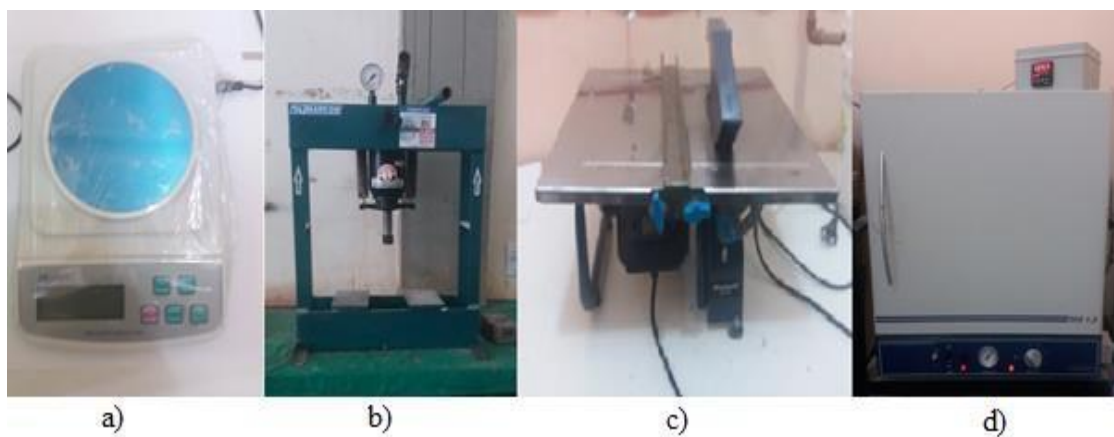
3.1 Equipamentos

Equipamentos utilizados na elaboração do presente estudo foram:

- Balança, modelo SF – 400 C;
- Prensa hidráulica, MACRON, modelo MPH -15, com capacidade de 15 Ton;
- Máquina de Corte, DeWALT, modelo DW860B;
- Estufa, MD 1.3 – MEDICATE, T 50 °C a 250 °C;
- Microscópio Eletrônico de Varredura, HITACHI, modelo TM 3000;
- Molde Metálico, Dimensões (320 mm x 172,5 mm x 5 mm);
- Máquina universal de ensaios, KRATOS, modelo IKCL3.

A Figura 5 mostra alguns dos equipamentos utilizados na realização do trabalho.

Figura 5 - Equipamentos: (a) Balança; (b) Prensa hidráulica; (c) Máquina de corte e (d) Estufa



Fonte: Autor (2023)

3.2 Materiais de partida

3.2.1 Materiais

- Resina poliéster isoftálica, CENTERGLASS, Ind. com. R e Fibras LTDA, com densidade $1,15 \text{ g/cm}^3$, conforme informado pelo fabricante;
- Acelerador de Cobalto, produto comercial denominado CAT MET UMEDECIDO (Solução de Octoato de cobalto 1,5 %), adquirida na empresa de Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA;
- O agente de cura utilizado foi o catalisador, produto comercial BUTANOX M-50, marca de AEROJET (Peróxido de metil etil cetona [MEK-P]), adquirido da empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA;
- O desmoldante líquido para ajudar na remoção da placa, produto adquirido da empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA.

3.2.2 Fibra de vidro

A fibra de vidro foi adquirida em formato de manta no comércio local da cidade de Belém do Pará. Segundo Costa (2012), a fibra de vidro apresenta a densidade de $2,40 \text{ g/cm}^3$. A Figura 6 mostra a manta de fibra de vidro.

Figura 6 – Manta de fibra de vidro



Fonte: Autor (2023)

3.2.3 Lama vermelha

O resíduo foi fornecido pela empresa Hydro Alunorte localizada no município de Barcarena no estado do Pará, o resíduo foi acomodado em containers. Segundo Shinomiya *et al.* (2019), a densidade da lama vermelha é de 2,5 g/cm³. Na Figura 7 observa-se o resíduo.

Figura 7– Lama vermelha



Fonte: Autor (2023)

3.3 Métodos

3.3.1 Métodos de corte da fibra

O método de corte da fibra de vidro iniciou-se na separação dos feixes, em seguida ao serem extraídos esses feixes são agrupados para serem cortados com auxílio de uma tesoura metálica, são cortados nos comprimentos milimétricos pré-estabelecido. Esse processo uniu os feixes de fibra de vidro a um papel graduado com as dimensões de 15 mm, 30 mm e 45 mm.

3.3.2 Desagregação do resíduo de lama vermelha

O resíduo de lama vermelha foi levado à estufa e submetido a uma temperatura de 105 °C por 72 horas. Em seguida foi submetido a um processo de trituração por um moinho de bolha para desagregar o resíduo de forma que facilite a passagem do mesmo pela peneira. Em seguida iniciou-se o processo de peneiramento, onde se opera uma peneira de 100 mesh da série Tyler.

3.3.3 Caracterização morfológica

O resíduo de lama vermelha foi examinado morfológicamente, por microscopia eletrônica de varredura (MEV), no equipamento da marca HITACHI, modelo TM 3000, localizado no PRODERNA (Programa Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) da Universidade Federal do Pará, campus Belém. A fim de observar a morfologia dos materiais que poderiam influenciar nas propriedades dos compósitos.

3.3.4 Difração de raios-X

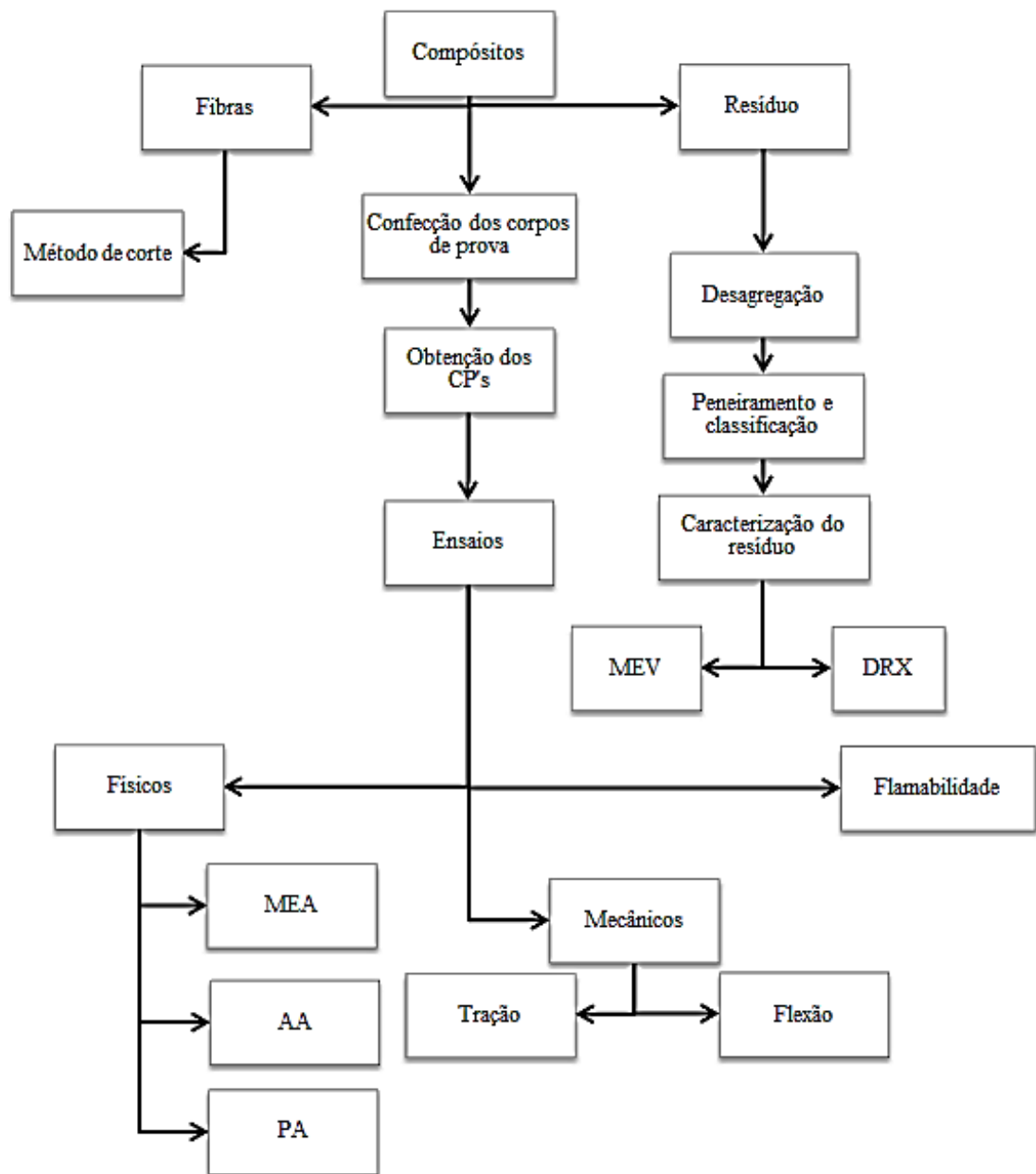
A análise mineralógica do resíduo foi realizada através do método de difração de raios-X (DRX) desempenhado com objetivo de constatar as fases cristalinas do material. Antes de ser submetido à análise, o resíduo foi submetido a uma redução granulométrica usando um pistilo e almofariz para adequar o tamanho dos grãos e aumentar a relevância da amostra.

O aparelho empregado para a execução da análise foi o difratômetro de Raios-X modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60 da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubos de Raios-X cerâmico de ânodo de Cu ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200 W, 60 kv.

3.3.5 Produção dos compósitos

Para a fabricação dos compósitos de matriz polimérica plena, compósitos poliméricos com fibras de vidro na proporção mássica de 5 % e nos diferentes comprimentos (15, 30 e 45 mm) e compósitos híbridos com inserção de fibra de vidro (45 mm) e lama vermelha (proporção mássica de 10 %) foi utilizado o método *hand lay up* para a fabricação de placas de compósitos em um molde metálico na forma retangular nas dimensões de 320 mm x 172,5 mm x 5 mm associada a prensagem em prensa hidráulica com carga de 25 kN. A Figura 8 mostra o processo de produção dos compósitos.

Figura 8 – Fluxograma do processo



Fonte: Autor (2023)

3.3.6 Etapas da produção dos compósitos.

1. Primeiramente foram efetuados cálculos para se definir as respectivas proporções mássicas da resina poliéster isoftálica, fibra de vidro, resíduo de lama vermelha, catalisador e acelerador de Cobalto necessário para produzir as placas de compósitos. Onde o valor da proporção de fibra de vidro se manteve em 5 %, com variação dos comprimentos da fibra (15 mm, 30 mm e 45 mm).

2. Foi realizada a medição da massa e volume de todo o material necessário para a confecção de cada placa de compósito de acordo com a sua proporção.

3. Com esses valores deu-se início a pesagem dos materiais feita em balança analítica para a massa e volume de todo o material necessário para a confecção de cada placa de compósito de acordo com a sua proporção. Vale ressaltar que o resíduo de lama vermelha foi levado a estufa por 20 minutos em uma temperatura de 105° C, para remover a umidade superficial.

4. Após a produção das placas de compósitos, se iniciou a fabricação pelas placas de matriz plena (MP), em seguida foram confeccionadas as placas de matriz polimérica com fibra de vidro dispostas aleatoriamente dentro do molde metálico nos comprimentos de 15, 30 e 45 mm e na proporção fixa de 5 %. Na sequência, foram confeccionadas as placas de compósitos híbridos utilizando a combinação mais eficiente de fibra e resíduo (fibra de vidro e lama vermelha).

5. Antes de se iniciar o processo de homogeneização, foi utilizado desmoldante no molde para desenvolver uma película que facilita a remoção da placa, posteriormente inicia o processo de mistura, onde as fibras são dispersas no molde metálico aleatoriamente (descontínua), a mistura composta pela resina, CAT MET umedecido, em seguida foi inserido o resíduo de lama vermelha e por último MEK-P homogeneizando por um determinado tempo antes de despejar no molde metálico, após despejar a mistura no molde e aguardado o ponto de gel (entre 7 a 12 minutos) para a prensagem. As placas foram prensadas por uma prensa hidráulica de carga 25kN por 20 minutos, em seguida ela foi removida do molde e identificada de acordo com sua composição, em seguida armazenada para seu processo de cura durante 24 horas. A Figura 9 apresenta um fluxograma da produção dos compósitos.

Figura 9 – Fluxograma da produção dos compósitos



Fonte: Autor (2023)

Foram realizados os cortes dos corpos de prova com o auxílio de uma máquina de corte (marca DeWALT, modelo DW860B), de acordo com as normas (ensaios físicos (ASTM D 792 – 2008, ASTM D 2737 – 2009 e ASTM D 570 – 1998), ensaios mecânicos (ASTM D 3039 – 2017 e ASTM D 790 – 2017) e o ensaio de flamabilidade (ASTM D 635 – 2018)).

3.3.7 Caracterização física

Os corpos de prova da caracterização física possuem dimensões 25 mm x 25 mm de acordo com as normas específicas para cada ensaio:

- Massa específica aparente (MEA (g/cm^3)) – ASTM D 792 – 2008;
- Porosidade aparente (PA (%)) – ASTM D 2734 – 2009;
- Absorção de Água (AA (%)) – ASTM D 570 – 1998.

As amostras foram secas em 105 °C por 24 h para obter o dado sobre a massa seca, em seguida, os corpos de prova foram imersos em água destilada por 24 h com finalidade de se adquirir a massa úmida. Posteriormente, foi verificada a massa imersa através de um aparato instalado na balança analítica. A realização das análises foi executada na Usina de materiais do Laboratório de Engenharia Química (LEQ), da Universidade Federal do Pará. A Figura 10 apresenta os corpos de prova para realização dos ensaios físicos.

Figura 10 - Corpos de prova (ensaio físico)

Fonte: Autor (2023)

Seguiu-se as normas ASTM D 792 , ASTM D 2734 e ASTM D 570 foram elaborados os ensaios físicos conforme as equações.

a) Massa Específica Aparente

A massa específica aparente foi definida pela Equação 1

$$MEA(g/cm^3) = \frac{M_s}{M_s - M_i} \times \rho_{H_2O} \quad (1)$$

Onde:

M_s = massa seca(g);

M_i = massa imersa(g).

b) Absorção de Água

O resultado de Absorção de Água foi definido pela Equação 2

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

M_u = massa úmida(g);

M_s = massa seca(g).

c) Porosidade aparente

A porosidade aparente foi definida pela Equação 3

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

Onde:

M_u = massa úmida(g);

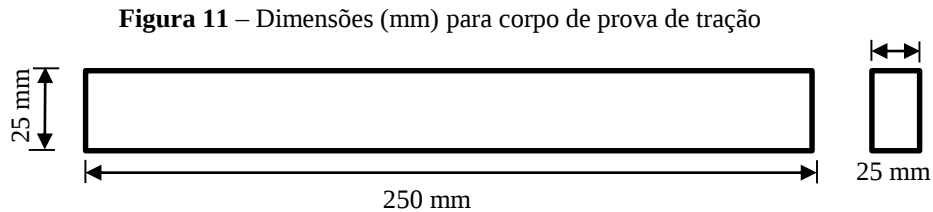
M_s = massa seca(g);

M_i = massa imersa(g).

3.3.8 Caracterização mecânica

3.3.8.1 Resistência à tração

Foram confeccionados cinco corpos para cada série fabricada, com um total de 25 corpos de prova. O ensaio de resistência à tração seguiu a norma ASTM D 3039 - 2017, onde foram seguidas as dimensões conforme a Figura 11 a seguir.



Fonte: Adaptado de ASTM D3039 (2017)

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal, marca KRATOS, modelo KE 2000 kgf com carga máxima de 5 kN, a uma velocidade de ensaio de 2 mm/min. Os ensaios foram realizados no laboratório da faculdade de engenharia mecânica da Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí.

O ensaio de tração tem como objetivo central obter resistência de tração do corpo de prova, a Figura 12 ilustra o ensaio de tração sobre o corpo de prova.

Figura 12 – Ilustração do corpo de prova sobre o ensaio de tração



Fonte: Autor (2023)

Onde o diâmetro se define por d_0 , P a carga aplicada em l_0 .

A tensão de resistência à tração (σ) em MPa pode ser determinada pela relação entre a carga aplicada no corpo de prova com sua área útil, de acordo com a Equação 4.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Onde F é carga aplicada em Newtons (N), A é área útil da seção transversal do corpo de prova, em milímetros quadrados (mm²). O módulo de elasticidade (E) em MPa pode, ainda, ser calculado utilizando-se a Equação 5.

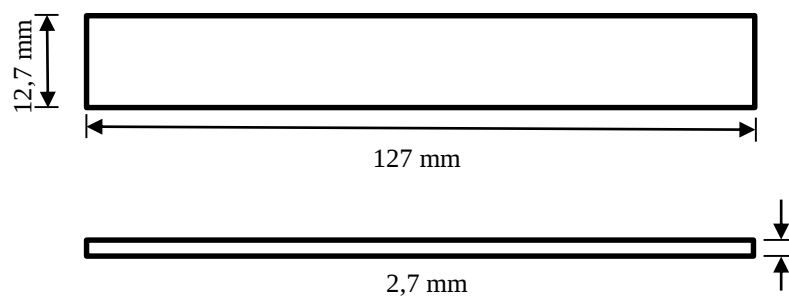
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (5)$$

No qual σ é tensão de resistência à tração em MPa e ϵ (adimensional) é a deformação do corpo de prova.

3.3.8.2 Resistencia à flexão

O ensaio de flexão foi realizado de acordo com a norma ASTM D 790 - 2017. Foram confeccionados cinco corpos de prova para cada série fabricada, com um total de vinte e cinco amostras. As dimensões dos corpos de prova são mostradas na Figura 13 a seguir.

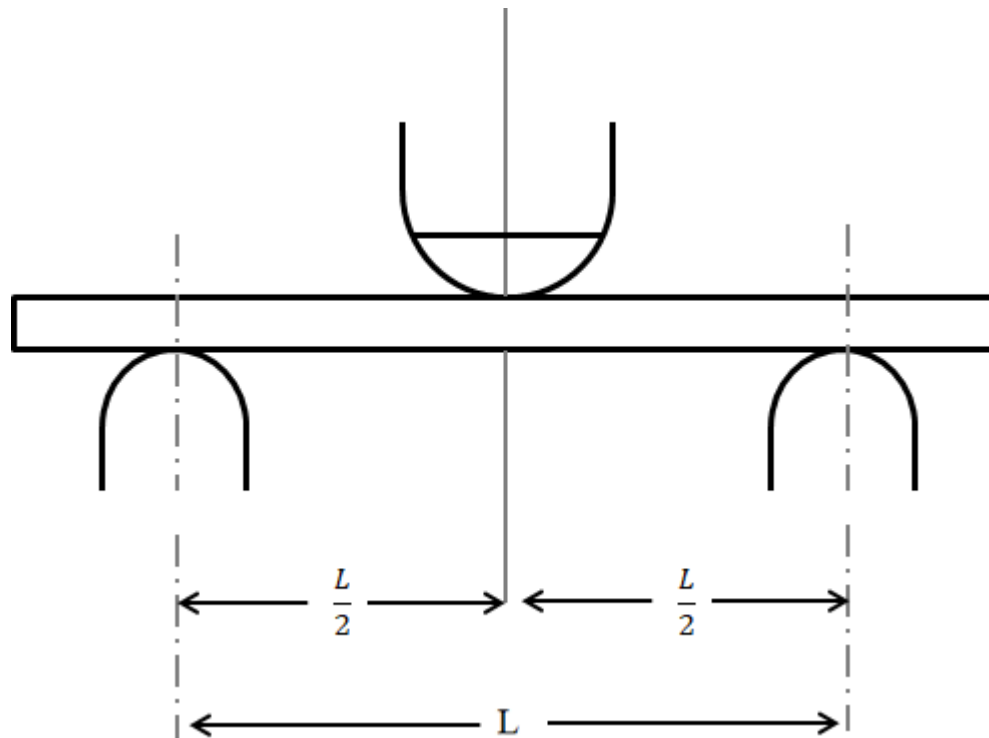
Figura 13 – Dimensões (mm) para corpos de prova de flexão



Fonte: Adaptado de ASTM D790 (2017)

A Figura 14 mostra o esquema sobre o comportamento do corpo de prova sobre o ensaio de flexão em três pontos.

Figura 14 – Esquema sobre o comportamento do ensaio de flexão em três pontos



Fonte: Autor (2023)

As propriedades obtidas sobre o ensaio de flexão (Figura 14) são: módulo de elasticidade em flexão (E_f), tensão de ruptura em flexão (σ_f). Notando-se que o ensaio representa a aplicação da carga em pontos definidos, onde essa carga começa em 0 e aumenta até a ruptura do corpo de prova.

A Equação 6 exibe 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.

$$TRF = \frac{3PL}{2Bh^2} \quad (6)$$

Onde P é a carga no instante da ruptura (N), L é a distância entre os apoios do corpo de prova (mm), B é a largura do corpo de prova (mm) e h é a altura do corpo de prova (mm).

3.3.9 Flamabilidade

O ensaio de flamabilidade foi realizado na usina de materiais do laboratório de engenharia química (LEQ). Os corpos de prova para o ensaio possuem as dimensões de 12,7 mm x 127 mm, conforme as orientações estabelecidas pela ASTM D 635 – 2018. Essa norma sujere um valor quantitativo e qualitativo sobre o desempenho durante o processo de queima, onde são avaliados a velocidade propagação, tempo de ensaio e a distância percorrida da chama. Durante o ensaio, são realizadas duas marcações nos corpos de prova 25 mm e 100 mm da extremidade a ser queimada para registrar o tempo necessário da combustão, tempo esse começando a ser contado no momento em que a chama atinge a marca de 25 mm e parado ao atingir a marca de 100 mm.

Segundo a norma são necessários 3 corpos de prova para cada teste. No entanto, nos casos onde o corpo de prova não atinge a segunda marcação, a norma recomenda a realização de mais 7 testes. Se, em todos os casos os corpos de prova não atingirem a segunda marca, o corpo de prova é classificado como SI (sem ignição). A Figura 15 mostra a realização do ensaio de flamabilidade.

Figura 15 - Ensaio de flamabilidade



Fonte: Autor (2023).

3.3.10 Análise Estatística

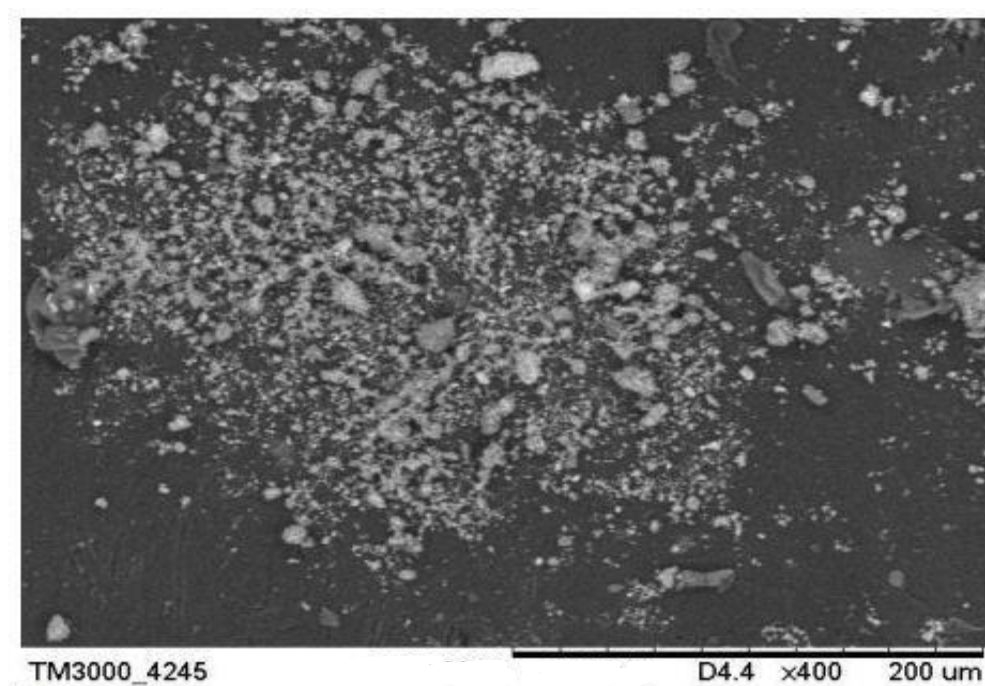
Os resultados obtidos nos ensaios físicos, tração e flamabilidade foram analisados estaticamente através da análise de variância (ANOVA) de fator único através do software Past 4.03 com uma confiança de 95 %. Para os resultados estatisticamente significativos ($p\text{-Valor} > 0,05$) a hipótese nula (H_0) foi rejeitada, indicando que os níveis analisados apresentam efeito significativo na variável dependente.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização morfológica

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada no resíduo de lama vermelha comomostra a Figura 16.

Figura 16 – MEV da lama vermelha



Fonte: Autor (2023)

Observa-se que o resíduo de lama vermelha é constituído por partículas distintas de tamanhos e formas. A dispersão das partículas apresenta maior regularidade em relação aos tamanhos e forma. Portanto, o resíduo bruto possui uma maior diversidade de partículas de diferentes dimensões e formas, e a existência de um número expressivo de partículas agregadas.

O tamanho das partículas podem influenciar o compósito, como a distribuição, a resistência mecânica, as propriedades térmica entre outras características. Com o seu aumento de tamanho melhora as propriedades térmicas e diminui a resistência mecânica.

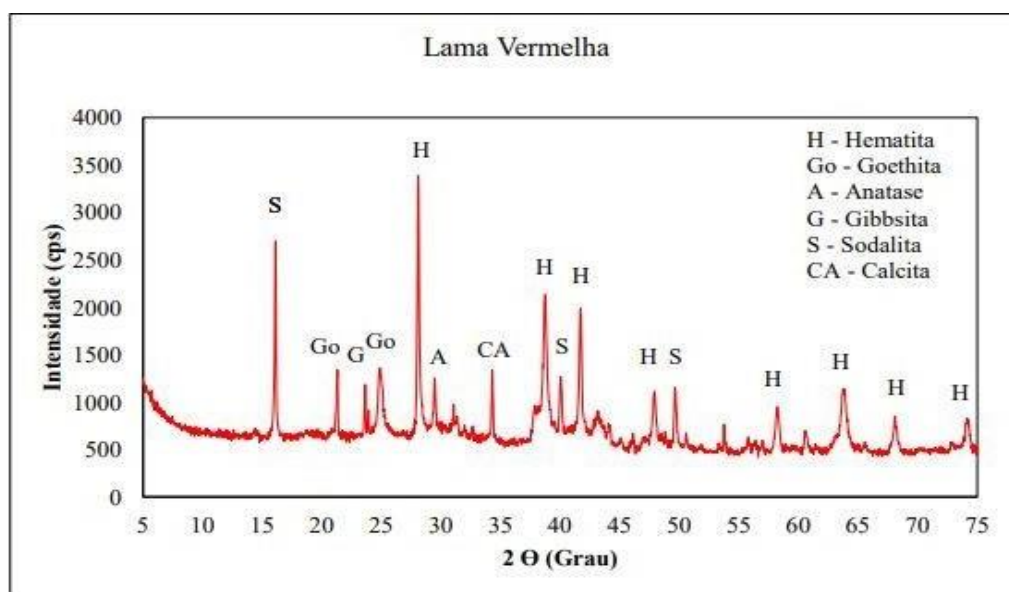
Segundo Antunes *et al.* (2011), que em sua pesquisa do refino de bauxita observou as amostras de lama vermelha, a alta alcalinidade de lama vermelha sendo o problema central do resíduo. Notou-se, que há varias formas distintas de ativação, podem prover uma alteração do pH da amostra, possibilitando que o resíduo possa ser reutilizado em outros processos.

4.2 Difração de Raios-X (DRX)

A lama vermelha foi caracterizada através da difração de Raios-X e os resultados obtidos encontram-se na Figura 17. Os maiores picos mostram as maiores concentrações mineralógicas, conforme mostrado em ordem decrescente de intensidade a Hematita, Sodalita, Goethita, Calcita, Anatásio e Gibbsita. Estes resultados já observados antes por outros pesquisadores (FARIAS (2019); SILVA (2019)).

Segundo Silva (2019) a lama vermelha ao atingir temperaturas acima de 500 °C seus picos de difração aumentam, com o pico na hematita.

Figura 17 - Difractometria da Lama Vermelha



Fonte: Autor (2023)

4.3 Ensaios físicos

A Tabela 1 apresenta os resultados de massa específica aparente, porosidade aparente e Absorção de Água dos compósitos fabricados.

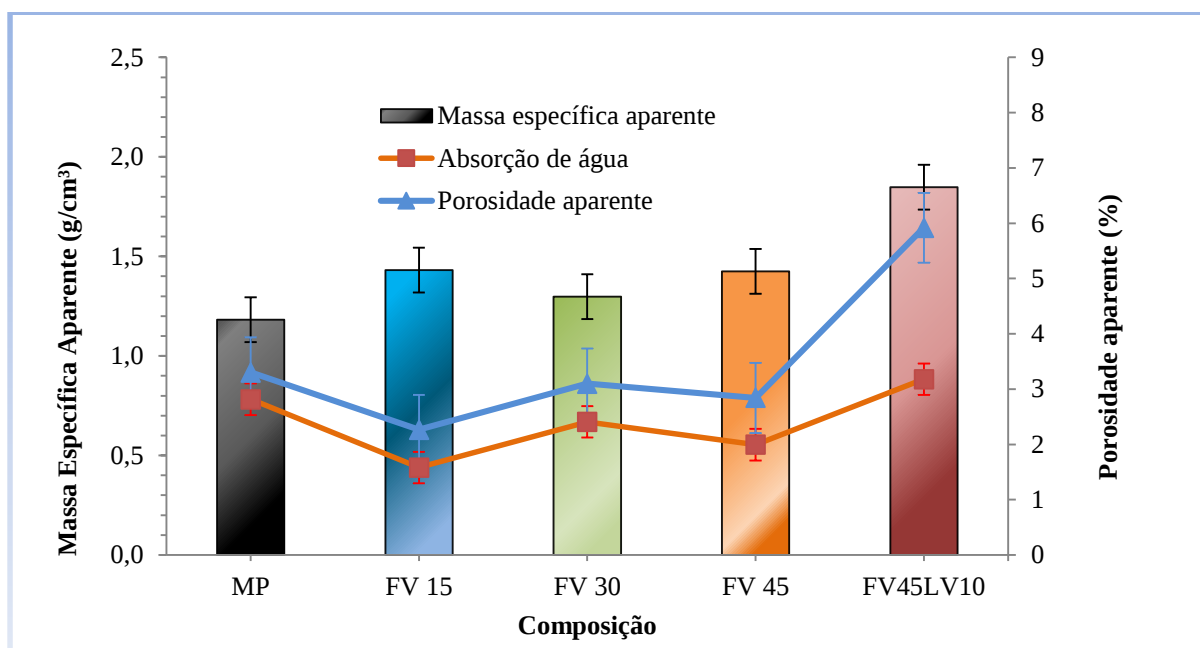
Tabela 1 – Resultado dos ensaios físicos

Composições	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)
Matriz Plena	2,8161 ($\pm 1,5368$)	3,3023 ($\pm 1,7208$)	1,1814 ($\pm 0,0202$)
FV15	1,5821 ($\pm 0,3887$)	2,2646 ($\pm 0,5634$)	1,4313 ($\pm 0,0535$)
FV30	2,4073 ($\pm 1,2832$)	3,0996 ($\pm 1,5990$)	1,2973 ($\pm 0,0292$)
FV45	1,9943 ($\pm 0,5373$)	2,8410 ($\pm 0,7627$)	1,4251 ($\pm 0,0181$)
FV45LV10	3,1792 ($\pm 0,8883$)	5,9172 ($\pm 1,8750$)	1,8474 ($\pm 0,0920$)

Fonte: Autor (2023)

A Figura 18 mostra a comparação entre massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente.

Figura 18 – Comparação entre massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente



Fonte: Autor (2023)

Os resultados da Tabela 1 mostram que os compósitos com adição de fibra de vidro apresentam melhores resultados que a matriz plena (MP). Onde, destaca-se a FV30 (fibra de vidro 30 mm) a qual, apresenta uma Absorção de Água e Porosidade Aparente superior a FV15 (fibra de vidro 15 mm) e FV45 (fibra de vidro 45 mm), entretanto seu resultado foi inferior a o compósito híbrido.

Os resultados da Tabela 1 mostram que houve um aumento de 63,94 % na Massa Específica Aparente para a composição FV45LV10 (fibra de vidro 45 mm e lama vermelha proporção mássica 10 %) em relação à matriz plena. Esse aumento ocorre devido à maior densidade da fibra ($2,40 \text{ g/cm}^3$) e do resíduo ($2,50 \text{ g/cm}^3$) que foi maior que o da resina ($1,15 \text{ g/cm}^3$). O comportamento de aumento de MEA (Massa Específica Aparente) está previsto de acontecer, segundo Callister (2020), qualquer fase constituinte do compósito influencia nas características efetivas.

Os resultados de Absorção de Água e Porosidade Aparente também apresentam um aumento na composição FV45LV10 em relação à matriz plena. Segundo Dias (2018), esse aumento ocorre devido ao método de fabricação manual aplicado no processo de fabricação do material, onde a possibilidade de surgimento de falhas como poros, bolhas, trincas e vazios são acentuada.

4.4 Caracterização mecânica

4.4.1 Ensaio de resistência à tração

Os compósitos reforçados com fibra de vidro e o compósito híbrido de fibra de vidro e lama vermelha foram avaliados através do ensaio de tração. Os resultados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2– Resultados do ensaio de tração de todas as composições confeccionadas

Composição	Tração (MPa)	Alongamento (mm)	Mód. Elasticidade (GPa)
MP	16,4525 ($\pm 1,4781$)	1,3786 ($\pm 0,1251$)	2,1511
FV 15	17,0025 ($\pm 2,1666$)	1,2162 ($\pm 0,2632$)	2,6007
FV 30	20,3730 ($\pm 2,4693$)	1,4066 ($\pm 0,2401$)	2,6419
FV 45	24,5211 ($\pm 4,6134$)	1,8016 ($\pm 0,3722$)	2,5497
FV45LV10	33,4019 ($\pm 3,7889$)	2,2478 ($\pm 0,3037$)	2,6825

Os resultados mostrados na Tabela 2 demonstram que conforme houve aumento no comprimento da fibra de vidro a resistência mecânica também aumentou. Esse aumento foi ainda mais significativo quando foi introduzido o resíduo na composição. Todas as composições obtiveram valores superiores que a matriz plena, onde, o compósito híbrido com fibra de vidro e lama vermelha obteve um aumento percentual de 103,02 % em relação à matriz plena.

Tavares (2018), em seu trabalho com fibras de vidro e palha da costa em duas frações mássicas (2,5 % e 5 %) e com comprimentos de 15 mm, 30 mm e 45 mm, encontrou os valores percentuais das resistências à tração dos compósitos reforçados com fibra de vidro (2,5 % fração massica e com comprimento de 15 mm) foi de 145,66 % superior em relação à matriz plena.

Segundo Tavares (2018), a Porosidade Aparente está relacionada com a resistência do material, e como as fibras apresentaram uma menor porosidade aparente, isso resultou em um aumento na resistência à tração.

Segundo Vieira e Carvalho (2016), o módulo de elasticidade demonstra arigidez do material, sendo assim os compósitos com fibra de vidro resultaram módulos inferiores em relação à matriz plena. Isso foi devido às propriedades da fibra de vidro a qual apresenta alta resistência mecânica, além de baixo módulo de elasticidade.

Segundo Santos (2020), em seu trabalho sobre análise de granulometria da lama vermelha, a que mostrou uma melhoria significativa na tensão de resistência foi referente à composição de 10 %, que teve um aumento de aproximadamente 95 % em relação à matriz plena. O autor destaca que esse aumento na resistência à tração pode estar relacionado a fatores como uma boa distribuição da mistura, homogeneização e compactação dos resíduos e resina no decorrer do método de produção, contendo assim mínimo de defeitos e imperfeições.

A Tabela 3 mostra os resultados do teste Turkey para os compósitos com fibra de vidro para a resistência à tração identificando a diferença

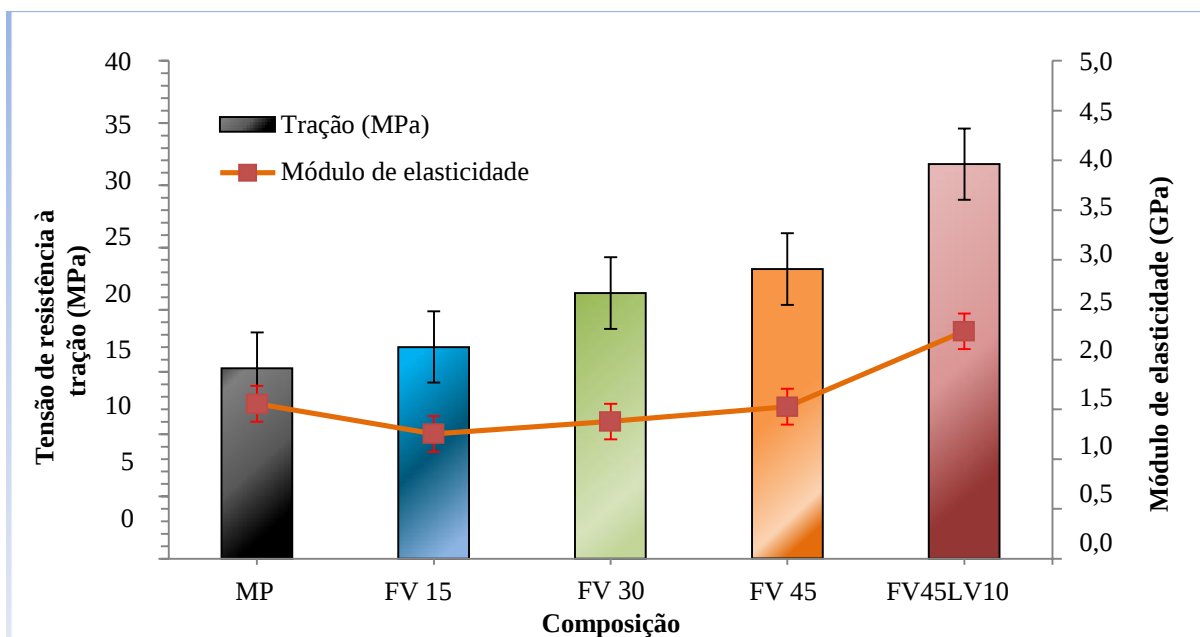
Tabela 3 – Comparativa entre as médias (teste de Turkey)

Comparações	Xa-Xb	D.M.S	Conclusão
FV15-MP	0,5499	5,5291	Não Difere Significativamente
FV30-MP	5,7003	5,5291	Difere Significativamente
FV45-MP	8,0686	5,5291	Difere Significativamente
FV30-FV15	2,3682	5,5291	Não Difere Significativamente
FV45-FV15	7,5186	5,5291	Difere Significativamente
FV45-FV30	2,36824	5,5291	Não Difere Significativamente

Fonte: Autor (2023)

Com base nesses resultados A FV 30 e a FV 45 tiveram um impasse onde são associadas como não difere significativamente. Esse resultado contraditório é devido ao desvios padrões. Ao serem comparadas com às demais composições FV15 e MP à proporção que teve uma melhor média foi FV30 onde ela diferiu das composições. Ao ser comparada com ambas a FV45 difere significativamente, mesmo ela se mostrando igual à FV 30 em novos testes pelo método turkey, identificou-se uma diferença mínima, dessa forma ao se realizar o teste em efeito comparativo a FV 30 teve uma media melhor que a FV45.

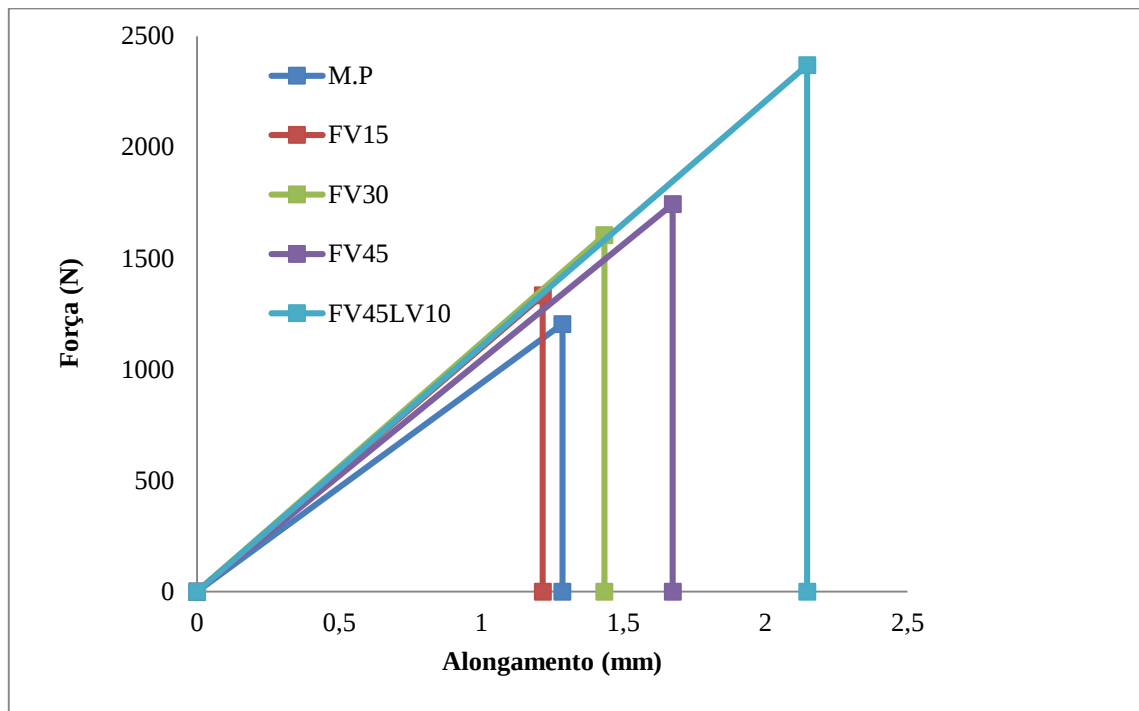
Figura 19 ilustra o gráfico com os valores obtidos do ensaio de tração para uma comparação entre as composições.

Figura 19 – Comportamento de resistência à tração dos compósitos

Fonte: Autor (2023)

Na Figura 19, o compósito FV45LV10 obteve um valor superior às demais composições. Em relação à matriz plena observa-se que teve um aumento de 103,02 %, e em relação à composição de FV45, obteve um aumento de 36,22 %. Segundo Almeida (2020), a carga do resíduo consegue influenciar em uma melhora do material positivamente, aumentando sua resistência à tração quando não se ultrapassa o limite de saturação, se o limite for ultrapassado o resíduo começa a saturar, ocasionando em uma serie de defeitos.

A Figura 20 mostra o gráfico com a relação de força(N) e o alongamento (mm) de todas as composições confeccionadas.

Figura 20 – Gráfico de força x alongamento

Fonte: Autor (2023)

No gráfico da Figura 20, é possível observar que a composição FV45LV10, foi a que apresentou uma maior força de ruptura, ultrapassando a marca de 2300 N. Além disso, essa composição também apresentou um maior alongamento atingindo a marca de 2,1 mm, antes da ruptura do material.

4.5.2 Ensaio de resistência à flexão

Para análise das propriedades mecânicas dos compósitos foi efetuado o ensaio de flexão seguindo a norma ASTM D 790, a qual possibilitou quantificar: Resistência a flexão, Módulo de elasticidade do material quando aplicada uma força perpendicularmente ao seu eixo longitudinal. Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de flexão do material estudado.

Tabela 4 – resultados dos ensaios de flexão de todas as composições

Composição (%)	Tensão (MPa)	Alongamento (mm)	Mód. Elasticidade (GPa)
MP	145,8184 ($\pm 10,8103$)	7,1012 ($\pm 1,1810$)	1,0574
FV 15	78,3104 ($\pm 6,4765$)	2,6786 ($\pm 0,6261$)	1,5261
FV 30	88,2252 ($\pm 17,4499$)	2,8302 ($\pm 1,1260$)	1,7447
FV 45	85,5203 ($\pm 10,2439$)	2,7298 ($\pm 0,4762$)	1,6117
FV45LV10	93,8348 ($\pm 36,7980$)	4,1076 ($\pm 1,3544$)	1,2397

Fonte: Autor (2023)

A Tabela 4 mostra que todas as composições obtendo fibra de vidro tiveram seus resultados inferiores em comparação a matriz plena, entretanto a composição contendo fibra de vidro e lama vermelha teve seus resultados superiores em relação as composições com inserção de fibra de vidro, a FV45LV10 teve um aumento de 19,82 % em relação a FV15. De acordo com Santos (2018), obteve a mesma experiência sobre suas fibras de vidro em relação à matriz plena, com 10,16 % inferior a esses valores, o autor destaca que esse desempenho está relacionado à baixa adesão da fibra a resina.

Os módulos de elasticidade de todas as composições de fibra de vidro tiveram valores inferiores comparados com o da matriz plena. Segundo Agarwal e Brounman (1990), essa característica ocorre, pois as frações de volume das fibras são difíceis de serem processadas para garantir uma estrutura sem defeitos. A Tabela 5 mostra os comparativos entre as medias.

Tabela 5 – Comparativo entre as medias (pelo teste Turkey)

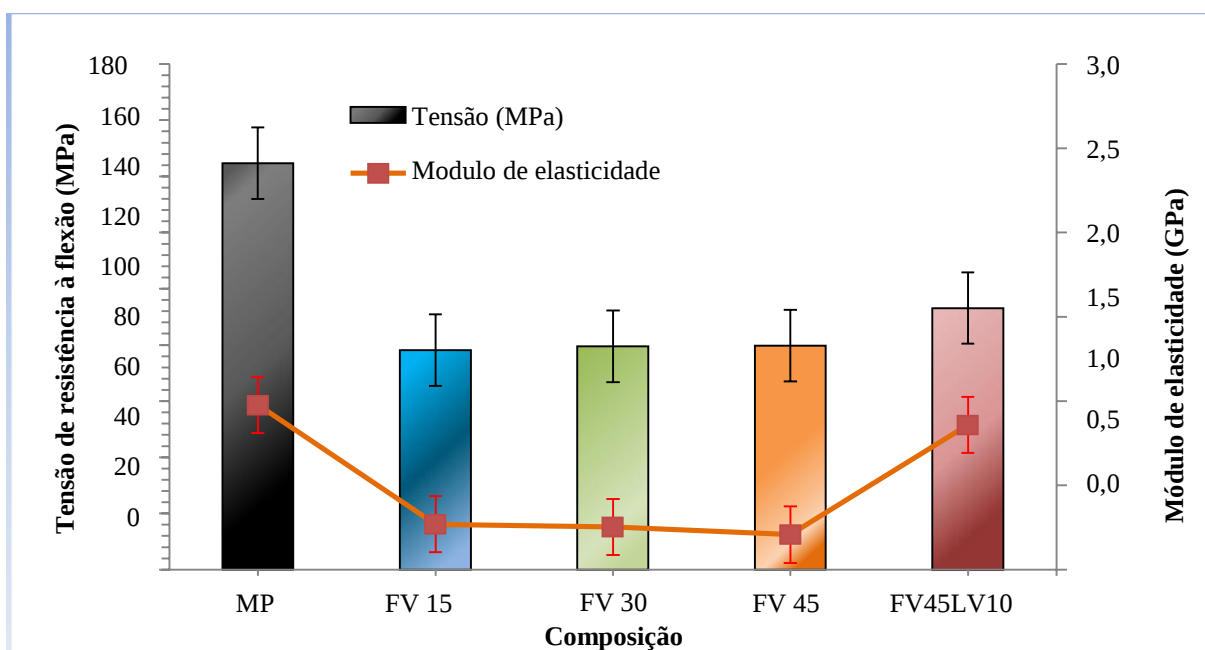
Comparações	Xa-Xb	d.m.s	Conclusão
FV15-MP	66,98	19,64396	Difere Significativamente
FV30-MP	75,068	19,64396	Difere Significativamente
FV45-MP	59,826	19,64396	Difere Significativamente
FV30-FV15	15,242	19,64396	Não Difere Significativamente
FV45-FV15	7,154	19,64396	Não Difere Significativamente
FV45-FV30	15,242	19,64396	Não Difere Significativamente

Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 5 mostra as composições de fibra de vidro, as quais obtiveram uma diferença significativa em relação à matriz plena. A FV30 em relação a FV15 mostrou um valor superior mesmo que em relação a FV45. Isso indica que, seguindo estatisticamente, mesmo que ela possa ter mostrado um valor semelhante à composição FV45, a FV30 ao ser comparada com a FV15 teve uma média melhor.

A Figura 21 representa um gráfico comparativo das composições de fibra de vidro 5 % nos comprimentos de 15 mm, 30 mm e 45 mm, e no compósito híbrido de fibra de vidro 45 mm e lama vermelha na proporção mássica de 10 %.

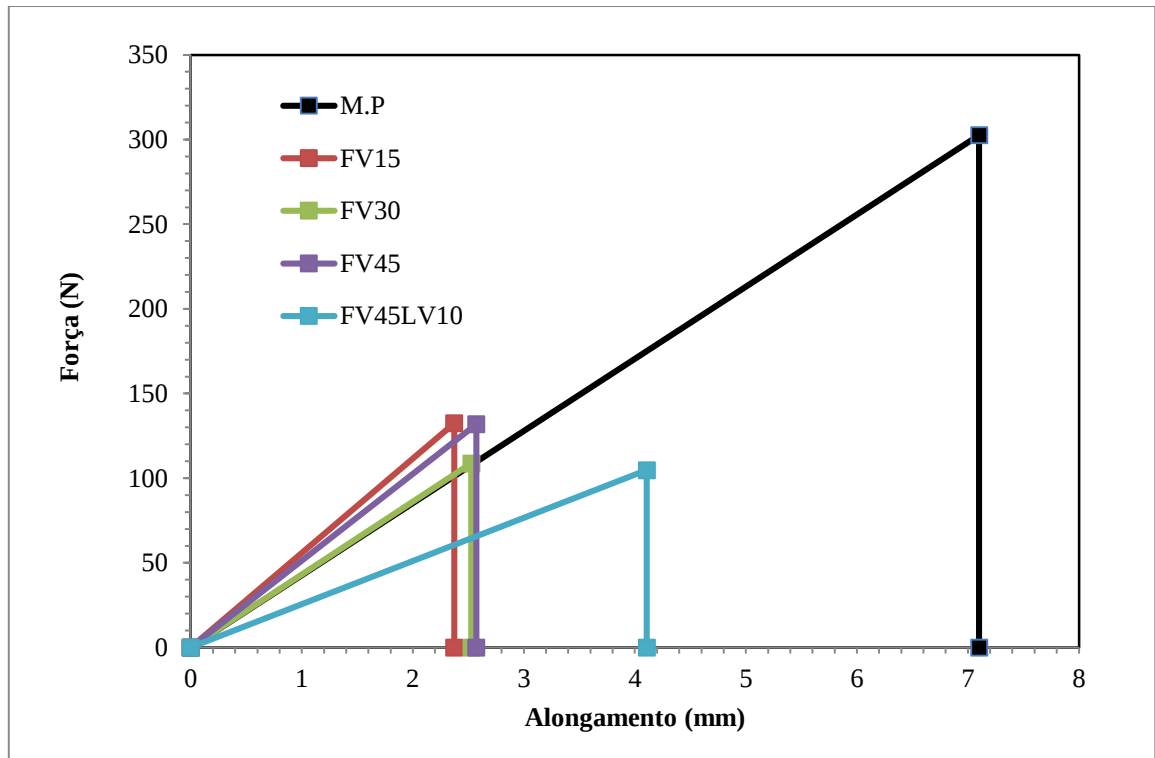
Figura 21 - Gráfico de tensão das composições



Fonte: Autor (2023)

Observa-se na Figura 21 que a composição FV45LV10 teve um aumento significativo em relação à composição FV15, que foi de 19,82 %. Segundo Souza (2016), refere-se à presença dos particulados que atenuam a mobilidade das cadeias poliméricas e contribuem para maior resistência do compósito. A adesão na área de interação entre a matriz e os reforços, acrescentando ainda a resistência de fletir do compósito.

Na Figura 22 observa-se um gráfico que demonstra uma comparação entre força (N) e alongamento (mm).

Figura 22 – Gráfico de força(N) x alongamento (mm) das composições

Fonte: Autor (2023)

Observa-se na Figura 22, que a composição FV45LV10, seu deslocamento foi maior em relação as composições FV15, FV30 e FV45.

4.5 Flamabilidade

O ensaio de flamabilidade do compósito (FV45LV10) mostra que a chama se extinguiu antes mesmo de atingir a segunda marca, fato esse explicado por Ullhah *et al.* (2014), destaca que à incorporação de partículas inorgânicas, com uma redução na taxa de queima, do material tendo pouco combustível disponível para propagação das chamas. A Tabela 6 contém os resultados do ensaio de flamabilidade do compósito híbrido e da matriz plena.

Tabela 6– Resultados do ensaio de flamabilidade

COMPOSIÇÃO	TAXA (mm/min)
Matriz plena	33,0786 ($\pm 1,7814$)
FV45LV10	SI (Sem Ignição)

Fonte: Autor (2023)

O resultado como mostrado na Tabela 6, à chama se extinguiu antes da marca, isso torna o material produzido um ótimo material com resistência a chamas, em outros trabalhos como Lima *et al.* (2019), onde seu resultado foi o mesmo pois, a chama se extinguiu antes da segunda marca.

Ribeiro *et al.* (2013), no seu trabalho utilizando compósito poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi, que o tempo médio de queima das amostras cresceu à medida que se adicionou mais resíduo ao compósito, comprovando de modo que quanto maior for o tempo de queima do material, inferior será a velocidade de queima, isso irá prejudicar a propagação da chama e ajudará extinguir a mesma.

Lima *et al.* (2019), em seu trabalho sobre a influência da sedimentação gravitacional da lama vermelha na resistência à chama, notaram que conforme acrescentava-se o resíduo de lama vermelha na matriz polimérica a velocidade de propagação da chama foi significativamente reduzida .

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

– A caracterização morfológica do resíduo de lama vermelha mostrou possuir partículas de diferentes formas e dimensões. A Difração de raios-X mostrou as maiores concentrações mineralógica, conforme mostrado em ordem decrescente de intensidade a Hematita, Sodalita, Goethita, Calcita, Anatásio e Gibsita.

– Os ensaios físicos mostraram um aumento progressivo na Massa Específica Aparente na composição FV45LV10, esse aumento ocorreu também em relação aos resultados de Absorção de Água e Porosidade Aparente, indicando uma melhora em seu desempenho.

– Em relação ao ensaio de tração, as propriedades do compósito híbrido com fibra de vidro e lama vermelha mostrou-se significativamente superiores a matriz plena e aos com inserção de fibra de vidro. Entre as fibras a FV45 mostrou-se com um melhor desempenho ao se comparada com a FV15 e FV30, ela teve uma resistência à tração 44,22 % e 20,36 % respectivamente maior que ambas. Já a FV45LV10 obteve um resultado superior em relação a as composições de FV15, FV30 e FV45 e a matriz plena. Em relação à matriz plena teve um aumento de 103,02 %.

– O ensaio de flexão dos compósitos com inserção de fibra de vidro e o compósito híbrido de fibra de vidro e lama vermelha, a FV45LV10 demonstrou um aumento de 19,82 % em relação a FV15.

– O ensaio de resistência às chamas do material compósito híbrido confeccionado foi muito significativo, além de mostrar um desempenho excelente devido à chama ter se extinguido e classificado o material produzido como SI (Sem Ignição).

– O compósito híbrido com fibra de vidro e lama vermelha seguindo todas as suas caracterizações realizadas, demonstrou um bom desempenho, mostrando assim possíveis aplicações em paredes, peças automobilísticas ou em outras desse modelo.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Examinar a influência de diferentes granulometrias nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos elaborados;
- Confeccionar materiais compósitos utilizando outras frações mássicas de fibras na matriz polimérica;
- Realizar a Microscopia Eletrônica de Varredura, analisar a interface matriz/reforço e a respectiva influência nas propriedades dos compósitos.

REFERÊNCIAS

- ABAL **bauxita na brasil mineração responsável e competitividade**. Gráfica Mundo, Abril, 2017.
- AGARWAL, B. D. **Analysis and Performance of Fiber Composites**. New York, 1980
- ALMEIDA, L.R.; **Reaproveitamento do resíduo de minério de ferro em Compósitos de matriz polimérica**, 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 de suas propriedades para futuras aplicações**. 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, 2011.
- 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.
- BARBOSA, J.T.L. **Caracterização de compósitos poliméricos feitos com resíduos pós-consumo (poliestireno de alto impacto) e industriais (lama vermelha e fibra de vidro/resina epóxi)**, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.
- BARBOSA, K.L.S. **Incorporação de fibras curtas de bambu (bambusa vulgaris) e resíduo industrial de caulim em compósitos de matriz polimérica: resistência à tração e fractografia**, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.
- BORGES, Daniel Reis. **Influência do uso de fibras de bambu (bambusa vulgaris) tratadas quimicamente em compósitos de polímero termofixo carregadas com resíduo da indústria do beneficiamento de minério de cobre**. 2018. 101f. Dissertação (Mestra do em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

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

CALLISTER, Jr., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9ª edição. LTC Editora, 2020.

CARDOSO, J. G. R.; CARVALHO, P. S. L.; FONSECA, P. S. M.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R.. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências**. Insumos Básicos. BNDES Setorial 33, p. 43-88, 2012.

FARIAS, D.C. **Compósitos híbridos com fibras de bambu (bambusa vulgaris) e lama vermelha: efeito do tratamento químico na resistência à tração dos compósitos**, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

FONTES, R.S. **Compósitos poliméricos híbrido: Comportamento mecânico, descontinuidade geométrica e resistência residual**, Rio Grande do Norte, Abril de 2013.

GAMA, D.P.N. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíches**, Rio de Janeiro, 2017.

HANEEFA, A., BINDU, P., ARVIND, I., THOMAS, S. **Studies on tensile and flexural properties of short banana/glass hybrid fiber reinforced polystyrene composites**. Journal of Composite Materials, vol. 42, n. 15, p. 1471-1489, 2008.

HYDRO ALUNORTE. Disponível em: <<https://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-nobrasil/Produtos/Bauxita-e-alumina/Bauxita/>>. Acesso em: 06 de Fevereiro de 2020.

KEMERICH, P.D.C.; PIOVESAN, M.; BERTOLETTI, L.L.; ALTMAYER, S.; HOHNVORPAGEL, T. **Fibras de vidro: caracterização, disposição final e impactos ambientais gerados**, Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, v(10), nº 10, p. 2112-2121, JAN-ABR, 2013.

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

LIMA, H.B.S., MENDES, B.H.A., LALOR, J.L, BARBOSA, K.S.L., BANNA,W.R.E., COSTA, D.S., **Estudo da influência da sedimentação gravitacional da lama vermelha na resistência à chamas de compósitos poliméricos**, EPQA, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2019.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos - Fundamentos e tecnologia**, Artliber Editora, São Paulo, 2019.

MARTINS NETO, J. A. **Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal**. 2016. 100f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MILANI, C. **A influência da incorporação de resíduos de policarbonato em compósitos fibras de vidro/poliéster**, Porto Alegre, Julho de 2015.

OLIVEIRA, A.P. **Análise da variação dos comprimentos e frações mássicas das fibras sintéticas e naturais (vidro e juta) nas propriedades mecânicas dos compósitos**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Faculdade de Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

PEDRO, J.N.V. **Produção de catalisadores a partir de resíduo do processamento da bauxita (lama vermelha) para a remoção de contaminantes orgânicos em água**, Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2014.

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.

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

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

RIBEIRO, D.V **influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**, Tese de doutorado (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

RIBEIRO, L. M. **Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (palf)**. Holos, ano 29, vol 1, 2013.

SANTOS, W.S.T. **Avaliação mecânica de tração e flexão dos compósitos com fibras curtas de juta e vidro**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Faculdade de engenharia de materiais) – Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA , M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**, Revista Matéria, v. 12, n. 2, pp. 322 – 338, 2007

SILVA, J. P. S. F. **Optimização das condições de produção de resinas de poliéster insaturado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

SILVA, K.C.A. **Caracterização de compósitos de matriz polimérica com ligas com memória de forma para aplicação em microatuadores**, Pernambuco, Julho de 2013.

SILVA, P.S. **comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados**. Tese Doutorado (Faculdade de ciência e tecnologia) – Universidade de Coimbra, 2014.

SILVA, N.G. **Influência do tratamento químico das fibras de bambu (bambusa vulgaris) na propriedade mecânica de tração dos Compósitos híbridos (fibra e lama vermelha)**, Ananindeua-PA, 2019.

SOUZA, A.B.B.; CAVALCANTI, M.R.; SILVA, D.G.L.F.; SILVA, N.M. **Reaproveitamento de resíduos industriais - uma viabilidade econômica e ambiental**, XXXIII Encontro Nacional De Engenharia De Produção, Pernambuco, Outubro de 2013.

SOUZA, J. M. **Reaproveitamento da madeira tratada com arseniato de cobre cromatado e isolador elétrico cerâmico para produção de compósito polimérico**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Caxias do Sul – UCS. 2016.

TAVARES, Arthur Ruan Dias. **Caracterização mecânica e morfológica de compósitos com fibras de vidro e palha da costa (raphia taedigera mart)**. 2018. 73f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

VIEIRA, P.R.; VIEIRA, J. ; CARVALHO, E.M.L. **Análise das propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro**, revista ENGEVISTA, Rio de Janeiro V. 18, n. 2, p. 363-374, Dezembro 2016.