



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

GABRIEL DA CRUZ OLIVEIRA

**EFEITO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DE ALUMÍNIO NAS
PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

Ananindeua, PA
2021

GABRIEL DA CRUZ OLIVEIRA

**EFEITO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DE ALUMÍNIO NAS
PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Bacharelado em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador: Me. Bruno Henrique Alves Mendes

Ananindeua, PA
2021

**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)**

O48e Oliveira, Gabriel da Cruz.
Efeito do Resíduo Industrial de Alumínio nas Propriedades de
Compósitos Poliméricos / Gabriel da Cruz Oliveira. — 2021.
76 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Me. Bruno Henrique Alves Mendes
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de
Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2021.

1. Resina Poliéster. 2. Alumínio. 3. Polímero. 4.
Compósito. I. Título.

CDD 620.11

GABRIEL DA CRUZ OLIVEIRA

**EFEITO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DE ALUMÍNIO NAS
PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Bacharelado em Engenharia de Materiais.

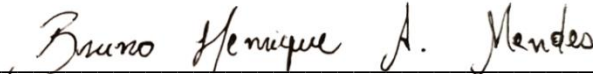
Data da Aprovação: 03/06/2021

Conceito: Exceleente

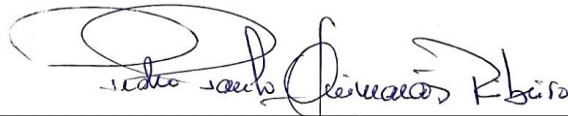
BANCA EXAMINADORA



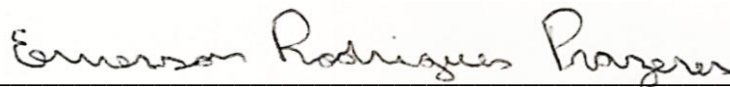
Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
(FEMat/CAMPANIN/UFPA-Orientador)



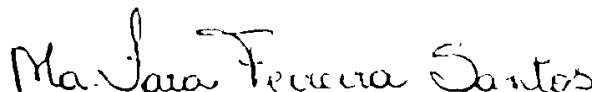
Me. Bruno Henrique Alves Mendes
(PPGEQ/ITEC/UFPA-Coorientador)



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



Me. Emerson Rodrigues Prazeres
(PRODERNA/ITEC/UFPA-Examinador Externo)



Ma. Iara Ferreira Santos
(PRODERNA/ITEC/UFPA-Examinadora Externa)

Ananindeua, PA
2021

Dedico este trabalho primeiramente a Deus e aos meus pais, família e amigos. Agradeço por toda ajuda e esforços em razão da minha educação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cláudia Dianny Barbosa da Cruz e Cleuberto Júnior da Silva Oliveira, os quais foram minha base para o comprometimento nos momentos mais importantes.

A toda minha família, os quais contribuíram de forma direta e indireta para formulação deste objetivo, em especial minha tia Carla Barbosa da Cruz que me ajudou como fonte de inspiração, e também a minha irmã Gabriele da Cruz Oliveira que se fez presente durante essa trajetória.

Ao orientador Prof. Dr. Deibson Silva da Costa pelo esforço e paciência pela orientação, e principalmente pela oportunidade para a realização deste trabalho.

Ao coorientador Bruno Henrique Alves Mendes pela orientação, conhecimentos transmitidos e principalmente pelo apoio para formulação deste trabalho, sem sua ajuda não seria possível.

Agradeço a todos os pesquisadores do laboratório de Engenharia química e mecânica: Brenda Daniel, Victor Hugo, Eryck Santos, Alice dos Prazeres e de todos que participaram de maneira direta e indireta na realização deste trabalho.

Agradeço também aos amigos e parceiros de graduação e pesquisa: Lucas Rezende e Willian Rayol, que contribuíram diretamente para a formulação da pesquisa.

A minha turma de graduação, pelo aprendizado e convivência que fundamentou no meu amadurecimento como aluno e também pelos momentos de diversão durante esse período de graduação.

A todos que de alguma forma colaboraram para elaboração do presente trabalho.

“A ciência é sobre saber, a engenharia é sobre
fazer”

(Henry Petroski)

RESUMO

Os compósitos englobam uma classe de materiais com propriedades importantes para diversos setores de aplicação, mas o que chama atenção no compósito é o seu potencial para combinar variados tipos de materiais, e esse fator ganha maior valor quando se direciona ao reaproveitamento de materiais que são descartados pelas indústrias e que interferem diretamente no desenvolvimento sustentável. Este trabalho consiste na produção de materiais compósitos a partir da incorporação de resíduo industrial de alumínio em matriz polimérica, os quais foram testados conforme suas propriedades físicas, mecânicas e de resistência à queima. Dessa forma, realizou-se ensaios de caracterização morfológica, química e mineralógica do resíduo. A matriz utilizada foi à resina poliéster isoftálica insaturada com a adição do acelerador de cobalto (1,5 % v/v) e catalisador butanox M-50 (1 % v/v). O resíduo de alumínio foi obtido junto à empresa Colorjato do estado de São Paulo e, para a metodologia deste trabalho, foi classificado em peneira de 100 mesh da série Tyler. Foi utilizado o método manual *Hand lay-up* associado à compressão para fabricações dos compósitos, com frações volumétricas de resíduo de 0 %, 10 %, 20 % e 30 %. Os resultados mostraram que o particulado de alumínio tem tamanhos variados conforme a análise microestrutural das partículas, apresentando certas impurezas como Silício e Cromo em seus grãos. As propriedades físicas mostraram que a inserção de resíduo condicionou um aumento gradativo na massa específica aparente, o que teve influência direta na absorção de água e porosidade aparente. No ensaio de resistência mecânica do compósito, as composições de 10 % apresentaram melhor desempenho mecânico de tração e flexão, com resistência mecânica de até 27,11 e 133,19 MPa, respectivamente. A análise das fraturas dos compósitos mostrou que frações volumétricas menores que 30 % apresentam melhor distribuição do particulado, com boa homogeneização e dispersão das fases presentes. O teste de flamabilidade horizontal permitiu avaliar que a resistência a chamas do compósito é proporcional a adição de resíduo dentro da matriz, o que indica que o resíduo de alumínio de modo geral apresenta resistência devido sua estrutura e/ou seus constituintes. Os resultados expressaram que o limite da composição de 30 % mostrou uma menor taxa de queima de 11,17 mm/min, com redução de até 49,42 % em comparativo com o poliéster. Dessa forma, o estudo descreve um potencial em relação a combinação das fases presentes para possíveis aplicações, embora seja necessário um estudo mais específico.

Palavras-chave: Resina poliéster, Alumínio, Polímero, Compósito.

ABSTRACT

Composites encompass a class of materials with important properties for various application sectors, but what draws attention to the composite is its potential to combine different types of materials, and this factor gains greater value when directed towards the reuse of materials that are discarded industries and that directly interfere in sustainable development. This work consists of the production of composite materials from the incorporation of industrial aluminum waste in a polymeric matrix, which were tested according to their physical, mechanical and resistance to burning properties. Thus, tests of morphological, chemical and mineralogical characterization of the waste were carried out. The matrix used was the unsaturated isophthalic polyester resin with the addition of the cobalt accelerator (1.5 % v / v) and butanox M-50 catalyst (1 % v / v). The aluminum residue was obtained from the company Colorjato in the state of São Paulo and, for the methodology of this work, it was classified in a 100 mesh sieve of the Tyler series. The manual method Hand lay-up associated with compression was used for the manufacture of composites, with volumetric fractions of residue of 0 %, 10 %, 20 % and 30 %. The results showed that the aluminum particulate has different sizes according to the microstructural analysis of the particles, presenting certain impurities such as Silicon and Chromium in their grains. The physical properties showed that the insertion of waste led to a gradual increase in the apparent density, which had a direct influence on water absorption and apparent porosity. In the mechanical strength test of the composite, the 10 % compositions showed better mechanical performance of traction and flexion, with mechanical strength of up to 27.11 and 133.19 MPa, respectively. The analysis of the fractures of the composites showed that volumetric fractions less than 30 % present a better distribution of the particulate, with good homogenization and dispersion of the present phases. The horizontal flammability test allowed to evaluate that the flame resistance of the composite is proportional to the addition of residue within the matrix, which indicates that the aluminum residue in general presents resistance due to its structure and / or its constituents. The results expressed that the composition limit of 30 % showed a lower burning rate of 11.17 mm / min, with a reduction of up to 49.42 % compared to polyester. Thus, the study describes a potential in relation to the combination of the present phases for possible applications, although a more specific study is needed.

Keywords: Polyester resin, Aluminum, Polymer, Composite.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1- Classificação dos compósitos	20
Figura 2- Reação de transferência de cadeia	22
Figura 3- Representação da síntese do poli(tereftalato de etileno).....	23
Figura 4- Principais tipos de compósitos.....	24
Figura 5- Usina de beneficiamento no município de Paragominas Pará (a) e gráfico de pizza da produção mundial de alumínio no ano de 2017	27
Figura 6- Óxido de alumínio em diferentes camadas de processamento	28
Figura 7- Fluxograma do processo Bayer	29
Figura 8- Representação do gráfico tensão-deformação	30
Figura 9- Resina e os auxiliares utilizados	33
Figura 10- Resíduo de alumínio	34
Figura 11- Alumínio classificado utilizado para fabricação dos compósitos	34
Figura 12- Agitador mecânico.....	35
Figura 13- Microscópio Eletrônico de Varredura.....	37
Figura 14- Difratorômetro de Raios-X	37
Figura 15- Molde de aço inoxidável utilizado na confecção dos compósitos.....	39
Figura 16- Fluxograma de fabricação dos compósitos.....	40
Figura 17- Corpos de prova para a caracterização física (a), balança analítica (b) e as dimensões dos cp's (c).....	41
Figura 18- Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração.....	42
Figura 19- Corpos de prova e a máquina universal de ensaio	42
Figura 20- Amostras das fraturas dos corpos de prova	43
Figura 21- Corpos de prova e a máquina de ensaio	43
Figura 22- Amostras dos corpos de prova fraturados.....	44
Figura 23- Esquema disposto no ensaio de flamabilidade	45
Figura 24- Micrografia do resíduo de alumínio com ampliação de 100 vezes (a) e 1000 vezes (b)	46
Figura 25- Análise da composição química do alumínio por energia dispersiva.....	47
Figura 26- Difratorograma de Raio-X do resíduo de alumínio	49
Figura 27- Absorção de água das frações estudadas do compósito de resíduo de alumínio com seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	51
Figura 28- Comparativo entre as frações quanto suas propriedades físicas com seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	52

Figura 29- Gráfico força vs alongamento dos compósitos produzidos	55
Figura 30- Variação da tensão de resistência e módulo de elasticidade <i>versus</i> as proporções para fase dispersa.....	57
Figura 31- Análise fractográfica dos compósitos de resíduo de alumínio. a) AL-10 x30, b) AL-10 x100, c) AL-30 x25 e d) AL 30 x100	58
Figura 32- Comparativo do desempenho mecânico dos compósitos com os seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	61
Figura 33- Comparativo do módulo elástico das frações estudadas e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)	62
Figura 34- Corpos de prova utilizados (a) e propagação de chama no corpo de prova (b).	63
Figura 35- Gráfico comparativo quanto ao desempenho para flamabilidade das proporções estudadas.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Abertura (mm) das peneiras utilizadas para a granulometria do resíduo	35
Tabela 2- Fração dos componentes utilizados para fabricação dos compósitos	38
Tabela 3- Composição química do resíduo de alumínio	48
Tabela 4- Relação do tempo do ponto de gel com aumento gradual de particulado.....	50
Tabela 5- Propriedades físicas dos compósitos de resíduo de alumínio	50
Tabela 6- MEA dos compósitos estudados comparados com as literaturas	53
Tabela 7- Propriedades mecânicas de tração dos compósitos de resíduo de alumínio.....	54
Tabela 8- Análise de variância (Valor-P e método Tukey´s pairwise).....	56
Tabela 9- Propriedades mecânicas de flexão do compósito de resíduo de alumínio	59
Tabela 10- Propriedades de resistência a chamas dos compósitos.....	63
Tabela 11- Comparativo da taxa de queima com as literaturas.....	65

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Absorção de água
Al	Alumínio
AL-10	Compósito com 10 % de alumínio
AL-20	Compósito com 20 % de alumínio
AL-30	Compósito com 30 % de alumínio
ANOVA	Analysis of Variance
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Velocidade de queima
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
Cp	Corpo de prova
Cr	Cromo
CV	Cinza Volante
DRX	Difração de Raios-X
E	Módulo de elasticidade
E1	Espectro 1
E2	Espectro 2
EDS	Espectrometria de Energia dispersiva
FA	Fibra de Abacaxi
Fe	Ferro
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X
LV	Lama Vermelha
MEA	Massa específica aparente
MEK	Peróxido de metil etil cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mh	Massa do material submetido ao peneiramento
Mi	Massa imersa
Mi	Massa do material retido acumulado
MO	Microscopia Óptica
Ms	Massa seca
Mu	Massa úmida
NBR	Norma Brasileira
O	Oxigênio

PA	Porosidade aparente
Qf	Porcentagem do material passado na peneira
RC	Resíduo de Cobre
RP	Resina Plena
Ti	Titânio
UFPA	Universidade Federal do Pará
α	Alumina
α -Al	Alumina Alfa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações iniciais	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.2.3 Síntese do trabalho	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Materiais compósitos	19
2.1.1 Compósitos poliméricos	20
2.1.1.1 Resinas poliméricas	21
2.1.1.2 Resina poliéster	22
2.2 Reforços de compósito	23
2.2.1 Compósitos com adição de partículas	24
2.2.1.1 Cargas naturais	26
2.2.1.2 Cargas industriais	26
2.3 Alumínio	27
2.3.1 Beneficiamento e processo Bayer	29
2.4 Propriedades dos compósitos	30
2.4.1 Comportamento mecânico dos compósitos	30
2.4.2 Resistência à flamabilidade	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Materiais	33
3.1.1 Resina poliéster isoftálica.....	33
3.1.2 Resíduo de Alumínio	33
3.2 Métodos	34
3.2.1 Resíduo de alumínio	34
3.2.1.1 Secagem e processamento	34
3.2.1.2 Classificação do resíduo	35
3.2.1.3 Caracterização morfológica e química	36
3.2.1.4 Caracterização mineralógica.....	37
3.2.2 Compósitos	38
3.2.2.1 Testes preliminares	38
3.2.2.2 Fabricação dos compósitos.....	38
3.2.2.3 Caracterização física.....	40
3.2.2.4 Caracterização mecânica	41

3.2.2.4.1 Ensaio de tração.....	41
3.2.2.4.1.1 Análise das fraturas dos compósitos dos testes de tração.....	42
3.2.2.4.2 Ensaio de flexão.....	43
3.2.2.5 Flamabilidade (ensaio horizontal)	44
3.2.3 Análise estatística	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Materiais de partida	46
4.1.1 Caracterização morfológica e análise da composição química	46
4.1.2 Caracterização mineralógica.....	48
4.2 Compósitos	49
4.2.1 Testes preliminares	49
4.2.1.1 Teste do ponto de gel.....	49
4.2.2 Produção dos compósitos (corpos de prova)	50
4.2.2.1 Propriedade física	50
4.2.2.2 Resistência mecânica à tração	53
4.2.2.2.1 Análise fractográfica dos compósitos.....	58
4.2.2.3 Resistência mecânica à flexão	59
4.2.2.4 Ensaio de resistência a queima.....	62
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	66
5.1 Conclusões	66
5.2 Sugestão para trabalhos futuros	67
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A crescente produção industrial resulta no aumento na geração de resíduos sólidos, que por sua vez, pode ocasionar danos ao meio ambiente e prejudicar a qualidade de vida nos sistemas urbanos. Em razão disso, justifica-se o reaproveitamento desses materiais, criando a capacidade de atender novas formas de utilização, seja para estudos científicos ou na combinação com outras matérias primas ou derivados. Nesse contexto, o estudo de Mendes (2019) descreve que os compósitos são alternativas para utilização de resíduos industriais como carga de enchimento, atribuindo um horizonte de possibilidades, uma vez que estes apresentam grande flexibilidade de aplicação e podem proporcionar boas propriedades.

A interação entre dois ou mais tipos de materiais explica o conceito básico de um compósito, sendo que a homogeneização depende da relação matriz/carga, o que pode interferir diretamente nas propriedades do produto. Um compósito é projetado para apresentar uma combinação dos melhores aspectos de cada um dos materiais que o compõe, portanto, resíduos industriais podem agregar características que formulam sinergia ao compósito, adequando às exigências para o seu uso (CALLISTER Jr., 2016).

A indústria do alumínio é responsável por descartar resíduos sólidos em grande quantidade, de modo que no Brasil, essa proporção aumenta com relação a outros materiais que são inutilizáveis pelas indústrias produtoras. A leveza é uma das principais características do alumínio, sendo sua massa específica de $2,70 \text{ g/cm}^3$, com um valor bem inferior ao peso do aço, além disso, possui alto grau de condutibilidade elétrica e térmica (ABAL, 2020). Nesse sentido, fundamenta-se estudar o potencial do alumínio combinado a outros materiais, buscando também dar um destino adequado a esse resíduo industrial, minimizando o impacto que este pode causar ao meio ambiente. Isso pode reduzir custos de processamento para as indústrias e potencializar o desempenho desse material.

Conforme os estudos realizados por Salomão *et al.* (2008), o alumínio em forma de pó pode ser facilmente combinado com outras matérias primas, destacando sua baixa permeabilidade. Os autores ainda descrevem que as características físicas e químicas deste material permitem sua utilização em compósitos e, pode atribuir suas propriedades como reforço em matrizes poliméricas, embora a interação das fases possa apresentar resultados diferentes dependendo da distribuição das partículas e/ou natureza dos constituintes.

Dessa forma, o presente trabalho tem como proposta obter compósitos poliméricos através do reaproveitamento de resíduos industriais de alumínio em vista da grande geração de resíduos sólidos por parte dos setores industriais, e avaliar seu comportamento de acordo com as caracterizações propostas para este trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudar o potencial dos compósitos poliméricos com adição de resíduo industrial de alumínio em relação a combinação das fases presentes e investigar o seu comportamento físico, mecânico e de resistência à chama.

1.2.2 Objetivos específicos

- Descrever as características estruturais do resíduo de alumínio através da análise morfológica, composição química e mineralógica.
- Determinar os limites de saturação e identificar a fração com melhor potencial em relação a combinação das fases presentes para o desempenho mecânico máximo.
- Avaliar as propriedades físicas (absorção de água, porosidade e massa específica), mecânicas de tração e flexão e de resistência à chama (flamabilidade) dos compósitos formulados.
- Analisar os mecanismos de falhas presentes na interação entre as partículas da fase dispersa e fase contínua através da análise fractográfica em Microscópio Eletrônico de Varredura.

1.2.3 Síntese do trabalho

A seção 1 enfatiza a parte introdutória, através das considerações iniciais, justificando a utilização dos resíduos industriais de alumínio como alternativa para formulação de novos materiais, e da proposição dos objetivos que levaram a utilização em compósitos poliméricos.

A seção 2 apresenta o estudo teórico acerca dos materiais compósitos de matriz polimérica, destacando a descrição da relação matriz e reforço.

A seção 3 apresenta os materiais e métodos utilizados na produção do trabalho, com especificações dos principais mecanismos com representações ilustrativas e esquemáticas.

A seção 4 descreve os resultados e discussão do trabalho, priorizando apresentar por meio de gráficos e tabelas os dados obtidos, acentuando o embasamento estatístico. Além disso, ainda nesta seção são apresentadas discussões e comparações para melhor explicar a síntese dos resultados.

A seção 5 mostra as conclusões obtidas, salientando os melhores resultados e propostas para trabalhos futuros. Apresentam-se no fim da seção as referências utilizadas no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

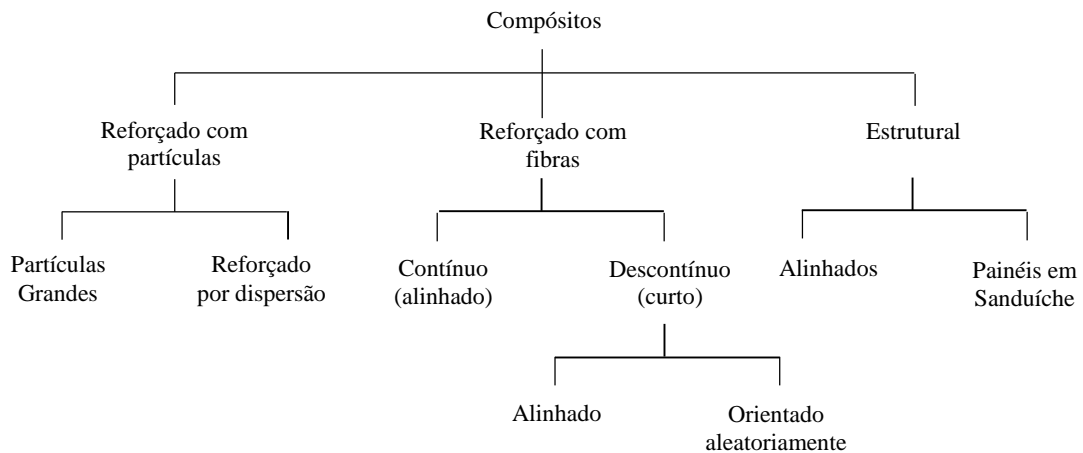
2.1 Materiais compósitos

A superoferta das novas tecnologias necessita de materiais ainda mais capacitados, que sejam atuantes e alternativos para diversas aplicações. A partir disso, existe a necessidade de aprimorar os compósitos, justamente por oferecerem combinações que podem qualificar o material e conseqüentemente justificar sua utilização.

Os compósitos podem ser classificados em metálicos, cerâmicos e poliméricos, com combinação de duas ou mais fases. De modo geral, pode-se considerar como sendo um material multifásico que expresse uma proporção significativa das características de ambas as fases que o constituem, de tal maneira que pode ser obtida uma melhor combinação de propriedades. Assim, a ampla diversidade desses materiais explica suas aplicações nos setores aeroespaciais, subaquáticas e de transporte, que buscam estruturas que possuam baixa densidade, rigidez e que apresentem resistência a abrasão e ao impacto (CALLISTER Jr., 2016).

Os compósitos geralmente são constituídos de duas fases: matriz e fase dispersa, classificada geralmente como reforço. A configuração destes considera a transferência de carga aos componentes mais resistentes, compreendidos como reforços, os quais, frequentemente, estão dispostos em uma matriz menos resistente, que os envolve (FERRANTE, 2002). Desse modo, a fase contínua atua ainda como uma base que permite ductilidade e mantém a estrutura coesa e que, em resumo, se caracteriza por boas condições de fabricação e por apresentar flexibilidade. A combinação dos componentes no processo de homogeneização permite investigar o desempenho do produto final, ou seja, o comportamento dos elementos de acordo com sua distribuição (PIMENTEL, 2015).

De acordo com Callister Jr. (2016) os materiais compósitos são confeccionados em sua grande maioria com o propósito de combinar aspectos visando melhorar o desempenho mecânico, físico e de resistência à queima. Estes materiais são classificados conforme os tipos de reforços estruturais, tendo uma divisão agrupada pelas fases dispersas: partículas, fibras e estruturais, e geralmente tem outras subdivisões, o que depende da fase reforço e da distribuição desses componentes dentro da matriz. O sistema simplificado para a classificação dos compósitos é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Classificação dos compósitos

Fonte: Callister Jr., 2016, adaptado.

Levy Neto e Pardini (2006) justifica que o material de reforço geralmente é mais resistente, isso garante que a fase dispersa tenha atuação efetiva no compósito. A forma em que esta fase atua depende principalmente de fatores como tamanho da partícula, distribuição e quantidade.

Lorandi *et al.* (2016) investigam que as matrizes poliméricas podem ser combinadas com diferentes tipos de reforços como fibras naturais e sintéticas e/ou particulados, onde a influência dos resultados dependem das naturezas físico-químicas destes materiais.

2.1.1 Compósitos poliméricos

O estudo de Moura *et al.* (2011) descreve que os materiais compósitos poliméricos são constituídos conforme a combinação de particulados e/ou fibras geralmente resistentes envolvidas numa matriz polimérica, cujo o comportamento varia de acordo com as direções preferenciais das fibras ou até mesmo a variação granulométrica e a quantidade de particulado, que são responsáveis pelo reforço estrutural. Estes comportamentos podem ser especificados como anisotrópico, ortotrópico ou quase isotrópico.

Keller (2002) descreve que as resinas necessitam de uma proteção como aditivos ou projeção de fibras aleatórias para atender características específicas, pois de certa forma, as matrizes poliméricas sofrem influências constantes da própria temperatura ambiente. Por outro lado, Carneiro (2008) cita que a resina atuando como matriz desenvolve um aspecto preponderante no material, adequando-se conforme o tipo de ambiente no qual o compósito será submetido. As fibras, em contrapartida, devem ser designadas em função da resistência,

rigidez e durabilidade requeridas, assim como a natureza do particulado.

Segundo Costa (2016) os compósitos poliméricos possuem características compatíveis com a sua utilização em diversos setores, justamente por apresentarem baixa densidade devido ao peso específico das resinas e das fibras de reforço e, resistência química e mecânica, embora esses fatores sejam dependentes das combinações das fases que o constituem. Outro fator a ser levado em consideração é a adequação do processamento, onde Nogueira (2004) descreve que essa função pode proporcionar propriedades importantes como a massa específica reduzida, alta tenacidade e boa resistência a corrosão. Além disso, estes materiais apresentam alta durabilidade, proveniente de sua composição e a reticulação do polímero formado durante o processo de moldagem.

Lionetto *et al.* (2004) ao estudarem as transformações de fases durante a cura de uma matriz polimérica relatam que o ambiente de processamento pode afetar algumas propriedades físicas, reduzindo seu desempenho efetivo por causar alterações geométricas, bem como a distribuição dos elementos, que relaciona diretamente a aparição de micro trincas em todas as regiões da estrutura.

2.1.1.1 Resinas poliméricas

Os polímeros são bastante versáteis e acessíveis para qualquer tipo de moldagem, contudo, é de se esperar grande variação em suas propriedades, devido estes materiais normalmente envolverem uma larga faixa de valores de massa molar. A matéria prima principal de um polímero é o monômero, ou seja, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Assim, dependendo do tipo de estrutura química, os polímeros podem ser divididos em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO Jr., 2010).

As resinas homologadas na classe dos plásticos podem ser divididas em termoplásticas e termofixas, e geralmente são utilizadas em compósitos em razão do baixo custo, estabilidade térmica e facilidade para moldagem. Contudo, Sanchez *et al.* (2010) relata que as resinas necessitam da utilização de um material de reforço, devido à sua baixa resistência à fratura.

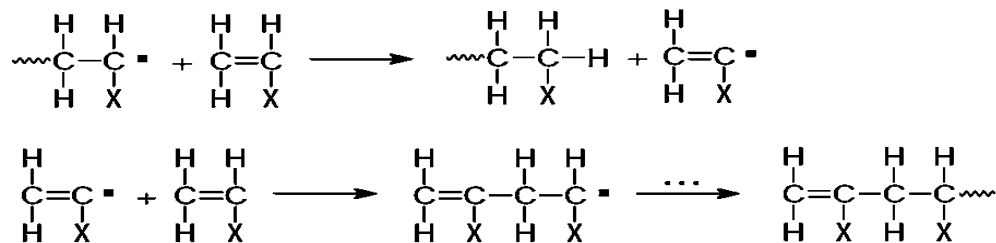
Com base neste contexto, Bosze *et al.* (2006) descreve que a temperatura tem efeito significativo nas propriedades mecânicas da resina pura, devido principalmente a desordem das cadeias poliméricas, que foi verificado com base na análise de algumas reações de polimerização realizada pelo autor.

O estudo de Pimentel (2015) descreve que os polímeros podem ser sintetizados por dois tipos principais de polimerização, que se divide em reação em cadeias (reação por adição) e a

reação em etapas (reação por condensação).

Conforme Fernandes e Lona (2004) na polimerização em cadeia, o processo ocorre através de cada radical livre, e possui três passos importantes: iniciação, crescimento e término da reação. A princípio ocorre à formação de radicais reativos, que requer maior energia de ativação do que o subsequente passo, dessa forma, a taxa de crescimento é muito maior do que a taxa de inicialização. Com isso, as ligações duplas dos monômeros são abertas para formação de novas ligações de modo a saturar outros monômeros que serão reagidos. Ou seja, o radical monomérico se propaga e ao ser terminado irá gerar uma molécula de polímero com uma ligação dupla terminal, como é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Reação de transferência de cadeia



Fonte: Fernandes, 2004.

As resinas termorrígidas são as mais utilizadas em compósitos, classificadas por ampla utilidade em variados setores, os quais necessitam das suas propriedades. Justifica-se o uso deste material pelo baixo custo relativo, facilidade de processamento, boa molhabilidade e sua rigidez não se alterada com a temperatura. As resinas poliéster e epóxi são exemplos desta classe de resinas (HERTER, 2010).

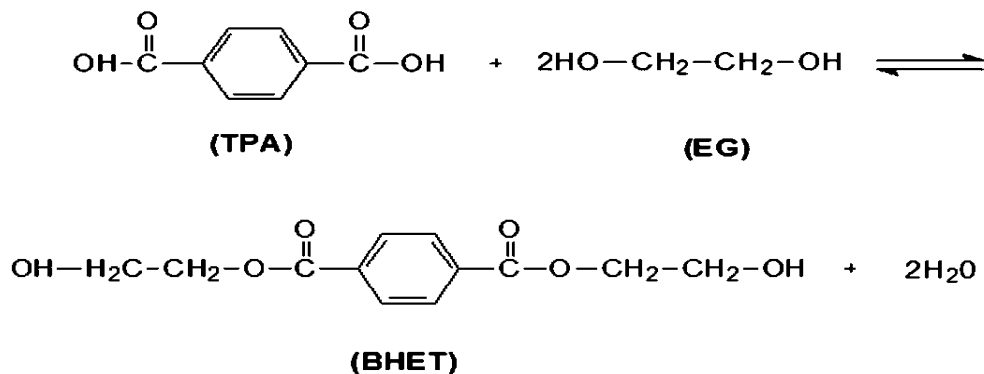
2.1.1.2 Resina poliéster

As resinas de poliéster são classificadas como saturadas e insaturadas. Dentre estes grupos os poliésteres insaturados são atuantes na fabricação de materiais compósitos devido suas principais características como facilidade de processamento e por ter condições favoráveis para as propriedades mecânicas, elétricas e químicas. A cura do material pode ser auxiliada através da adição de catalisadores, por exemplo, a base de cobalto. Este processo é definido por duas etapas: na primeira, a resina líquida se transforma em um material com alta viscosidade, etapa que se designa por “ponto de gel”; a segunda fase conduz ao endurecimento final, dependente da forma de processamento e os teores dos componentes utilizados como acelerador

e catalisador. Essas resinas insaturadas são divididas em ortoftálicas, isoftálicas e bisfendólicas (MOURA *et al*, 2011).

Os poliésteres são da categoria dos plásticos termoestáveis, em outras palavras, são oriundos de uma reação química (reação do ácido tereftálico (TPA) com um diol (EG)), formando um líquido com alta viscosidade, sólido frágil e suas características dependem do grau de preparação e uso recomendado (SALINAS, 2012; SOLOMONS, 2008, SOARES JÚNIOR, 2010). A Figura 3 apresenta a síntese do Poli (tereftalato de etileno).

Figura 3- Representação da síntese do Poli (tereftalato de etileno)



Fonte: Soares Júnior, 2010.

2.2 Reforços de compósito

De acordo com os estudos de Paula (2011) os compósitos normalmente são compostos por fibras ou particulados de geometria variada, geralmente responsáveis pela obtenção de um produto de maior qualidade. Os reforços comumente são conhecidos como fase dispersa, onde depende das estruturas de processamento e da compatibilidade dos constituintes.

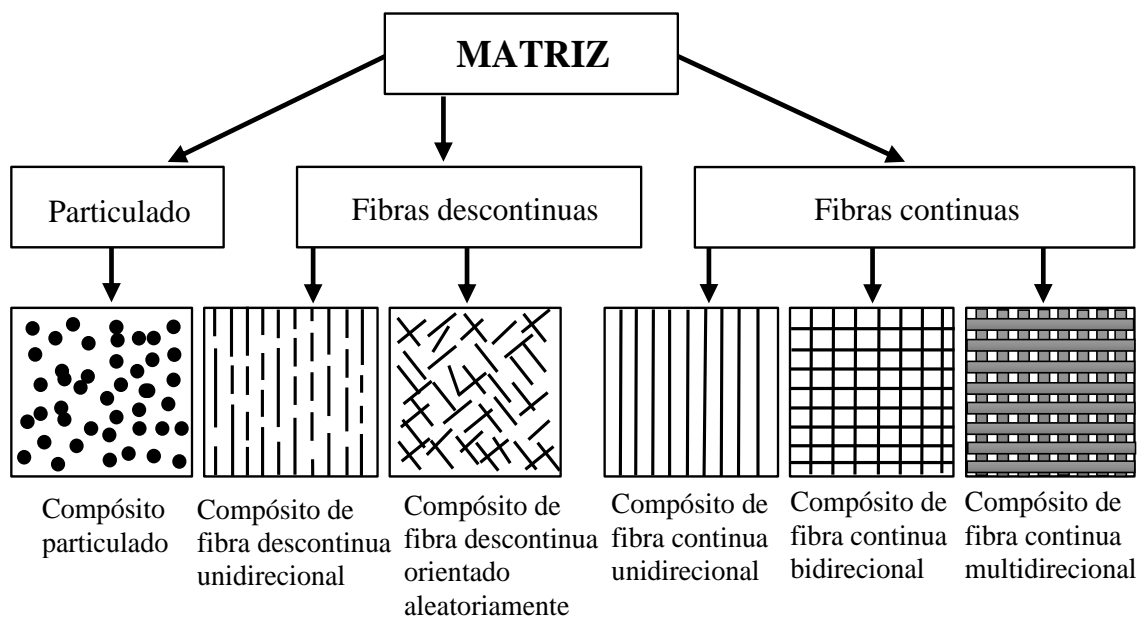
Os materiais que atuam como reforço devem proporcionar elevada resistência e rigidez, baixa densidade, alta resistência à fadiga, alto amortecimento e baixo coeficiente térmico, características estas superiores à matriz a qual o material é envolvido. Em geral os compósitos com incorporação de partículas tendem a ser mais fracos e menos dúcteis do que os compósitos de fibras contínuas, embora sejam normalmente menos dispendiosos (HOLLAWAY, 2003; CAMPBELL, 2010).

Os estudos de Albuquerque (2005) que utiliza fibras de vidro, descreve que o desempenho do reforço atuante depende da composição química. O autor descreve a ausência de molhabilidade das partículas para o material estudado, o que não garante boas condições ao material compósito, possibilitando a aparição de falhas prematuras na estrutura.

Por outro lado, Cunha (2015) ao estudar o potencial da lama vermelha em um compósito polimérico reforçado com fibras de Curauá, destacou que este apresenta efeito significativo em algumas variáveis, bem como melhora efetiva na estabilidade térmica e/ou resistência mecânica dependendo da quantidade em massa aplicada e logicamente a dispersão.

O reforço atuante geralmente é dividido em três grandes grupos: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas (*whiskers*) e compósitos de fibras contínuas (VENTURA, 2009; PANZERA, 2005) conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4- Principais tipos de compósitos



Fonte: Panzera, 2005, adaptado.

A combinação das fases permite a formação de uma interface entre matriz e reforço, de maneira que a interação seja adequada com as propriedades do mesmo. Ou seja, a rigidez do material de reforço deve ser compatível com a ductilidade da matriz. Este parâmetro permite que o compósito apresente um comportamento expressivo.

2.2.1 Compósitos com adição de partículas

As partículas podem alterar e/ou diversificar um compósito de maneiras diferentes, dependendo das características e da natureza fundamental do particulado, bem como o condicionamento do processo de fabricação. Segundo Callister (2016) os compósitos reforçados com partículas podem ser subdivididos em dois grupos, caracterizado como reforços

com partículas grandes e por dispersão, onde o termo “grande” é descrito por Quirino (2010) como efeito mecânico do sólido contínuo, embora as partículas tenham relação direta com a matriz. Em contrapartida, os compósitos reforçados por dispersão são caracterizados por partículas pequenas com diâmetros que variam de 10 nm a 100 nm, de forma que a cooperação das fases ocorre a nível molecular, assim, a carga deve suportar toda força aplicada e as partículas menores dificultam os movimentos de discordâncias. Com isso, a deformação plástica é reduzida, melhorando assim a resistência à tração e dureza.

Os particulados são geralmente conhecidos como carga, associando funções básicas em compostos poliméricos, porém, fundamentais para ampliar as aplicações com a incorporação ou disposição de propriedades físicas e químicas. As cargas são normalmente inorgânicas e são especificadas como aditivos sólidos, que são incorporados em uma matriz, podendo ser classificados conforme o efeito nas propriedades mecânicas da homogeneização entre os constituintes. Outro fator preponderante dessa mistura resultante é a redução de custos, que potencializa economicamente o meio de produção, além disso, podem proporcionar o aumento da densidade do composto, redução da estabilidade dimensional e aumento da temperatura de deflexão sob carga (FACTORI, 2009).

Bittencourt *et al.* (2018) estudou a utilização de cargas minerais em resinas de epóxi, onde o autor observou a otimização no uso de cargas minerais em polímeros, visando reduzir custos e principalmente por agregar valores físicos e químicos na resina. Contudo, sabe-se que a adição de cargas inertes interfere diretamente na estrutura do material, dessa forma, antes da aplicação é necessário levar em consideração as exigências técnicas que o artefato precisa sobrepor.

Li *et al.* (2014) estudou a incorporação de diferentes tamanhos de partículas de grafite em uma espuma poliuretano semirrígido, o autor investigou que o particulado com geometria menor da fase dispersa não proporcionou efeito significativo durante a queima, por outro lado, as partículas maiores de grafite permitiram a formação de uma camada isolante durante a propagação das chamas. O autor descreve que o tamanho foi determinante para as propriedades retardadoras de fogo, além de que a distribuição dos constituintes impactou diretamente na estabilidade térmica.

Em proporções gerais, as propriedades dos materiais compósitos são dependentes das condições físicas e químicas dos particulados e seguem a regra da mistura, a qual descreve que cada fase constituinte do material favorece para as propriedades reais do mesmo (BONED *et al.*, 2003).

2.2.1.1 Cargas naturais

As atuais preocupações relacionadas à preservação do meio ambiente têm estimulado a utilização de recursos naturais, principalmente na reutilização de matérias primas. De acordo com Pimentel (2015) as cargas naturais como carbonatos, argilas e talco têm encontrado ampla utilização, de maneira que estes materiais de fonte renováveis apresentam baixa densidade, baixo custo e natureza pouco abrasiva, além de serem biodegradáveis e ecologicamente corretos.

Souza *et al.* (2006) estudou o comportamento de um nanocompósito com adição de argila organofílicas, o autor observou que o teor de argila na ordem de 2 a 10 % de fração mássica podem apresentar melhorias significativas nas propriedades em relação ao desempenho do polímero virgem, tais como resistência a fratura, condutividade iônica, permeabilidade e resistência à solventes. Segundo o mesmo autor, teores baixos de particulado de argila apresentam implicações significantes, por justamente propor menor peso, fator este desejável em muitas aplicações. Além disso, quanto menor a fração mássica do compósito, melhor a distribuição da fase dispersa dentro da matriz, impactando positivamente nas propriedades do material processado.

2.2.1.2 Cargas industriais

As cargas industriais são provenientes de processamentos constantes causados pelas indústrias e grande parte dos resíduos gerados são descartados de maneira inadequada e assim prejudicando o meio ambiente de diversas maneiras. No Brasil, o descarte desses subprodutos aumenta de acordo com o crescimento do setor industrial, justificando o reaproveitamento destes como matéria prima (QUARESMA *et al.*, 2013). Nesse sentido, a utilização desses materiais como agregados, sobretudo produtos para produção de compósitos, tem mostrado interesse para formulação de novos estudos.

Segundo o estudo realizado por Mahapatra e Datta (2011) a lama vermelha como resíduo industrial apresenta uma compatibilidade razoável com uma matriz de poliéster, bem como poder proporcionar um custo reduzido. Além disso, o estudo da lama vermelha é justificado por possuir uma composição química complexa.

Daniel *et al.* (2020) estudou o efeito da incorporação do resíduo de calcário em uma matriz poliéster, resíduo este geralmente descartado pelas indústrias de materiais. O autor enuncia que os compósitos poliméricos com incorporação de calcário industrial apresentam

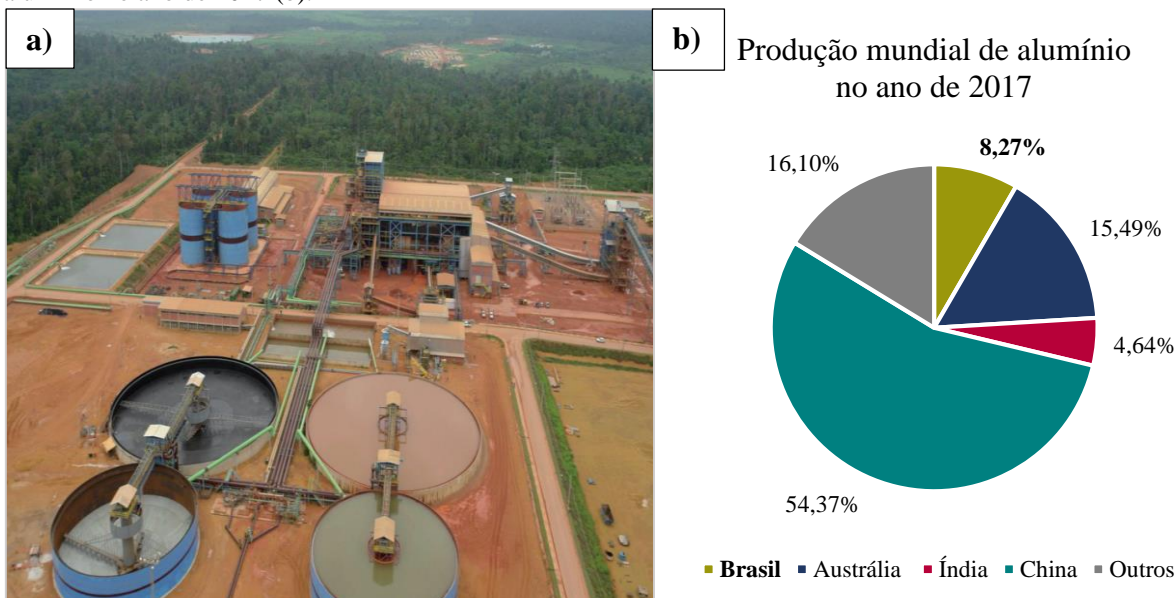
resultados promissores quanto à resistência mecânica de tração e flexão. Segundo análises estatísticas o autor afirma que o quantitativo de resíduo industrial gera valores significativos nas propriedades estudadas.

Ferreira *et al.* (2018) ao estudarem compósitos com inserção de resíduos industriais de cinzas volantes afirmam que materiais reforçados com estes subprodutos tendem ser promissores quanto a resistência a queima, apresentando taxas decrescentes conforme o aumentativo do resíduo.

2.3 Alumínio

A obtenção do alumínio provém do minério da bauxita, que passa por processos como mineração, refino e redução. O óxido de alumínio presente neste mineral pode ser de até 55 %, sendo que no mínimo 30 % deve ser aproveitado, o que permite uma produção econômica. O Brasil é um país rico em bauxita, sendo que no ano de 2017 o país foi responsável por 8,27 % da produção de alumínio no cenário mundial e, as grandes reservas brasileiras contribuem para a ótima qualidade deste minério (ABAL, 2020; USGS, 2020). A Figura 5 apresenta a usina produtora e a produtividade em percentual.

Figura 5- Usina de beneficiamento no município de Paragominas Pará (a) e gráfico da produção mundial de alumínio no ano de 2017 (b).



Fonte: Mártires, 2003 (a); USGS, 2020 (b).

Segundo Abal (2020), o alumínio possui ponto de fusão de 660 ° C, considerado baixo quando comparado ao aço, que se aproxima na ordem de 1570 ° C. Além disso, possui baixa massa específica, cerca de 2,70 g/cm³ e, dispõe de um material com boa condutividade térmica e elétrica. Portanto, tais características apontam que este agrega qualidades específicas que geralmente quando combinados com outros produtos apresentam melhores condições estruturais, logo, obtendo boas propriedades. A Figura 6 apresenta o óxido de alumínio.

Figura 6- Óxido de alumínio em diferentes camadas de processamento



Fonte: JB Comércio e Industria, 2020.

O alumínio particulado (ou em forma de pó) é descrito no estudo Salomão *et al.* (2008) como um bom aditivo de secagem para concretos refratários, pois pode ser facilmente misturado a seco com as outras matérias primas de formulação e, após alguns minutos reage com a água do material solvente de acordo com a Equação 1.



De acordo com Mourisco (1995) o particulado de alumínio em compósitos utilizando a técnica de metalurgia em pó deve apresentar partículas finas (tamanhos entre 10 a 20 µm) para obter boa dispersão no material usado como matriz. Portanto, o autor diz que a adequação da granulometria no processo de produção de pós é importante para que o alumínio seja atuante como material de reforço e desempenhe melhor qualidade ao produto.

Chavooshi e Madhoushi (2013) estudaram o pó de alumínio em polipropileno, os autores enunciam que a adição deste material não obteve bons resultados, descrevendo que em variadas proporções o módulo de tração e resistência mecânica diminuíram, pois apresentou clara incompatibilidade com a fase contínua.

Por outro lado, os estudos de Alves *et al.* (2018) mostraram que o alumínio processado

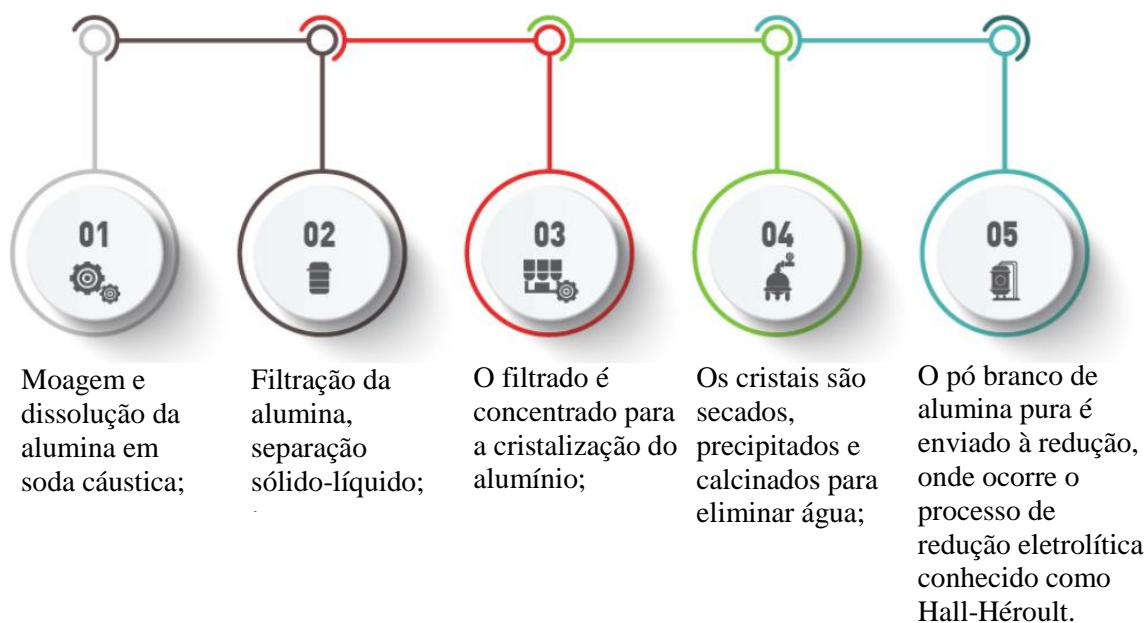
termicamente garante boas propriedades em relação a queima quando interligado com a matriz, onde os autores esclareceram que o alumínio na fase alumina inserida no polipropileno se apresenta como bom retardante a chamas.

2.3.1 Beneficiamento e processo Bayer

Grande parte da produção da bauxita tem seu destino às refinarias de alumina, enquanto que a outra parte restante é destinada à indústria de produtos refratários e químicos. O processo é realizado em usinas integradas, produzindo desde o minério (bauxita), que segue para as refinarias onde é produzida alumina e posteriormente o alumínio primário. De um modo simplificado, o processo de beneficiamento compreende das etapas de extração, britagem, lavagem e secagem (MÁRTIRES, 2003).

Na etapa inicial de beneficiamento da bauxita, o único rejeito que provém da lavagem do minério é a argila, a qual não possui nenhum aditivo químico. Nessa etapa, o rejeito é adensado (compactado) e uma parcela da água recuperada é reaproveitada no processo, reduzindo o risco de vazão nas barragens. Posteriormente, ocorre o refino e a redução do alumínio, submetido a altas temperaturas, no processo conhecido como como *Hall-Héroult* (ABAL, 2020). O processo Bayer é mostrado em etapas na Figura 7.

Figura 7- Fluxograma do processo Bayer



Fonte: Abal, 2020, adaptado.

2.4 Propriedades dos compósitos

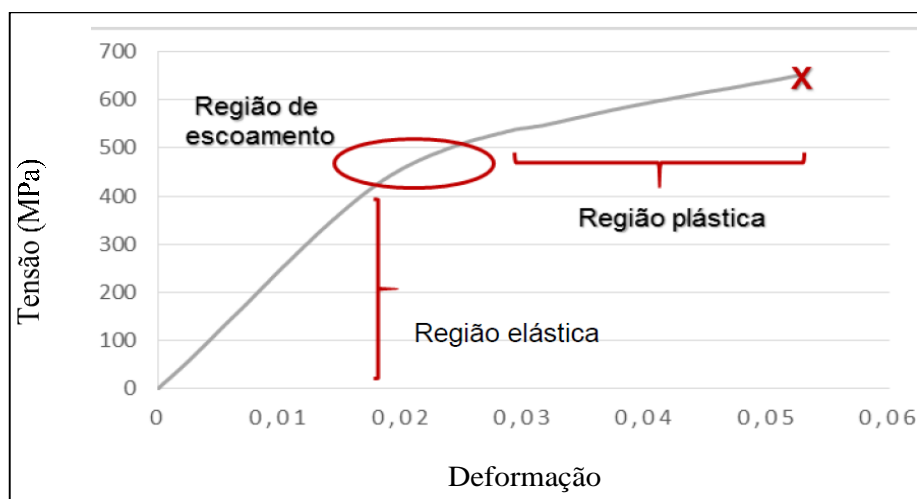
2.4.1 Comportamento mecânico dos compósitos

Os ensaios mecânicos nos compósitos de modo geral são fundamentais para conhecer qual o grau de resistência desse material, de modo a avaliar o tempo e o ponto de ruptura do componente. Paula (2011) descreve que na avaliação das propriedades mecânicas devem levar em consideração as características sinérgicas dos materiais que dependem do reforço e da matriz. As principais propriedades mecânicas de interesse são de resistência à tração e flexão.

Os testes para avaliar as propriedades mecânicas identificam o estado de tensões e deformações na estrutura, ou seja, são submetidos a esforços que expressam o comportamento máximo do material. Os ensaios mais utilizados nos estudos são os testes de tração, que permite verificar o grau de deformação em função de uma força aplicada. Outros esforços também são importantes para descrever o comportamento dos materiais como flexão, compressão, cisalhamento, dentre outros (ASKELAND, 2015).

Quando um corpo de prova é submetido ao teste de tração, o equipamento que realiza o teste deve fornecer o comportamento tensão-deformação do material, que pode ser expresso graficamente (Figura 8) o qual relaciona a força aplicada com a deformação que decorre ao longo do ensaio (BRANDÃO, 2015).

Figura 8- Representação do gráfico tensão-deformação



Fonte: Fonseca *et al.* (2016), adaptado.

Segundo Brandão (2015), a resistência à tração é avaliada pela carga aplicada por unidade de área do momento de ruptura, assim, o alongamento representa o aumento percentual

do tamanho da peça por comprimento sob a tração no momento de ruptura. Os resultados obtidos são normalizados para a obtenção dos parâmetros tensão (representado por σ) e deformação de engenharia (representado por ϵ) conforme as Equações 2 e 3.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (3)$$

Onde F é a força, A_0 é a área inicial da seção transversal do corpo de prova, l_0 é o comprimento inicial e l o comprimento final.

Outra propriedade mecânica a ser considerada é a resistência à flexão de um determinado material. De acordo com o estudo de Souza (2005) é calculado a carga máxima exercida sobre a amostra de estudo no momento de fratura, este valor é multiplicado pelo comprimento do material sobre a largura e altura da amostra.

Conforme Mulinari (2009) o ensaio de flexão representa a tensão máxima aplicada a estrutura de um compósito. A Equação 4 e 5 mostram a resistência de flexão e o módulo de flexão, respectivamente. Onde P é a força aplicada sobre o material ensaiado, L é a distância da região inferior, b é a largura e h espessura. No módulo de flexão, m é a inclinação da tangente da porção linear da curva carregamento *versus* deformação.

$$\text{Resistência à flexão} = \frac{3PL}{4bh^2} \quad (4)$$

$$\text{Módulo de flexão} = \frac{0,17L^3m}{bh^3} \quad (5)$$

2.4.2 Resistência à flamabilidade

O processo de queima em polímeros é avaliado através do ponto de ignição, como o fogo se propaga e a liberação de calor (LAOUTID *et al.*, 2008). Os ensaios de flamabilidade são realizados com o objetivo de observar a direção das chamas de acordo com o comprimento do material em relação ao tempo de queima.

Das *et al.*, (2015) descreve que os materiais a base de polímero não apresentam um bom desempenho quando expostos ao fogo, pois estes são constituídos por cadeias de

hidrocarbonetos normalmente inflamáveis.

Ray e Okamoto (2003) discutiram a utilização de argilas inseridas em matrizes poliméricas, os autores investigaram que o aumento progressivo da argila provocou um retardo no processo de queima, provavelmente relacionado as características de resistência do reforço, onde pode ter ocorrido a difusão das moléculas de oxigênio.

Cunha (2015) estudou a inserção de Lama Vermelha em resinas poliésteres, segundo o autor, a resistência térmica da proporção da adição de particulado na matriz está relacionada a retirada de calor do meio, ou seja, devido a transformação de fase endodérmicas dos metais hidróxidos presente na Lama Vermelha que implica também na retirada de água, modificando a estabilidade térmica do compósito.

De acordo com a CONTRAN (RESOLUÇÃO n° 498 (2014)) o objetivo da caracterização térmica é avaliar a velocidade de queima que passa em uma amostra. Em revestimentos internos dos veículos automotores, deve-se apresentar uma velocidade de propagação de chama de, no máximo, 100 (cem) milímetros por minuto. Essa definição leva em conta o material composto, o lado externo, que no caso é face do material voltada para o interior do habitáculo, e o tipo de componente, ou seja, a base do material em questão.

A taxa de queima em compósitos é dependente da propagação da fase dispersa, além do tipo de material, embora a matriz geralmente seja apresentada com menor resistência à chama. O teste de resistência é calculado conforme a Equação 6.

$$B = \frac{s}{t} \times 60 \quad (6)$$

Onde, B é a velocidade de queima (em milímetros por segundo), s é a distância queimada em milímetros e t é o tempo em segundos, para queimar a distância s .

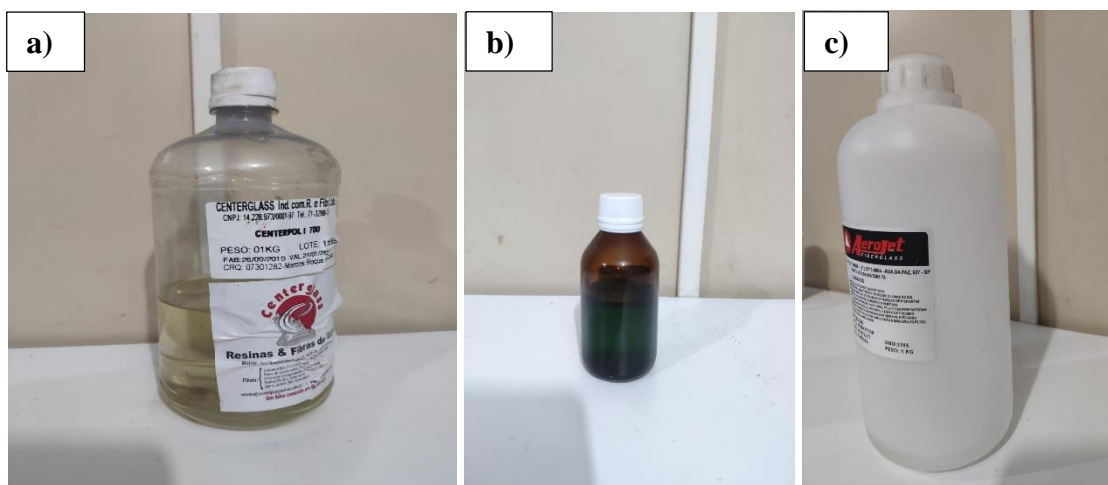
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Resina poliéster isoftálica

A resina utilizada no trabalho foi a Poliéster Isoftálica insaturada - Resina CENTERPOL/700 - com viscosidade baixa, média reatividade, coloração amarelada, sem presença de promotor de reticulação e boa resistência química. Para a composição do sistema catalítico foram utilizados o acelerador de cobalto, produto este denominado como CAT MET UMEDECIDO 1,5 % (Solução de Octoato de cobalto 1,5 %) e o produto comercial BUTANOX M-50 (Peróxido de metil etil cetona [MEK-P]) como acelerador e iniciador de cura. A Figura 9 mostra a resina (a), o acelerador (b) e o iniciador (c).

Figura 9- Resina (a) e os auxiliares utilizados: acelerador de cobalto (b) e iniciador (c).



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.2 Resíduo de alumínio

O resíduo de alumínio foi utilizado como material de enchimento, sendo obtido pela empresa COLORJATO do Estado de São Paulo. Este material foi submetido ao peneiramento, visando adequar as partículas para manter homogeneidade em relação aos seus tamanhos. A Figura 10 mostra o resíduo de alumínio antes das etapas de classificação e caracterização.

Figura 10- Resíduo de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor

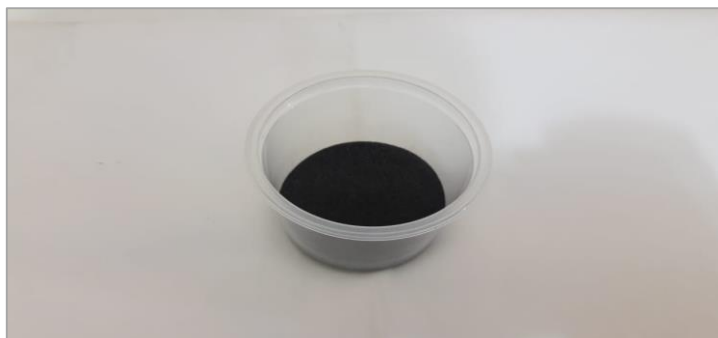
3.2 Métodos

3.2.1 Resíduo de alumínio

3.2.1.1 Secagem e processamento

A preparação do resíduo de alumínio teve início a partir da secagem, onde foi retirado o excesso de umidade na estufa a 105°C durante um período de 24 horas. Posteriormente, o material foi submetido a operações de peneiramento com o propósito de adequação granulométrica para formulação dos compósitos. Para os testes foi considerado a massa específica do alumínio, sendo que segundo ABAL (2020) é de $2,7\text{ g/cm}^3$. A Figura 11 apresenta o resíduo de alumínio classificado na malha de 100 mesh, que considera uma faixa granulométrica para as partículas com maior superfície de contato, descrito também pelo trabalho de Vieira (2016).

Figura 11- Alumínio classificado utilizado para fabricação dos compósitos.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1.2 Classificação do resíduo

Essa etapa consistiu na classificação granulométrica do resíduo após a secagem. O processo partiu da montagem do conjunto de peneiras em ordem decrescente para as malhas até a penúltima peneira de 100 mesh, logo, adicionou-se 100 g de resíduo de alumínio em intervalos de 5 (cinco) minutos, onde foi fechado e acomodado no agitador mecânico (Figura 12), sendo firmemente fixado.

Figura 12- Agitador mecânico



Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida o conjunto foi desafixado do agitador, sendo que o material retido na peneira foi separado e identificado de acordo com o passante até a malha. A abertura das malhas utilizadas no processo é descrita na Tabela 1 conforme a norma NBR 7181.

Tabela 1- Abertura (mm) das peneiras utilizadas para a granulometria do resíduo

Peneira (Mesh)	Abertura (mm)	Peneira (Mesh)	Abertura (mm)
5	4,000	50	0,297
10	2,000	60	0,250
20	0,840	70	0,210
30	0,590	80	0,177
40	0,420	100	0,149

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a obtenção da massa retida/passante, a porcentagem do material passante foi calculada utilizando a Equação 7.

$$Qf = \frac{M_h - M_i}{M_h} \times 100 \quad (7)$$

Onde, Qf é a porcentagem de material passado na peneira, Mh é a massa do material submetido ao peneiramento fino e, Mi é a massa do material retido acumulado.

3.2.1.3 Caracterização morfológica e química

A caracterização morfológica e química do alumínio foi realizada em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo TM 3000 (HITACHI) (Figura 13) no Laboratório de Caracterização de Materiais (MATCAM/PRODERNA/UFPA), a fim de observar as características morfológicas das partículas e, a composição química, de modo que tais fatores podem influenciar no comportamento da fase dispersa dentro da matriz, e assim, modificar as propriedades finais dos compósitos.

i) Morfologia

A amostra foi disposta em uma pastilha de metal, com aproximadamente 0,01 grama da amostra. O material foi disposto com a finalidade de torná-lo mais plano possível e/ou possibilitar o uso da lente de imersão. Foi levado em consideração um limite de resolução baixo, baseado no trabalho de HOLLER *et al.*, (2009), pois, geralmente ocorre efeitos de difração.

ii) Composição química

A caracterização química foi realizada através de análises utilizando espectrômetro de energia dispersiva (EDS) acoplado ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Determinou-se a composição química semiquantitativa e qualitativa da amostra. O material foi capturado por elétrons retro espalhados, de um filamento de tungstênio com voltagem de 5 kV.

Figura 13- Microscópio Eletrônico de Varredura



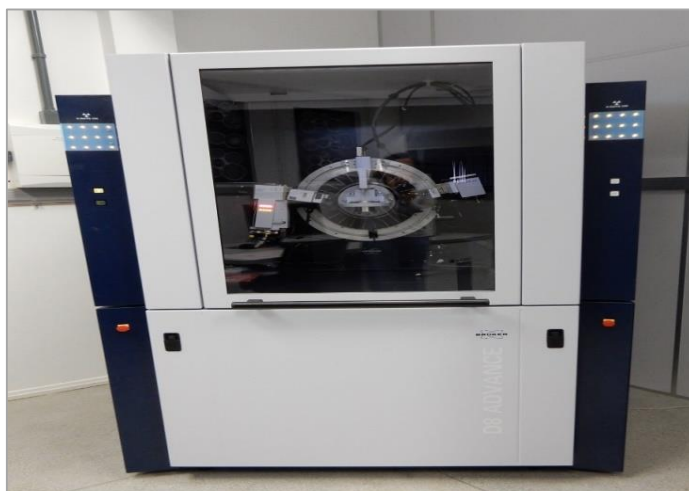
Fonte: Medical Expo (2020).

3.2.1.4 Caracterização mineralógica

O alumínio foi caracterizado por meio da Difração de Raios-X (DRX) com o propósito de identificar as fases cristalinas e a composição mineralógica do material. As amostras foram preparadas conforme processos de quarteamento e homogeneização das partículas com a utilização de almofariz e pistilo, de modo a adequar o tamanho dos grãos para os testes.

Na análise, utilizou-se um Difratorômetro de Raios-X modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60 da PANalytical, com Goniômetro PW3050 (Theta/Theta) e com tubos de Raios-X cerâmico de ânodo de Cu ($\lambda=1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200 W, 60 kV. A Figura 14 mostra o equipamento utilizado.

Figura 14- Difratorômetro de Raios-X



Fonte: Universidade de Caxias do Sul (2020).

3.2.2 Compósitos

3.2.2.1 Testes preliminares

Realizou-se um estudo com o propósito de determinar as melhores condições de homogeneização entre o polímero e o resíduo de alumínio e, por diante, definir a proporção volumétrica limite. Previamente, realizou-se testes apenas com a resina plena e os auxiliadores de reação: acelerador e iniciador.

Inicialmente o trabalho permitiu apresentar o ponto de saturação, no qual foi utilizado um aumento de 10 % até o limite comprometedor de 30 % em volume, no que diz respeito ao enchimento no molde e também da mistura.

Por conseguinte, foi realizado um teste que permitiu verificar o ponto de gel, considerando este valor um dos principais parâmetros para a fabricação dos compósitos. Portanto, de acordo com os cálculos pré-determinados e a análise do comportamento de saturação produziram-se materiais de 10 %, 20 % e 30 % em fração volumétrica de resíduo de alumínio na matriz. De acordo com o trabalho de Mendes (2019) o aumento sucessivo de 10 % permite um limite para uma boa homogeneização. Com o auxílio de um cronógrafo, utilizou-se a contagem do tempo em segundos para cada proporção, o procedimento foi feito em temperatura ambiente.

3.2.2.2 Fabricação dos compósitos

O método aplicado para produção dos compósitos foi o método manual (*hand lay-up*) com compressão aplicada de 25 kN por um período de 20 minutos. Este processo foi realizado em temperatura ambiente.

A Tabela 2 mostra a quantidade dos componentes utilizados para a fabricação dos compósitos, adotando frações volumétricas de alumínio (AL) de 0 %, 10 %, 20 % e 30 % para incorporação na resina plena (RP).

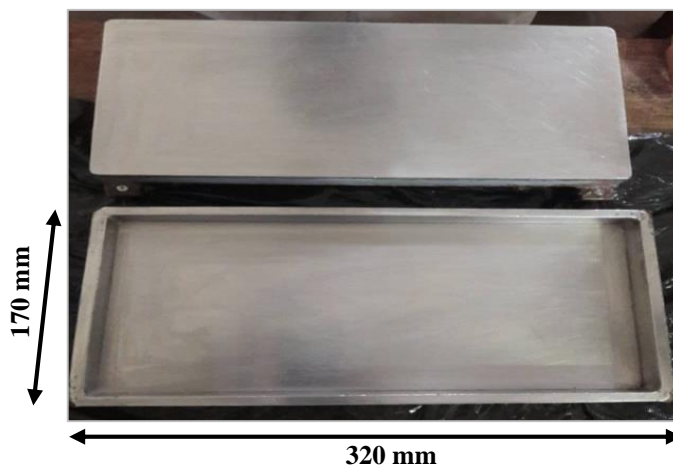
Tabela 2- Fração dos componentes utilizados para fabricação dos compósitos

Resíduo (%)	Resina (g)	Resíduo (AL) (g)	Acelerador 1,5 % (g)	Catalisador 1 % (g)
RP	203,14	0,00	3,05	2,03
AL-10	182,82	68,00	2,74	1,83
AL-20	162,50	137,70	2,44	1,63
AL-30	142,19	206,66	2,13	1,42

Fonte: Elaborado pelo autor

O molde utilizado é no formato retangular com dimensões de 320 x 170 mm, composto de aço inoxidável, o que permite dissipar o calor gerado no processo de polimerização. A Figura 15 ilustra o molde metálico.

Figura 15- Molde de aço inoxidável utilizado na confecção dos compósitos



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente, o processo consistiu na retirada de umidade superficial do resíduo em estufa por 30 minutos, em uma temperatura de 105° C. Logo, todos os componentes utilizados foram pesados de acordo com suas determinadas proporções: resina poliéster e resíduo industrial de alumínio, bem como os reagentes, acelerador de cobalto e iniciador nas proporções 1,5 % e 1 % v/v, respectivamente.

Previamente, aplicou-se um desmoldante (desmoljet) no molde antes da deposição do material, para facilitar a remoção da placa após a prensagem. O processo de fabricação teve início com a inserção do acelerador de cobalto na resina, cuja homogeneização de maneira manual foi realizada através de um recipiente plástico. O resíduo foi adicionado logo após, de modo que a mistura procedeu em um período de 3 (três) minutos, visando desagregar as partículas aderidas na superfície interna do recipiente e, assim, obter boa homogeneização.

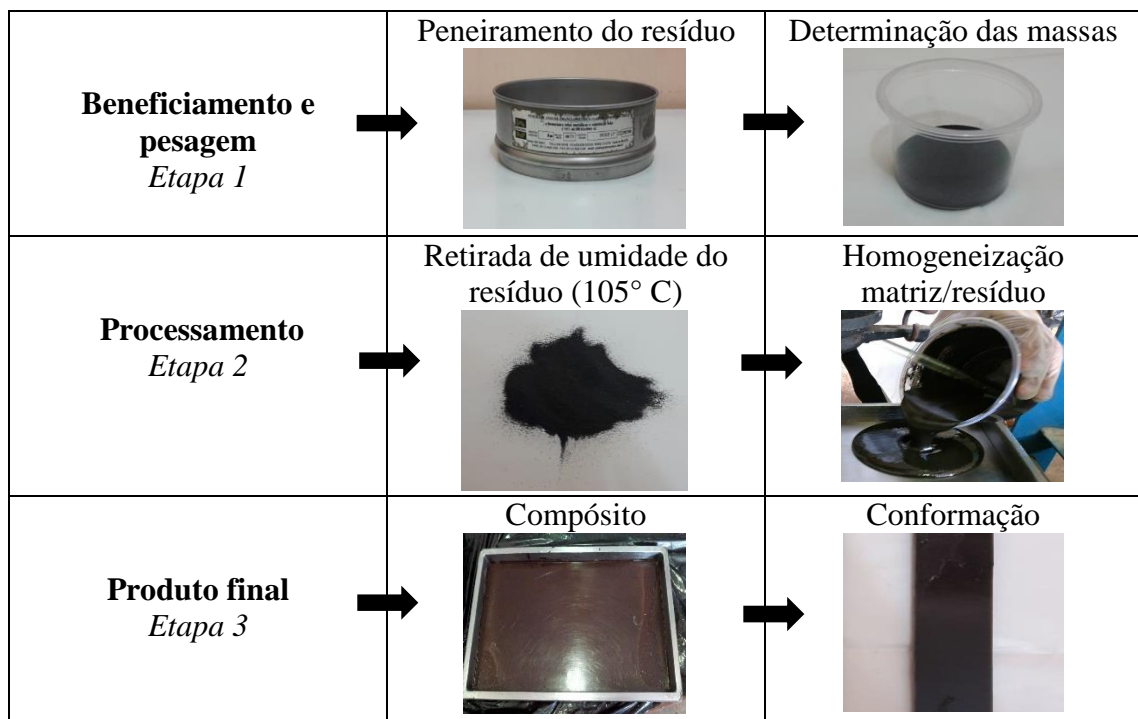
Para o início do processo de polimerização, a etapa seguinte consistiu na inserção do catalisador, posteriormente, o material homogeneizado foi colocado no molde. Para essa transferência, foi considerado um período de aproximadamente 3 (três) minutos em relação a margem de segurança do tempo de gel.

Logo após a inserção do material no molde, verificou-se o tempo do ponto de gel, onde é notado um gradativo aumento da temperatura, portanto, o material foi transferido para o molde, que ainda aberto foi colocado na prensa hidráulica e, com auxílio de um bastão de

vidro, verificou-se o ponto de gel, que através de testes preliminares resultou em um período de aproximadamente 7 (sete) minutos. Levando em consideração este fator, uma vez que neste momento ocorre à formação de cadeias tridimensionais no polímero, o material foi submetido à compressão em uma prensa manual.

Os compósitos foram separados e identificados de acordo com suas frações e, para manter o formato linear das placas, adicionaram-se pesos sobre elas por aproximadamente 24 (vinte e quatro) horas. Por fim, as placas foram submetidas ao processo de corte para adequar os corpos de prova conforme as normas estabelecidas para os ensaios. A Figura 16 mostra o processo simplificado de fabricação.

Figura 16- Fluxograma de fabricação dos compósitos



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.3 Caracterização física

Os ensaios físicos foram processados conforme as normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792, cujo os corpos de prova foram pesados em balança de precisão para determinar: massa seca (Ms), massa úmida (Mu) e a massa imersa (Mi) em água destilada. A Massa Específica Aparente (MEA) (ASTM D 792), Porosidade Aparente (PA) (ASTM D 2743) e Absorção de Água (AA) (ASTM D 570) foram obtidos através das Equações 8, 9 e 10.

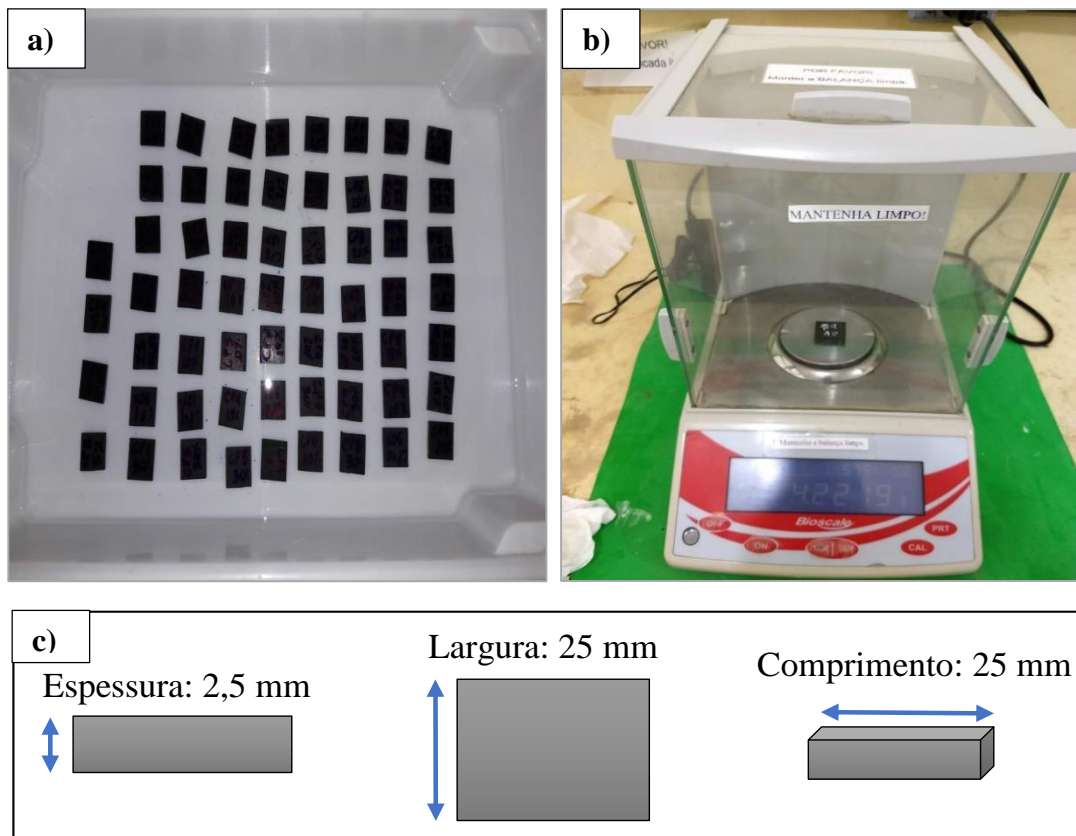
$$MEA \frac{g}{cm^3} = \left(\frac{M_s}{M_s - M_i} \right) \times \rho_{H_2O} \quad (8)$$

$$PA (\%) = \left(\frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \right) \times 100 \quad (9)$$

$$AA (\%) = \left(\frac{M_u - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad (10)$$

A Figura 17 apresenta as dimensões do corpo de prova para determinação das propriedades físicas e a balança de precisão para determinar as massas de cada amostra.

Figura 17- Corpos de prova para a caracterização física (a), balança analítica (b) e as dimensões dos cp's (c).



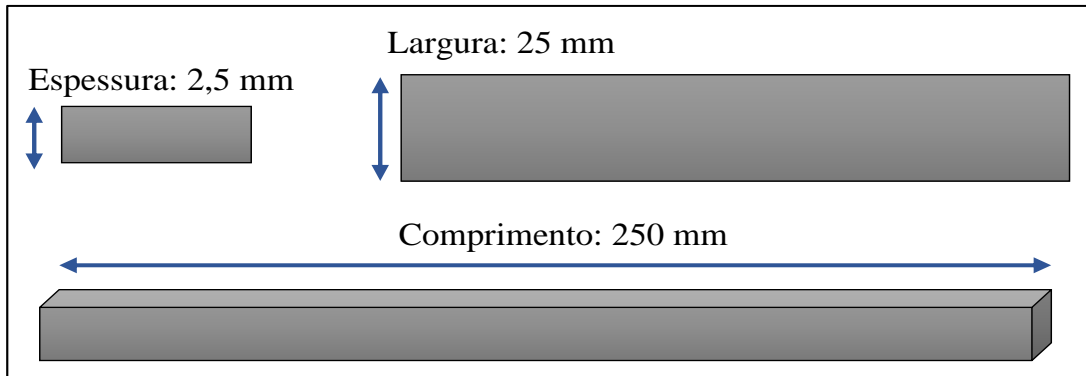
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.4 Caracterização mecânica

3.2.2.4.1 Ensaio de tração

O teste de resistência à tração foi realizado de acordo com a norma ASTM D 3039, onde as dimensões dos corpos de prova são representadas na Figura 18.

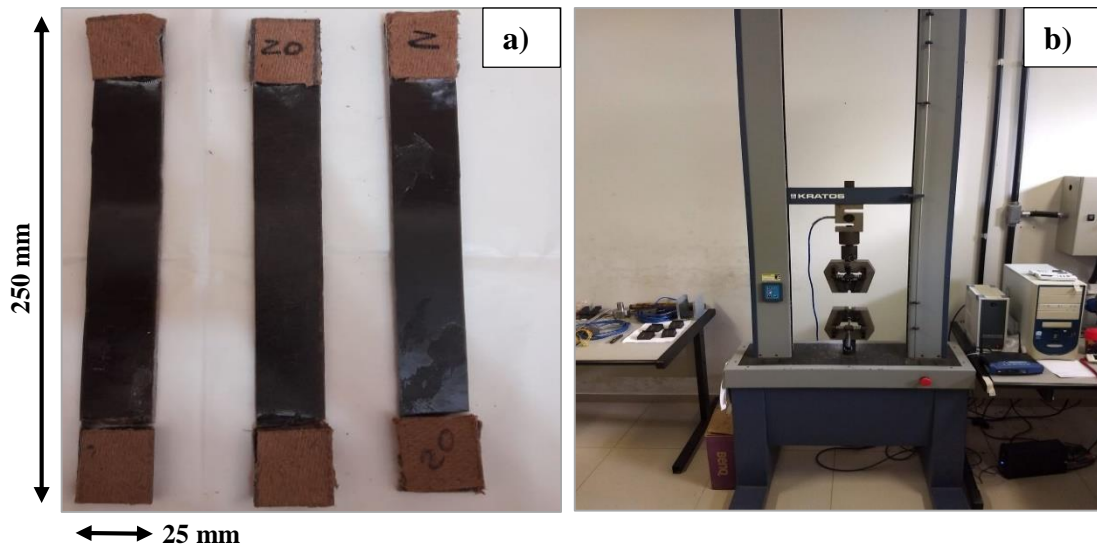
Figura 18- Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a obtenção das propriedades de resistência a tração foi utilizado máquina universal de ensaios, marca KRATOS modelo IKCL3 com sistema de aquisição de dados, com célula de carga de 5 (cinco) kN, adotando velocidade de 2 mm/min com comprimento útil para medição entre garras de 180 mm. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA. A Figura 19 exhibe os corpos de prova e a máquina utilizada no processo.

Figura 19- Corpos de prova (a) e a máquina universal de ensaios (b)



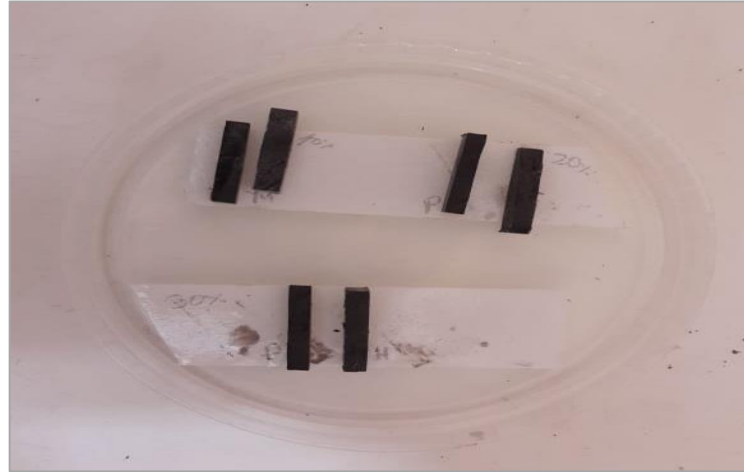
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.4.1.1 Análise das fraturas dos compósitos dos testes de tração

A análise fractográfica dos compósitos foi conduzida em um Microscópio Eletrônico de

Varredura (MEV). A verificação foi realizada nos compósitos com desempenho inferior e superior em cada fração volumétrica. A Figura 20 apresenta as amostras utilizadas para análise.

Figura 20- Amostras das fraturas dos corpos de prova



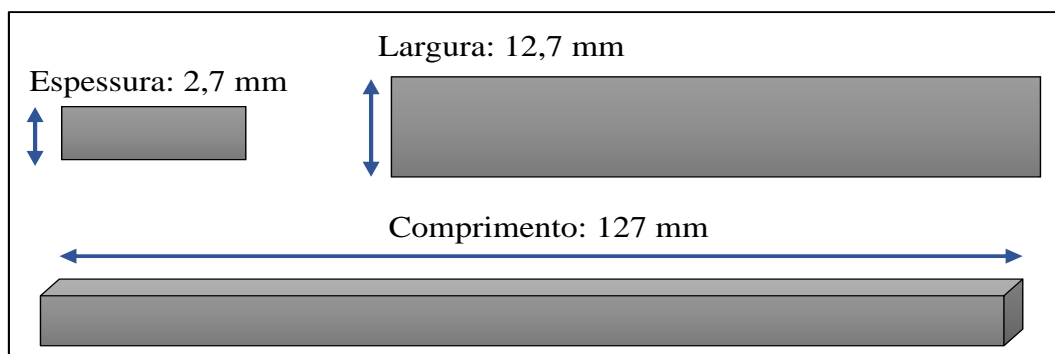
Fonte: Elaborado pelo autor

O Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado é da marca HITACHI, modelo TM 3000. As micrografias foram submetidas a tensão de aceleração de 5 kV. A análise foi realizada no laboratório de microscopia do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA) da UFPA.

3.2.2.4.2 Ensaio de flexão

Os testes de resistência à flexão foram determinados segundo a norma ASTM 790, o qual as dimensões dos corpos de prova são as mesmas para os ensaios de flamabilidade (Figura 21).

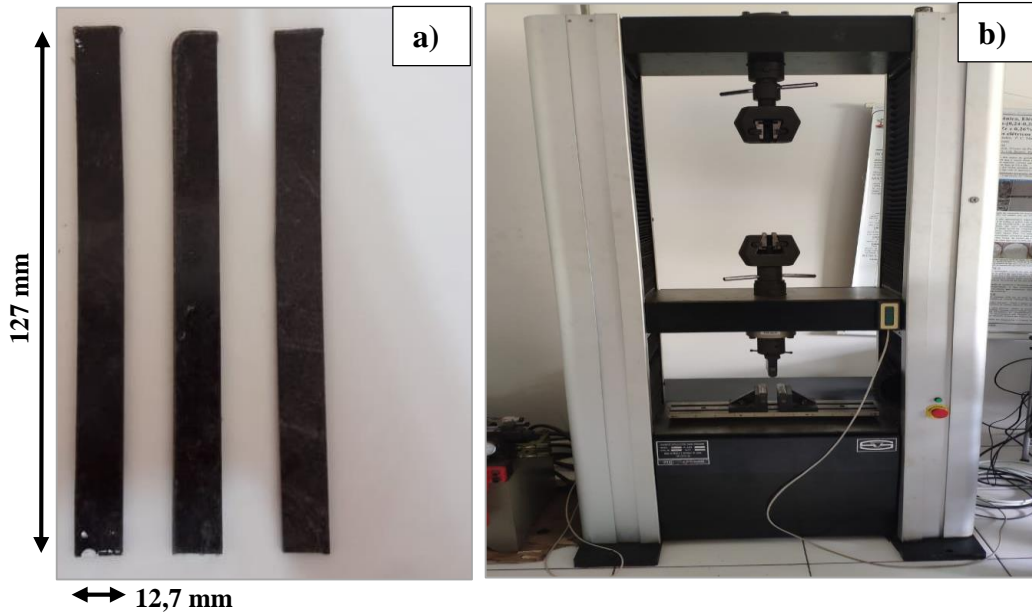
Figura 21- Dimensões para os corpos de prova utilizados no ensaio de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor

O ensaio foi realizado em máquina da marca EMIC, modelo DL, 500 com célula de carga de 5 kN, adotando velocidade de 2 mm/min para o deslocamento do cabeçote. Os corpos de prova e o equipamento dos testes podem ser visualizados na Figura 22.

Figura 22- Corpos de prova (a) e a máquina de ensaio (b)

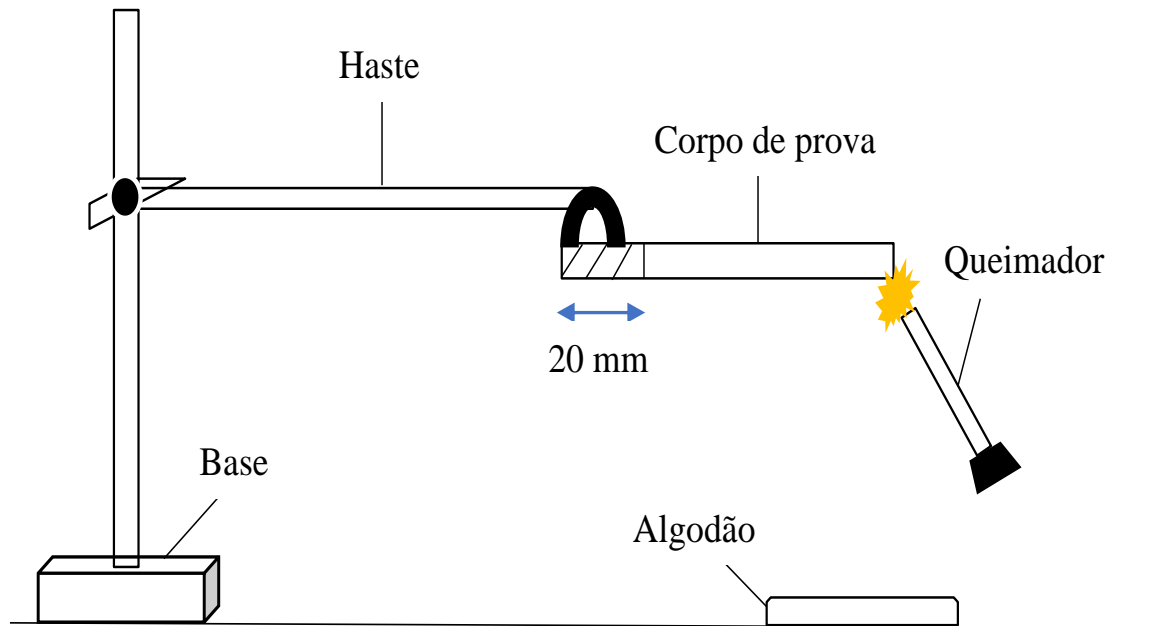


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.5 Flamabilidade (ensaio horizontal)

As dimensões dos corpos de prova neste ensaio foram as mesmas dos testes de resistência a flexão, conforme a Figura 21. Na primeira etapa, os compósitos tiveram marcação nas duas extremidades, considerando 20 mm de cada lado, onde uma dessas extremidades foi posicionada em uma garra na posição horizontal, com angulação de 45° em seu próprio eixo longitudinal. A chama foi posicionada a partir da marcação oposta à extremidade presa, observando o tempo de queima em relação ao comprimento útil do corpo de prova. A taxa de propagação da chama foi calculada de acordo com os dados obtidos, obedecendo à norma ASTM D 635. Observa-se o esquema disposto do ensaio na Figura 23.

Figura 23- Esquema para o ensaio de flamabilidade horizontal



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3 Análise estatística

Conforme os dados gerados dos ensaios físicos, mecânicos e de flamabilidade foi realizado análise de variância (ANOVA) de fator único através do software *Past 3.2* com confiança de 95 %. Para os parâmetros estatísticos ($p\text{-Valor} > 0,05$) a hipótese nula foi aceita. Para a comparação entre as médias, realizou-se o teste de Tukey, de modo a considerar que pelo menos uma fração seja diferente entre si.

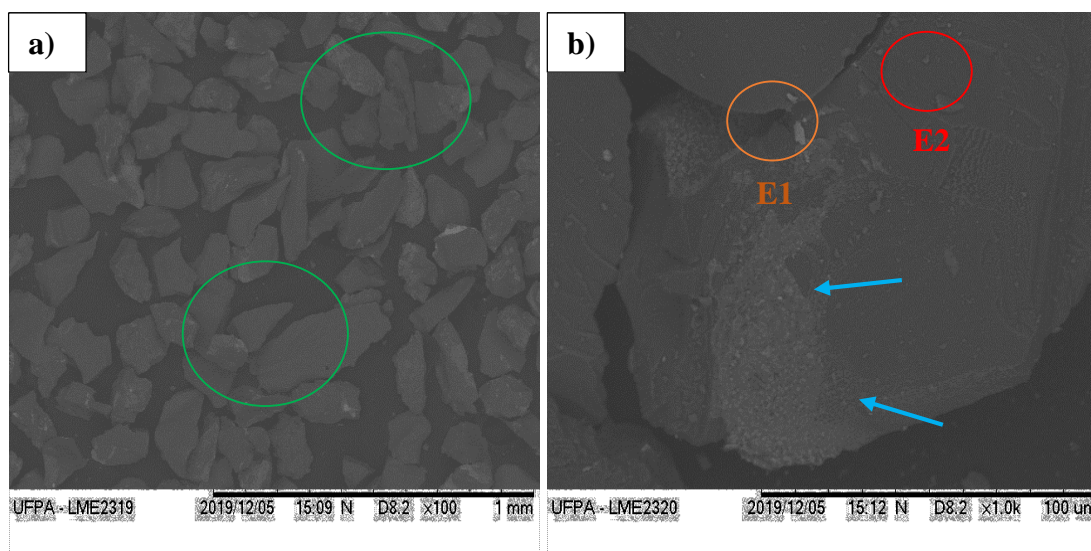
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Materiais de partida

4.1.1 Caracterização morfológica e análise da composição química

O particulado de alumínio após a classificação em peneira de 100 mesh foi submetido a análises morfológicas e composição química, apresentando as distribuições dos tamanhos e formatos do material e os componentes presentes. Observa-se na Figura 24 a micrografia do resíduo em Microscópio Eletrônico de Varredura.

Figura 24- Micrografia do Resíduo de Alumínio com ampliação de 100 vezes (a) e 1000 vezes (b).



Fonte: Elaborado pelo autor

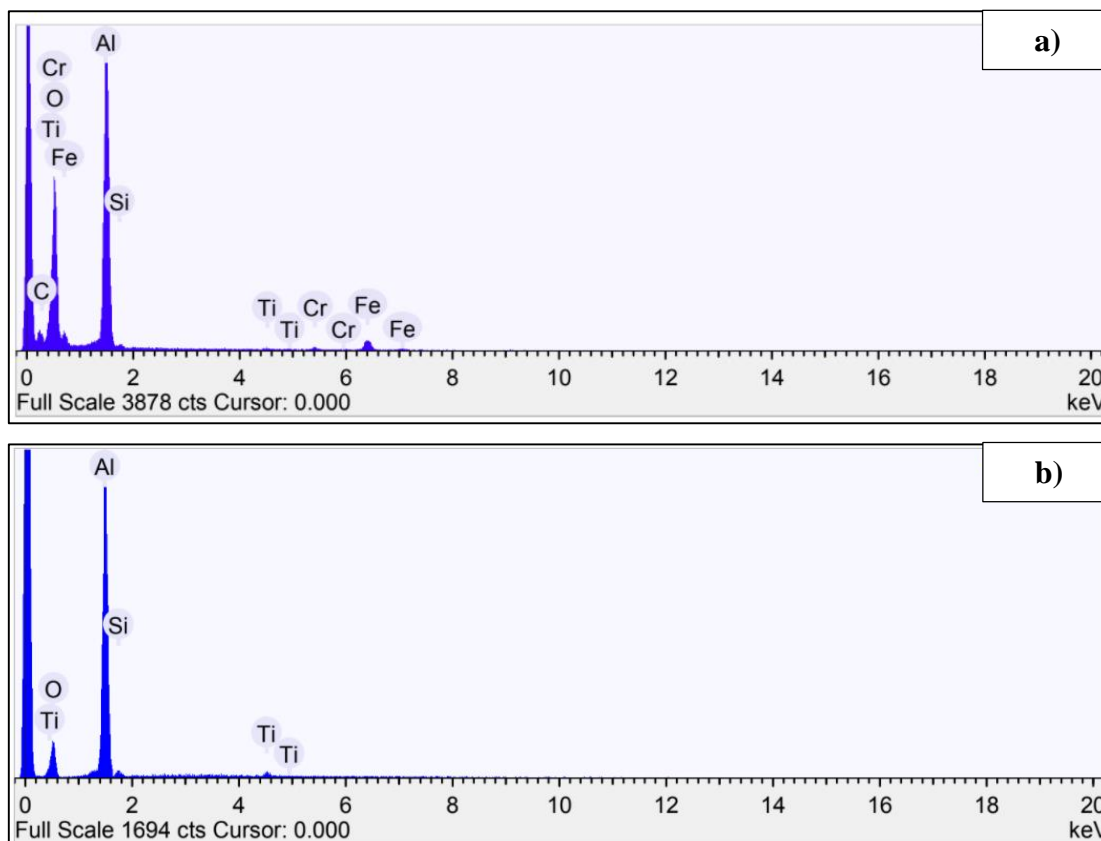
A micrografia permite observar que o particulado dispõe uma faixa granulométrica homogênea e sem aglomerados. As partículas apresentaram formatos com superfície aguda e sem características de esfericidade, como observado nas regiões demarcadas em verde. De acordo com Silva *et al.* (2014) o formato e tamanho de um particulado processado pode ser explicado aos variados meios de sinterização o qual este material é submetido.

O tratamento térmico que provém do beneficiamento da bauxita para obtenção do alumínio primário pode sobrepor outros elementos na estrutura, de acordo com a Figura 24-b é possível verificar nas regiões mais claras (setas azuis) a presença característica de óxidos, correspondentes a extração desses elementos do Processo Bayer, descritos também pelos

estudos de Bray (2012) e Hind *et al.* (1999).

A espectrometria de energia dispersiva (EDS) permitiu identificar as composições exatamente como prognosticado. A Figura 25 apresenta a composição química da micrografia no círculo demarcado em laranja (E1) e vermelho (E2) Figura 24-b, o qual se obteve maior distribuição dos elementos em escala.

Figura 25- Análise da composição química do alumínio por energia dispersiva. Espectro 1 (a) e espectro 2 (b).



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se a presença de picos mínimos de alguns metais como Ferro (Fe), Titânio (Ti) e Cromo (Cr) no ponto de espectro 1, provenientes principalmente de alguns processos de beneficiamento do material. Verifica-se grande incidência do Oxigênio (O) em ambos pontos, que pode ser explicado pela sua própria composição na estrutura cristalina dos óxidos componentes. A Tabela 3 mostra a composição química em percentual elementar nas regiões analisadas.

Tabela 3- Composição química do resíduo de alumínio

Espectro 1 (E1)		Espectro 2 (E2)	
Elemento	Peso (%)	Elemento	Peso (%)
Oxigênio	49,18	Oxigênio	33,70
Alumínio	25,83	Alumínio	61,70
Carbono	17,80	Silício	2,12
Ferro	5,62	Titânio	2,46
Cromo	0,87	-	-
Titânio	0,36	-	-
Silício	0,33	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

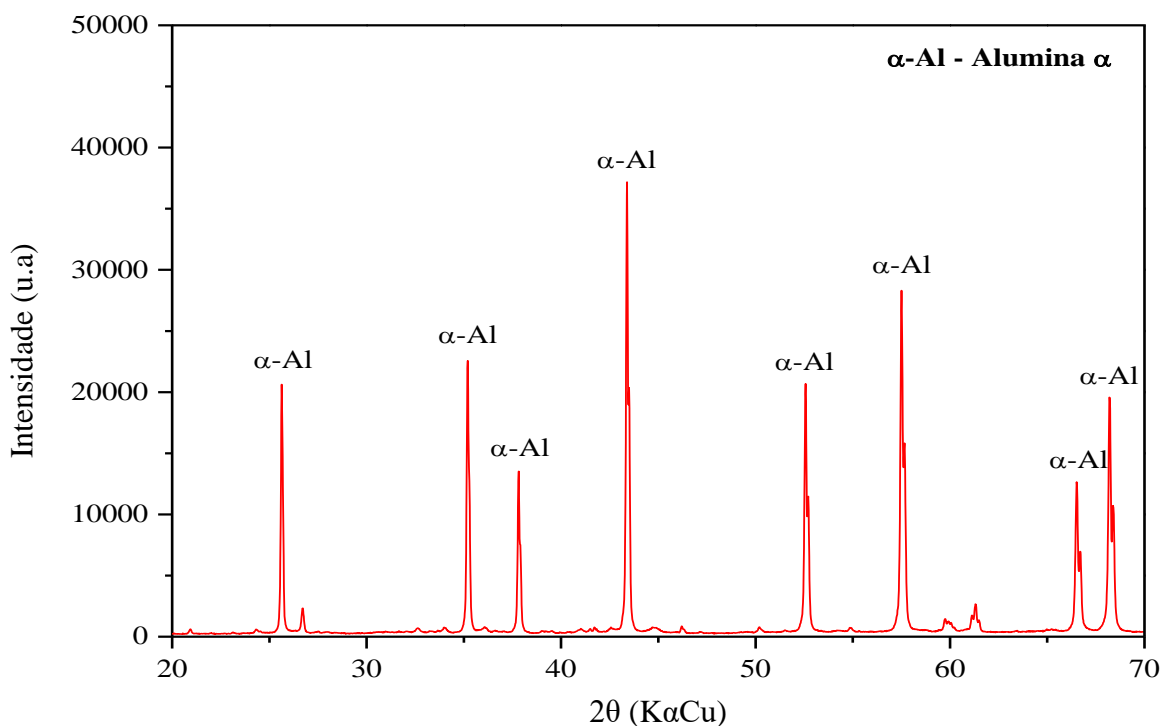
Apesar da presença de alumínio (Al) ocupar 25,83 % no ponto de espectro 1, percebe-se um teor inferior em relação as literaturas, que pode ser associado a perda deste elemento durante o processo de calcinação em temperaturas elevadas, porém, é possível observar que na mesma estrutura para o espectro 2 já apresenta um teor elevado de Al e sem presença de carbono pois são características dos elementos traços que aparecem elevados em virtude de ser uma avaliação pontual. Constantino *et al.* (2002) descreve que a presença de alguns elementos como o silício provém de etapas de aquecimento dos hidróxidos de alumínio. Contudo, conforme os espectros estudados o teor superior de Al e O em função dos outros elementos presentes indicam um maior grau de pureza.

Nota-se que na região do espectro 1 existe baixo teor de ferro, com 5,62 % em peso. O estudo de Frota (2012) cita que a presença de ferro pode influenciar diretamente na qualidade do óxido de alumínio, onde o autor diz que este elemento favorece para que o mesmo ultrapasse a condição de equilíbrio que antecede a etapa de calcinação.

4.1.2 Caracterização mineralógica

A Figura 26 apresenta os principais picos referentes a análise de DRX do resíduo industrial de alumínio, indicando as principais fases presentes (α -Al – Alumina α) e a relativa intensidade das mesmas, corroborando com os trabalhos de David *et al.* (2012) e Guimarães (2014).

Figura 26- Difratoograma de Raio-X do resíduo de alumínio.



Fonte: Elaborado pelo autor

Partindo da análise do difratograma, em baixas intensidades constou a presença mínima de elementos e/ou fases, proveniente de impurezas. Conforme os picos $2\theta = 25^\circ, 35^\circ, 37^\circ, 44^\circ, 53^\circ, 57^\circ, 66^\circ$ e 69° é possível observar a presença constante da alumina alfa. Segundo David *et al* (2012) esse fenômeno pode estar relacionado aos tratamentos iniciais do material no processo Bayer, recuperando suas fases presentes e eliminando diversas impurezas provenientes ao condicionamento da própria alumina, considerada como produto de alto valor.

4.2 Compósitos

4.2.1 Testes preliminares

4.2.1.1 Teste do ponto de gel

Com base no aumento da fração volumétrica com adição de 10 % da fase dispersa em cada intervalo de tempo foi possível observar boa homogeneização, sem aglomerados na parede do recipiente, de forma a garantir uma gradativa dispersão nos testes até a proporção limite de 30 %. A Tabela 4 mostra o tempo de gel para cada fração volumétrica adicionada.

Tabela 4- Relação do tempo do ponto de gel com aumento gradual de particulado

Resíduo (%)	Ponto de Gel (s)
RP	504
AL-10	420
AL-20	300
AL-30	180

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que o tempo para o ponto de gel é decrescente em relação ao aumento gradativo do alumínio, isso justifica que quanto maior a proporção da fase dispersa, maior é a tendência da adesão das partículas e seu estado de saturação (BESSA, 2017). É observado que a adição de alumínio teve influência direta, com redução do tempo para o ponto de gel de 83,33 %. As composições maiores em massa do particulado mostraram que a polimerização do material necessita de um curto intervalo de tempo.

4.2.2 Produção dos compósitos (corpos de prova)

4.2.2.1 Propriedade física

A Tabela 5 apresenta os resultados das propriedades físicas, descrevendo a absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA). Os valores são descritos de acordo com os testes realizados, mostrando o desempenho do particulado na matriz. Verificou-se que os compósitos apresentaram mudanças em suas propriedades em relação ao desempenho real da resina plena, justificando que o resíduo pode indicar boa homogeneidade, conforme Daniel *et al.* (2020) e Mohmad *et al.* (2018) ao estudar outros materiais de reforço.

Tabela 5- Propriedades físicas dos compósitos de resíduo de alumínio

Resíduo (%)	Absorção de Água (%)	Porosidade Aparente (%)	MEA (g/cm³)
RP	0,2830 ± 0,0507	0,3465 ± 0,0620	1,2243 ± 0,0006
AL-10	0,4734 ± 0,0434	0,6978 ± 0,0637	1,4740 ± 0,0044
AL-20	0,3844 ± 0,0467	0,6883 ± 0,0803	1,7911 ± 0,0102
AL-30	0,3609 ± 0,0470	0,7450 ± 0,0970	2,0642 ± 0,0026

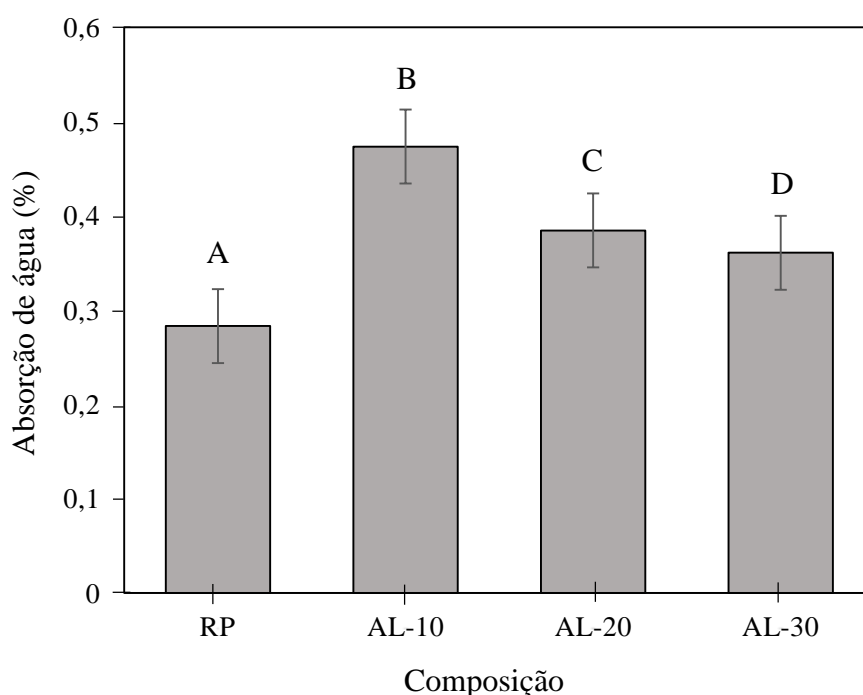
Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados indicam diminuição da absorção de água no material conforme o aumento da quantidade de resíduo, porém, maior em relação a fase contínua, mostrando a influência significativa das frações volumétricas. Carashi *et al.* (2002) aponta que para materiais naturais de reforço a tendência é absorver umidade em seu sistema, concordando com Callister (2016), que diz que este fator está diretamente ligado a presença de falhas na estrutura. Entretanto, é observado que com a inserção de alumínio houve diminuição de até 23,76 % em comparação com a fração de 10 %.

Com isso, Kumar *et al.* (2017) e Zamri *et al.* (2012) justificam que materiais sintéticos tendem a absorver um menor grau de umidade, além disso, a estrutura cristalina destes apresentam características hidrofóbicas, principalmente os metais.

A Figura 27 mostra graficamente o comparativo entre as proporções em relação a absorção de água com seus respectivos grupos Tukey, onde pode-se dizer que AL-10 obteve melhor distribuição dos elementos, embora a resina plena tenha aspectos com tendências a repelir a água presente. A probabilidade de significância entre as composições estudadas foi de 1,014E-5, portanto, de acordo com os grupos de Tukey as frações são estatisticamente diferentes entre si (Grupo A, B, C e D), esclarecendo que a adição do particulado tem influência significativa.

Figura 27- Absorção de água das frações estudadas do compósito de resíduo de alumínio com seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).

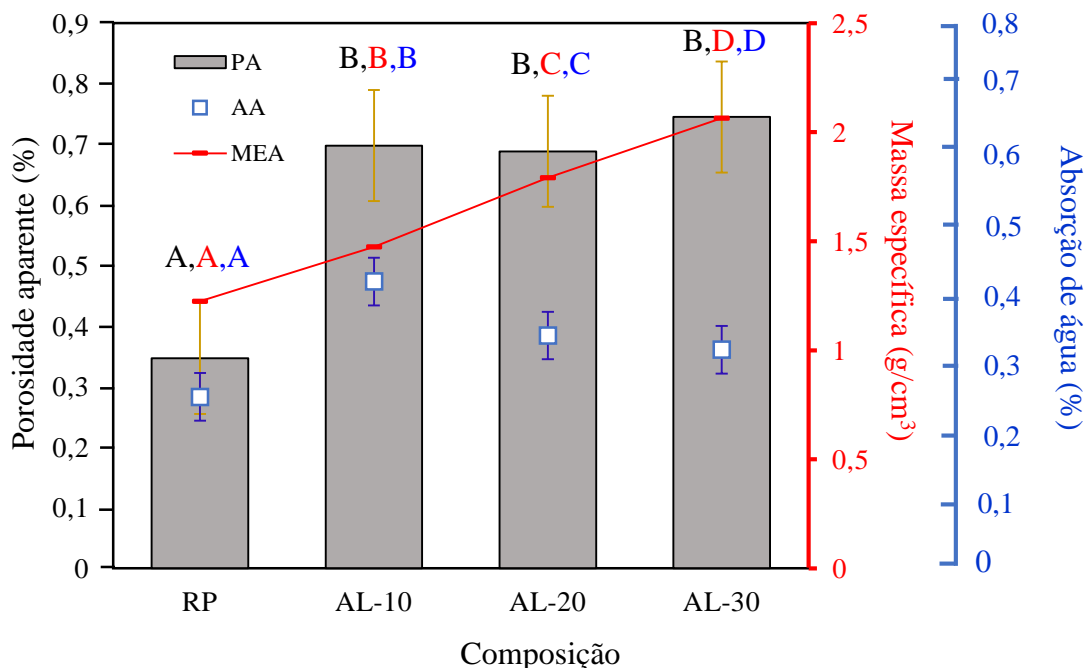


Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5, nota-se que a porosidade aparente não obteve um resultado linear, embora o aumento gradual da porosidade foi proporcional a incorporação de resíduo na fase contínua, com variação de 8,82 %. Conforme a análise de variância todas as frações tiveram porosidades estatisticamente iguais.

Silva *et al.* (2012) ao estudarem o efeito do resíduo de borracha em uma matriz polimérica descrevem que o aumento mínimo da porosidade já era esperado, visto a desordem da fase dispersa. Da mesma forma, leva-se em conta a incompatibilidade de fases e presença de vazios internos decorrentes da dificuldade de percolação dos fluídos e molhabilidade das partículas. A Figura 28 mostra o gráfico comparativo entre a massa específica, absorção de água e porosidade aparente em função do percentual de resíduo com seus grupos Tukey dos níveis estudados.

Figura 28- Comparativo entre as frações quanto suas propriedades físicas com seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).



Fonte: Elaborado pelo autor

No gráfico é possível verificar que o resíduo de alumínio apresentou influência sobre a fase contínua, além disso, a massa específica obedeceu a regra da mistura, e pode explicar o aumento da porosidade aparente e o acometimento de falhas na estrutura. Estatisticamente todas as proporções variantes para massa específica obtiveram valores de probabilidade de

significância menores que 0,05 para o método Tukey, isso significa que todos são diferentes entre si. Observa-se na Tabela 5 que a MEA apresentou proporcionalidade crescente em relação as frações, corroborando com os trabalhos de El Banna (2017) e Cunha (2015) conforme a Tabela 6.

Tabela 6- MEA dos compósitos estudados comparados com as literaturas

Resíduo (%)	MEA	Fonte
AL-10	1,47	Este trabalho
AL-30	2,06	Este trabalho
10%RC	1,41	El Banna (2017)
30%RC	1,73	El Banna (2017)
10%LV	1,27	Cunha (2015)
30%LV	1,58	Cunha (2015)

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que os trabalhos de El Banna (2017) com resíduo de cobre (RC) como aditivo e Cunha (2015) com Lama Vermelha (LV) também indicaram acréscimo para massa específica, considerando então similaridade entre as literaturas. Em termos comparativos, o resíduo de alumínio considerou uma adição de até 23,30 % para o resíduo de LV.

De acordo com os resultados, pode-se dizer que os valores de MEA concordam efetivamente com a regra da mistura, a qual afirma que cada fase constituinte do material contribui para as propriedades do mesmo (CALLISTER Jr., 2016).

4.2.2.2 Resistência mecânica à tração

De acordo com Cho *et al.* (2006) os ensaios de tração apresentam diagnósticos precisos sobre determinado comportamento elástico do compósito, afim de testar a resistência mecânica do material acentuado até a ruptura. Os testes foram realizados conforme condições prescritas de deformação proporcional a velocidade constante, analisando características até sua ruptura.

A Tabela 7 apresenta as frações estudadas (10, 20 e 30 %) para os valores de tensão de resistência, força máxima, alongamento máximo e módulo elástico, assim, descrevendo o comportamento do corpo de prova em relação a modificação da quantidade da fase dispersa.

Tabela 7- Propriedades mecânicas de tração dos compósitos de resíduo de alumínio

Resíduo (%)	Tensão de Resistência (MPa)	Força Máxima (N)	Alongamento Máximo (mm)	Módulo Elástico (GPa)
RP	17,93 ± 6,29	1864,27±724,67	7,10 ±1,88	0,60 ± 0,12
AL-10	27,11 ± 3,49	2095,47±305,41	8,60 ±0,95	0,76 ± 0,12
AL-20	23,21 ± 0,86	1682,85±232,34	6,76 ±0,49	0,85 ± 0,04
AL-30	19,36 ± 0,62	1443,80±160,77	6,36 ±0,95	0,78 ± 0,08

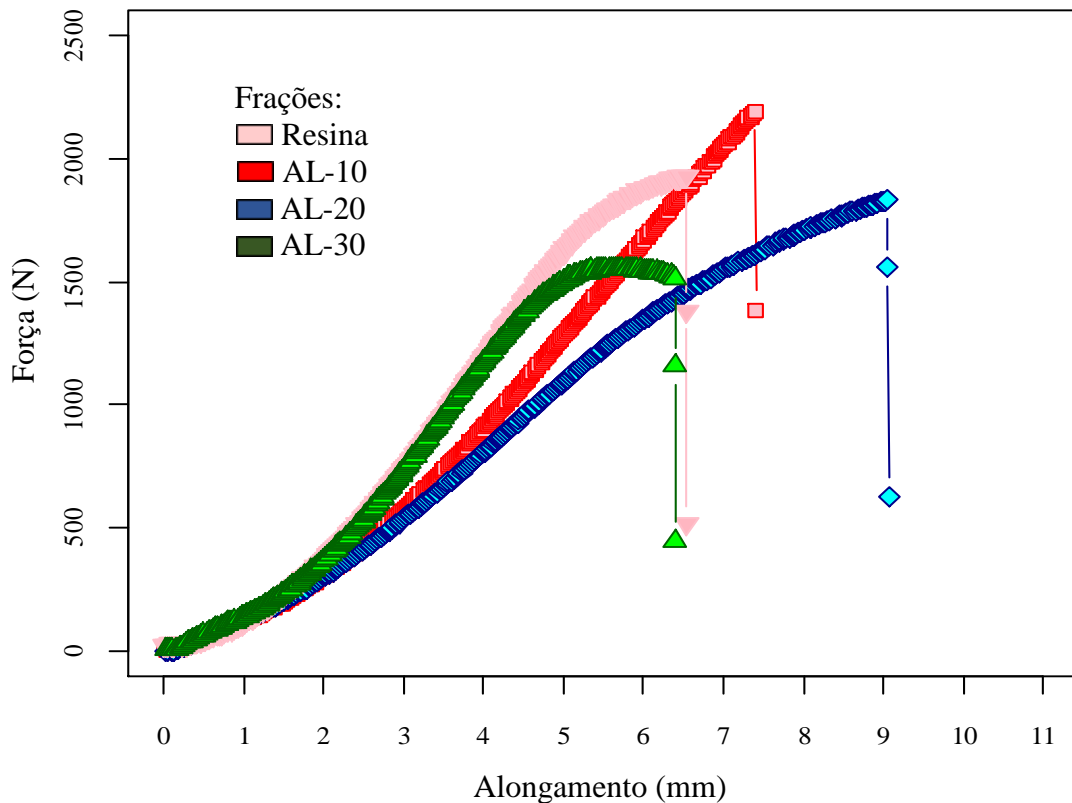
Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo dados estatísticos as frações estudadas mostraram diferenças significativas entre si. Constata-se que a amostra com 10 % desempenhou um comportamento superior aos demais, principalmente quando relacionada a RP.

Mohanty *et al.* (2005) descrevem que o valor da tensão de resistência é dependente da composição química dos aditivos e/ou a distribuição do particulado dentro da matriz, é importante ressaltar que este fenômeno pode ser associado também a presença de poros, ocorrendo em frações volumétricas maiores como visto nesse trabalho.

O gráfico da Figura 29 ilustra a resistência a tração dos compósitos de resíduo de alumínio quanto a força aplicada para ruptura. As curvas de alongamento indicaram que a fração de 10 % desempenhou um comportamento mecânico expressivo em relação as outras composições e a resina plena, apesar de que, o movimento linear mostrou que os compósitos reforçados tendem ser frágeis devido seus limites em relação a força.

Figura 29- Gráfico força vs alongamento dos compósitos produzidos.



Fonte: Elaborado pelo autor

É perceptível que as curvas de alongamento mostraram tendências crescentes, principalmente na fração RP, entretanto, apesar das composições 10, 20 e 30 % obterem um comportamento mecânico maior que a resina, o aumento de resíduo prejudicou a flexibilidade elástica do material. De acordo com Costa (2016) a fase dispersa geralmente não atua como carga de reforço, o que limita suas propriedades devido principalmente a presença de porosidades e a tendência de gerar tensões internas.

O comportamento mecânico pode ser avaliado por meio da análise de variância e método de Tukey conforme a Tabela 8. Verifica-se que a probabilidade de significância (Valor-P) é menor que 0,05 para os grupos A e C, ratificando que a adição residual de alumínio tem efeito significativo com 95 % de confiança.

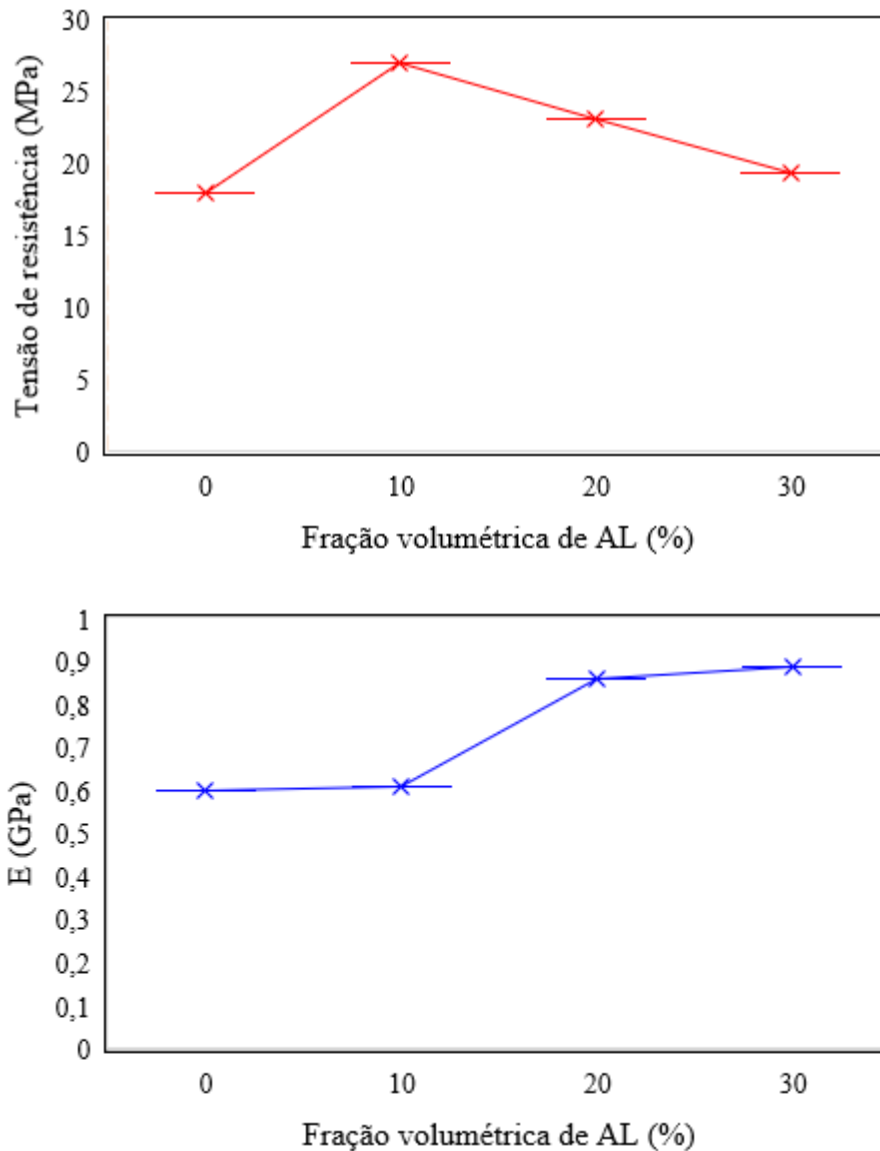
Tabela 8- Análise de variância (Valor-P e método de Tukey's pairwise)

	Valor-P			
	SQ	GL	MQ	P (SAME)
Entre grupos	170,268	3	56,7559	0,02007
Dentro dos grupos	141,614	12	11,8011	
Total	311,881	15		
	Tukey			
	RP	AL-10	AL-20	AL-30
RP		0,02884	0,3745	0,9982
AL-10			0,4122	0,03428
AL-20				0,4238
AL-30				

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base no teste Tukey por pares os grupos A, B, C e D correspondentes as proporções volumétricas mostraram que 0 e 30 % e 10 e 20 % são iguais em termos estatísticos, com isso, a análise por pares mostrou que as frações possuem diferenças significativas entre si, isso descreve que a adição de resíduo apresentou influência direta para tensão de resistência a tração.

A Figura 30 mostra os gráficos comparativos de resistência mecânica e módulo de elasticidade dos compósitos efetivos. Atenta-se principalmente ao valor da tensão que reduz relativamente a partir de 10 %, apresentando assim redução de até 28,59 % até o alongamento máximo para ruptura, porém o módulo de elasticidade obteve bons resultados em proporções com maior volume de resíduo.

Figura 30- Variação da tensão de resistência e módulo de elasticidade *versus* as proporções para fase dispersa

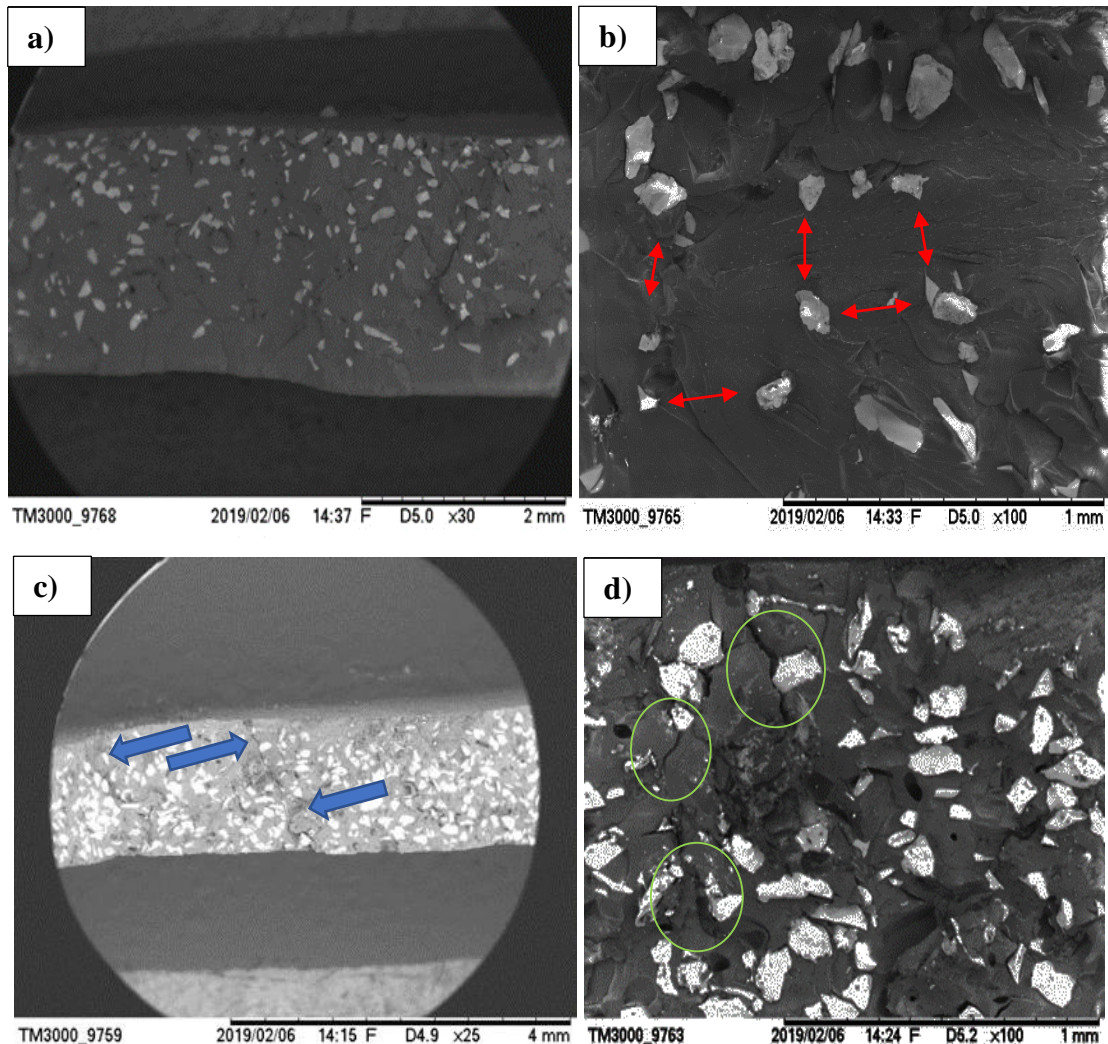
Fonte: Elaborado pelo autor

O módulo elástico descreve aspectos importantes, visto que considera as modificações geométricas causadas por força aplicada e/ou variação da temperatura. Segundo Panzera *et al.* (2010) a massa específica apresenta relação direta com o módulo de elasticidade, de modo que seja inversamente proporcional ao acréscimo da fase dispersa, e quanto maior o módulo elástico, mais rígido será o material. Essas condições não são favoráveis ao compósito, pois em 30 % de resíduo o módulo elástico é consideravelmente superior as outras frações, ou seja, menor é a deformação elástica resultante da tensão aplicada.

4.2.2.2.1 Análise fractográfica dos compósitos

A Figura 31 mostra a análise das fraturas, investigando a distribuição das fases presentes. Observa-se que o resíduo de alumínio apresentou indicativo de compatibilidade com a fase contínua, resultando em boa dispersão e ausência de aglomerados. Para estes testes foram considerados os corpos de prova de 10 e 30 % dos ensaios de tração, com desempenho mecânico inferior e superior respectivamente.

Figura 31- Análise fractográfica dos compósitos de resíduo de alumínio. a) AL-10 x30, b) AL-10 x100, c) AL-30 x25 e d) AL-30 X100.



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se através das micrografias que houve melhor adesão carga/matriz para o compósito de 10 %, observa-se na Figura 31-a o efeito positivo da homogeneização do

compósito. As partículas apresentaram tendências para boa dispersão em relação a matriz em vista da minimização da aderência no interior do molde, embora há concentração de resíduo sedimentado, sendo notável que as partículas com menor peso estão suspensas na região superior do material, descrito também pelo trabalho de Vieira (2016). Analisando a Figura 31-b é possível notar através das setas vermelhas indicativas que as partículas obtiveram boa distribuição e ausência de aglomerados.

Por outro lado, 30 % de resíduo mostrou um relativo grau de desordem, além de aparição efetiva de falhas internas como bolhas, vazios e microcavidades indicados pelas setas azuis (Figura 31-c) conforme destaca Costa (2016) e Daniel *et al.* (2020) ao apresentar resultados semelhantes. Na Figura 31-d é observado a presença de trincas internas e possíveis aglomerados (círculos verdes), geralmente ocasionados pelo limite de saturação.

A combinação dos constituintes (matriz/carga) nem sempre apresenta compatibilidade, de acordo com o estudo de Santos (2007) quanto maior o percentual do resíduo, maior é a quantidade de falhas, que pode ser explicado devido à alta tensão interfacial entre os componentes, o que influem negativamente na resistência mecânica dos compósitos.

Chavooshi e Madhoushi (2013) ao estudarem o efeito do pó de alumínio matriz de polipropileno, descrevem que a mistura de particulado de forma inadequada pode comprometer o desempenho do material final, bem como alguns fatores pós processamento: concentração de tensões internas e porosidades, provenientes das forças de ligação entre as fases.

4.2.2.3 Resistência mecânica à flexão

Este ensaio foi realizado de modo a observar o comportamento dos compósitos sobre a condição de uma força de dobramento aplicada, isso mostrou a capacidade máxima de deformação dos corpos testados. Os resultados são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9- Propriedades mecânicas de flexão do compósito de resíduo de alumínio

Resíduo (%)	Resistência a flexão média (MPa)	Alongamento Máximo (mm)	Módulo Elástico (GPa)
RP	65,40 ± 6,06	1,80 ± 0,08	1,80 ± 0,13
AL-10	133,19 ± 15,35	3,72 ± 1,28	1,68 ± 0,28
AL-20	87,22 ± 8,22	1,83 ± 0,13	2,40 ± 0,26
AL-30	71,19 ± 3,44	1,58 ± 0,13	2,28 ± 0,23

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que os compósitos com resíduos de alumínio apresentaram resultados superiores a resina plena, cujo o comportamento mecânico mais efetivo foi observado em proporções com menor quantidade de resíduo. Considerando os testes preliminares, as frações menores (10 e 20 %) apresentaram melhores condições de homogeneização, distribuição e compactação do resíduo dentro da matriz, onde foi verificado até limite de saturação de 30 %.

Consequentemente, pode-se dizer que as frações volumétricas de 10 % mostraram melhores níveis de dispersão do particulado. Enquanto a maior fração (30 %) utilizada no trabalho não agregou compatibilidade e/ou acomodação dos elementos de forma efetiva, esse fenômeno pode ser associado em razão de falhas acometidas durante o processo de polimerização como poros, fraturas e/ou tensões internas.

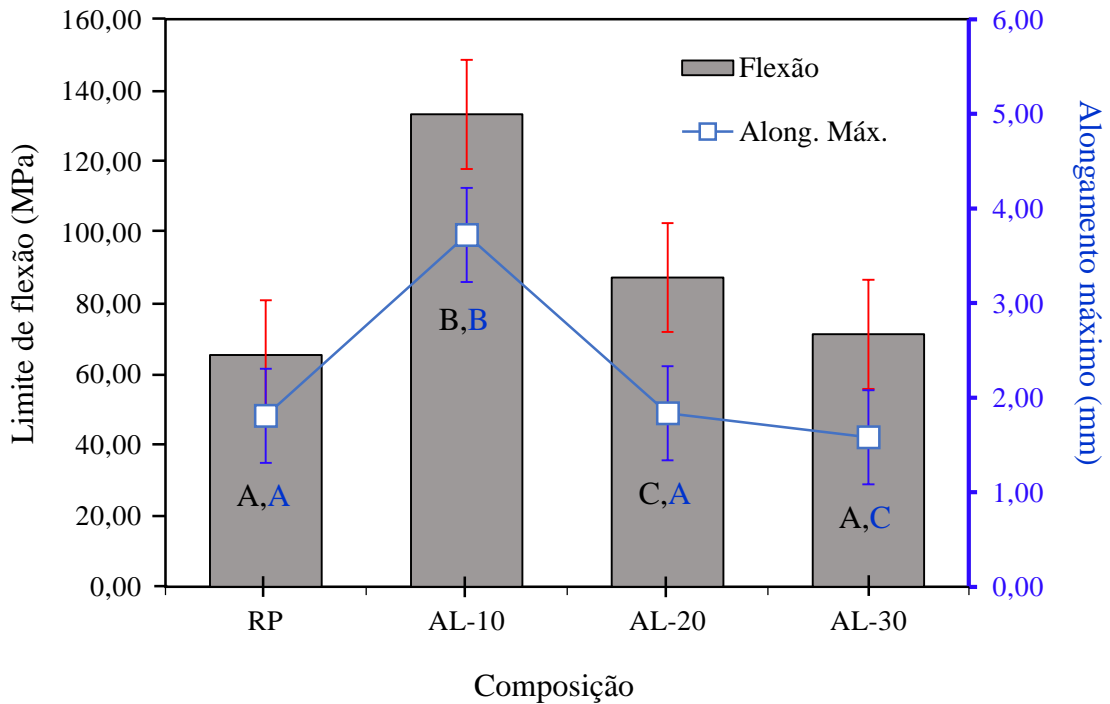
Algumas condições também favorecem no desempenho mecânico, o estudo de Carvalho *et al.* (2013) sobre cargas minerais adicionadas ao polipropileno explica que algumas fases presentes em um material metálico conferem maior dureza, ou seja, menor flexibilidade.

Coura (2018) cita que cargas que provém de rejeitos dos processos de mineração geralmente possuem função de preenchimento, mas não necessariamente essa carga atua como reforço, isso depende de diversas características, principalmente quando se trata de um material metálico.

Segundo Oliveira (2019) ao estudar o efeito de resíduos industriais em matriz de geopolimérica, observou que houve resistência mecânica progressiva com a adição de até 5 % de particulado, sendo que a melhora nas propriedades pode ser explicada pelo tamanho das partículas, onde existe melhor trabalhabilidade dos compósitos em partículas menores, com menos vazios internos.

A Figura 32 mostra o comportamento relativo das composições estudadas e seus respectivos grupos Tukey. Com a adição de 10 % de alumínio foi possível alcançar um desempenho maior que 100 % para a flexão média em relação a resina plena, isso indica que houve melhor incorporação matriz/carga, ou seja, menor grau de saturação.

Figura 32- Comparativo do desempenho mecânico dos compósitos com os respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).



Fonte: Elaborado pelo autor

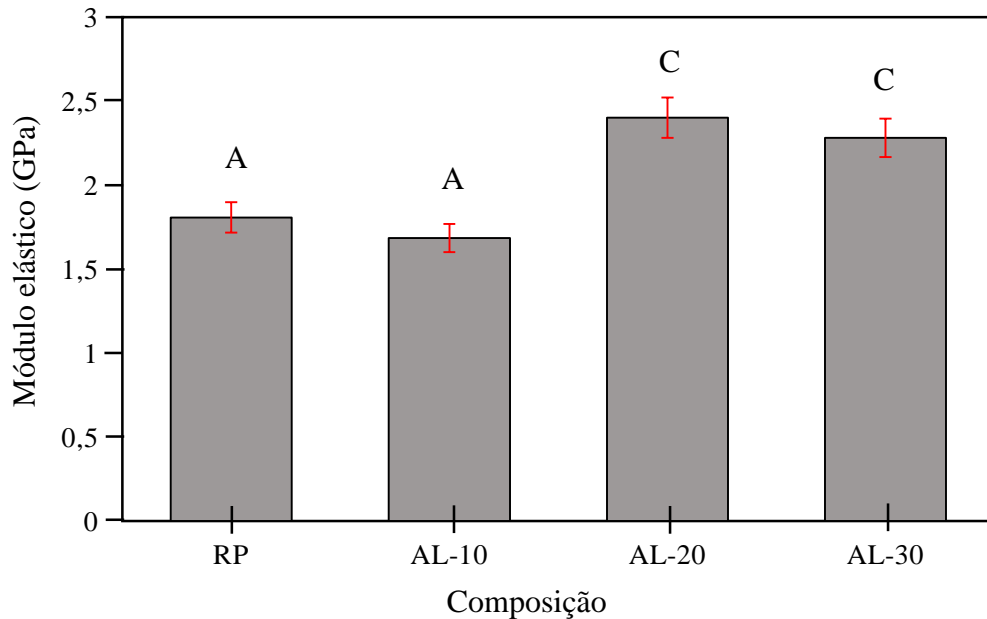
De acordo com o gráfico os valores mostraram que as proporções volumétricas para o limite de flexão estabeleceram resultados positivos com relação a resina, ou seja, é possível observar que o resíduo de alumínio apresentou tendências para atuação como material de reforço. Estatisticamente, o resultado de flexão para os diferentes % de carga (Grupo A, B e C) são desiguais conforme o intervalo de confiança. De acordo com os estudos de Finkler *et al.* (2005) e Melo *et al.* (2019) a resistência mecânica dos compósitos descreve que não só o quantitativo da fase dispersa influencia, mas o tamanho das partículas do material de reforço propriamente dito, onde os autores explicam que para o menor tamanho das partículas, a distribuição é melhor dentro da matriz.

Conforme mostrado na Tabela 9, nota-se que o módulo elástico tem comportamento inverso a resistência de flexão, isso indica que de acordo com o aumento do particulado, o material tem menor rigidez, aspecto este esperado devido a desordem do enchimento para quantidades maiores e/ou a natureza física do alumínio.

Dalpiaç (2006) ao estudar a incorporação de partículas rígidas como reforço em compósitos de polipropileno descreve que o aumento do módulo elástico depende de características intrínsecas do particulado, e assim as modificações que esta pode causar na matriz através da aglomeração.

A Figura 33 mostra o gráfico comparativo para os valores do módulo elástico de cada fração obtida neste estudo, observa-se que a resina plena em relação as proporções 20 e 30 % obteve diferença significativa de 33,33 % e 26,66 % respectivamente. De acordo com Mirjalili *et al.* (2014) a adição da fase dispersa geralmente promove aumento no módulo elástico devido o material de enchimento apresentar maior rigidez que a matriz polimérica.

Figura 33- Comparativo do modulo elástico das frações estudadas e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$)



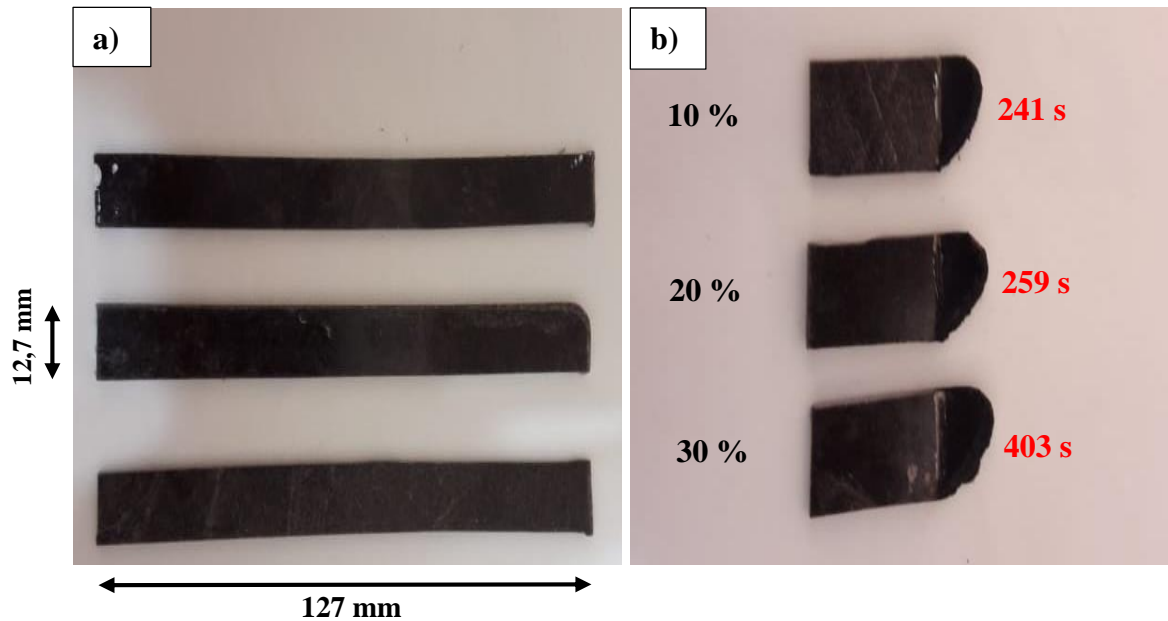
Fonte: Elaborado pelo autor

Estatisticamente, as composições de 20 e 30 % (Grupos A, A, C e C) são iguais, porém, diferentes do desempenho da resina plena e da composição de 10 %, isso mostra que a fase dispersa apresentou efeito no compósito polimérico.

4.2.2.4 Ensaio de resistência a queima

A partir dos testes realizados para as propriedades de resistência a chamas foi possível obter a taxa de queima horizontal do compósito. Os resultados mostraram que a fase dispersa teve efeito significativo, ou seja, apresentou menor taxa de queima conforme a adição de resíduo de alumínio. A Figura 34 apresenta os corpos de prova utilizados para o ensaio de flamabilidade e o limite de propagação da chama nas frações estudadas.

Figura 34- Corpos de prova utilizados (a) e propagação de chama no corpo de prova (b).



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nas normas estabelecidas para os testes de queima foi possível calcular através da Equação (4) a taxa de queima, que considera o comprimento em mm do corpo de prova em relação ao tempo em segundos. Os dados obtidos são expressados na Tabela 10.

Tabela 10- Propriedades de resistência a chamas dos compósitos

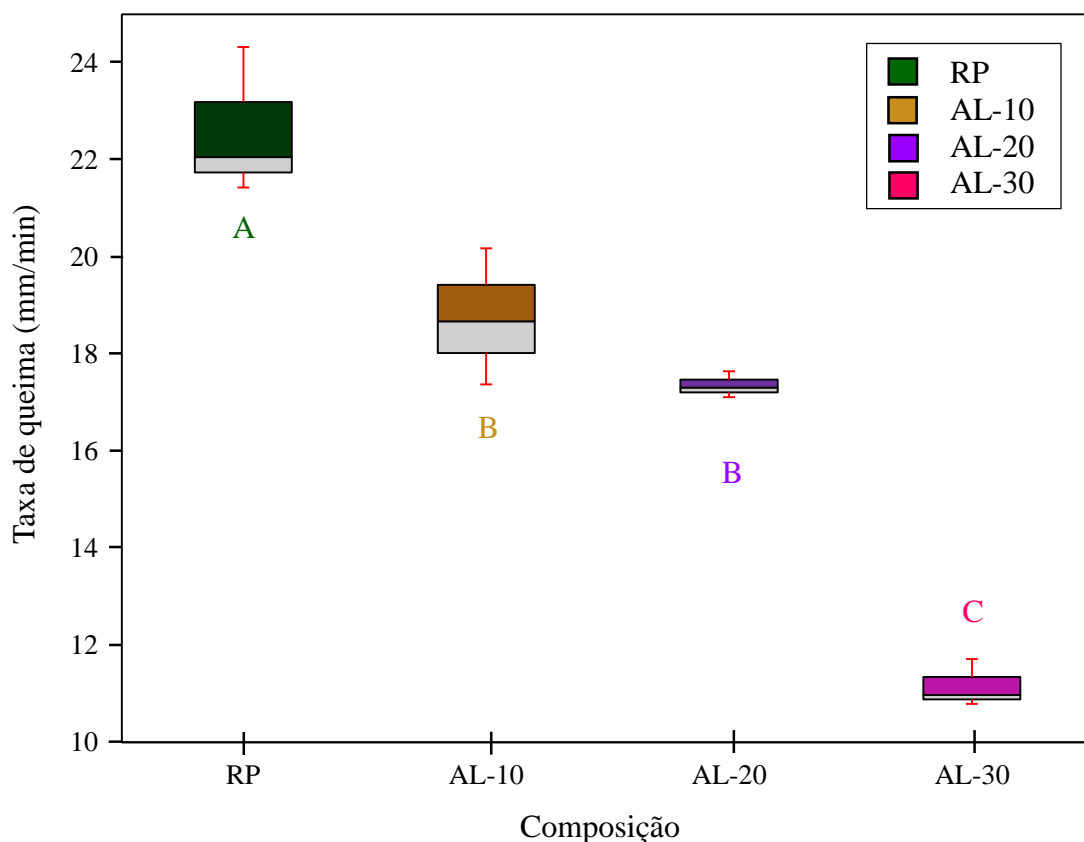
Resíduo (%)	Taxa de queima (mm/min)	Redução (%)
RP	22,60 ± 1,52	-
AL-10	18,74 ± 1,40	17,07
AL-20	17,35 ± 0,27	23,23
AL-30	11,17 ± 0,49	49,42

Fonte: Elaborado pelo autor

O desempenho da fração de 30 % apresentou uma margem promissora em relação a resina plena, mostrando que a adição do alumínio possibilitou um material com maior resistência a chama. Rocha (2015) ao estudar o efeito da alfa alumina, refere-se que esse comportamento depende das condições do processamento do compósito, ou necessariamente a forma que a fase reforço é dispersa. Além disso, leva-se em consideração a reação endotérmica que por hora dissipa o calor e reduz assim o grau térmico gerado durante a queima.

A Figura 35 relaciona o comportamento das proporções até o desempenho de 30 %, assim, foi possível observar que quanto maior o teor de massa, melhor foram os resultados. O gráfico permitiu investigar o desempenho do particulado inserido, nota-se que a adição de 10 e 20 % são iguais em termos estatísticos de acordo com os grupos Tukey (A, B e C), sendo que a fração de 30 % obteve a menor taxa de queima. Portanto, pode-se dizer que a flamabilidade nos corpos de prova ensaiados é diretamente proporcional a quantidade de resíduo adicionado.

Figura 35- Gráfico comparativo quanto ao desempenho para flamabilidade das proporções estudadas e seus respectivos grupos Tukey ($p < 0,05$).



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo a análise dos resultados, pode-se dizer que o resíduo possui características auxiliares ao retardo de chamas, embora o processo de queima tenha apresentado queima completa em relação ao comprimento do corpo de prova. Estaticamente, através do valor P de $8,515E-6$ as frações são relativamente diferentes e a redução comparativa com a resina se encaixa nos limites dispostos.

O trabalho desenvolvido por Alves *et al.* (2018) descreve que a resistência a queima pode estar relacionada com a dificuldade da difusão das moléculas de oxigênio que percola

internamente no material, isso ocorre devido a propriedade de barreira das partículas envolvidas no meio. Além disso, Bitencourt e Pandolfelli (2013) relatam a dificuldade de saída dos voláteis na estrutura dependendo do processamento do polímero, pois uma estrutura mais densa dificulta a saída dos voláteis durante a pirólise.

Outro fator a ser considerado é logicamente a natureza físico-química do alumínio, ou seja, a resistência depende de fatores como comportamento físico e da composição química da estrutura. Dependendo dos elementos presentes, pode haver a formação de alguns óxidos resistentes a chamas, descritos também pelo trabalho de Zammarano *et al.* (2005).

A norma CONTRAN n° 498 exige que revestimentos internos dos setores automobilísticos tenham velocidade de propagação de chamas de 100 mm/min. Com base nessa resolução, os compósitos apresentaram taxas de queima menores do que as exigidas, com redução de até 88,83 % para a maior fração volumétrica (30 %) estudada.

De acordo com os grupos Tukey as composições de 20 e 30 % são estatisticamente diferentes, isso indicou que a carga de enchimento teve influência nos resultados. Dessa forma, o melhor desempenho foi comparado com outras literaturas conforme a Tabela 11.

Tabela 11- Comparativo da taxa de queima com as literaturas

Material	Taxa de queima (mm/min)	Fonte
RP	22,60	Este trabalho
AL-30	11,17	Este trabalho
CV-30%	18,42	FERREIRA <i>et al.</i> (2018)
FA-40%	17,79	RIBEIRO <i>et al.</i> (2013)
Polipropileno	49,60	ALVES <i>et al.</i> (2018)
Acrílico	29,70	ASTM D 635

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o melhor resultado para os compósitos de resíduo de alumínio apresentou taxa de queima inferior aos demais materiais, principalmente quando são relacionados com outros tipos de matrizes poliméricas, que por sua vez possuem elevado princípio de combustão. Os compósitos de cinzas volante (CV) e fibra de abacaxi (FA) tiveram redução de 64,90 % e 59,26 % respectivamente, mostrando que o compósito com a inserção de resíduo de alumínio ainda mostrou melhor desempenho a propagação das chamas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O processo de fabricação dos compósitos foi adequado até o limite de saturação de 30 %, apresentando boa homogeneização e preenchimento do molde por disposição. A quantidade de resíduo industrial de alumínio mostrou aumento do ponto de gel.

A morfologia, interface mineralógica e composição química analisada do resíduo industrial de alumínio mostraram claramente que as partículas têm características e formatos comuns entre si, o que resulta diretamente no comportamento do material aderido a fase contínua.

O particulado de alumínio apresentou indicativo de compatibilidade com a matriz poliéster insaturada, dentre o qual possibilitou melhor desempenho em proporções volumétricas inferiores a 30 %. Nos ensaios físicos as frações de 20 e 30 % mostraram que a adição de resíduo teve influência nos valores de absorção de água e porosidade aparente. A massa específica aparente teve aumento progressivo em relação a inserção de resíduo.

A adição de particulado até 30 % se manteve eficaz em termos de saturação, porém, para as propriedades mecânicas os compósitos de 10 % mostraram melhores efeitos, atingindo um desempenho de até 51,19 % para tensão de resistência a tração e 103,65 % para flexão em relação a resina plena, contudo, houve diminuição significativa nos compósitos com maior inserção de resíduo.

No entanto, os compósitos estudados apresentaram maior resistência à flamabilidade nas frações de 20 e 30 %, com redução de 23,23 e 49,42 % respectivamente. As frações estudadas mostraram que o resíduo indicou resistência a chamas em relação ao desempenho máximo a resina plena.

Para as frações estudadas, observou-se que 30 % de resíduo de alumínio apresentou um grau de desordem por conta do limite de saturação, o que resultou em pequenas falhas na estrutura interna do compósito como bolhas, trincas e microcavidades.

Os resultados encontrados durante a realização deste estudo apresentaram um potencial para o resíduo de alumínio atuando como material de reforço, contudo, o aumento progressivo da fase dispersa compromete diretamente o desempenho mecânico, o qual precisa ser posteriormente investigado segundo métodos específicos para as possíveis aplicações.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

- Desenvolver compósitos com resíduos industriais de alumínio e analisar suas propriedades em diferentes faixas granulométricas.
- Avaliar o comportamento termogravimétrico dos compósitos.
- Estudar o comportamento mecânico de impacto dos compósitos poliméricos com particulado de alumínio.
- Estudar a inserção de fibras sintéticas e/ou naturais combinadas ao resíduo industrial de alumínio e analisar a compatibilidade das fases em compósitos poliméricos.
- Avaliar as propriedades dos compósitos em outros intervalos de frações volumétricas até o limite da saturação.

REFERÊNCIAS

- ABAL (Associação Brasileira do Alumínio). **Características Químicas e Físicas**. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 20/01/20.
- ALBUQUERQUE, R. J. **Desenvolvimento de material compósito para reforço de dutos de aço**. Rio de Janeiro- RJ. (Dissertação de mestrado), 2005. Disponível em <https://www.ufpe.br/documents/616030/926745/Estudo_desenvolvimento.pdf/60a8025cc27e-4400-b441-e2c1660e204f>.
- ALVES, A. M. *et al.* “Influência da Alumina Sintetizada por Reação de Combustão nas Propriedades de Compósitos com Matriz de Polipropileno”. **Matéria (Rj)**. vol. 23, n. 04, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/JM7yqd68Y57hdwwQyqNfcNP/?lang=pt>>.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2015.
- ASTM D 2734-16, **Métodos de teste padrão para conteúdo vazio de plásticos reforçados**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM D 3039 / D3039M-17, **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D 570-98 (2018), **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- ASTM D 635-18, **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 792-20, **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- ASTM D-790-10- **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**, West Conshohocken, PA 19428-2959, United State, EDT 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR 7181 - Solo – Análise Granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.
- BESSA, M. L. T. “**Estudo da dispersão e adesão de micropartículas de diamante em formulação de compósitos epoxídicos**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, 2017.
- BITENCOURT *et al.* “Estudo da Influência da Granulometria e da Carga Mineral em Resina Epóxi Utilizada em Fachada Ventilada”. **Cerâmica Industrial**. 23 (1) p. 13-23, 2018. Disponível em: <<https://ceramicaindustrial.org.br/article/10.4322/cerind.2018.003/pdf/ci-23-1-13.pdf>>.

BITENCOURT, C. S.; PANDOLFELLI, V. C. Resinas termofixas e a produção de refratários contendo carbono: base teórica e insights para futuros desenvolvimentos. **Cerâmica** **59**, p. 1–26, 2013. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/YrWxtCw4zR6sM5VstLwh4tQ/?format=pdf&lang=pt>>.

BONED, C., ZÉBERG-MIKKELSEN, C. K., BAYLAUCQ, A., DAUGÉ, P. High-pressure dynamic viscosity and density of two synthetic hydrocarbon mixtures representative of some heavy petroleum distillation cuts. **Fluid Phase Equil.**, v. 212, p. 143–164, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378381203002796>>.

BOSZE, E. J. *et al.* “High-temperature strength and storage modulus in unidirectional hybrid composites”. **Composites Science and Technology**, 2006. 66(13): p. 1963-1969.

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. Disponível em: <https://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/amanda_brandao.pdf>.

BRAY, E. L. Bauxite and Alumina. SME (Ed.). **National Minerals Information Center. Englewood, CO**. p. 35-36, 2012.

CALLISTER W. **Ciência e Engenharia de Materiais – uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

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

CANEVAROLO Jr, S. V. **Ciência dos Polímeros**. Editora Artliber, São Carlos- SP, 3ª ed., 2010.

CARASHI, J. C. *et al.* **Compósitos biodegradáveis de polihidroxibutirato (PHB) reforçado com farinha de madeira: propriedades e degradação**. Maringá, Paraná. vol. 24, n. 6, p. 1609-1614, 2002. Disponível em: <<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:In7nrw0Rm5QJ:https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/download/2475/1555/+&cd=1&hl=ptBR&ct=clnk&gl=br>>.

CARNEIRO, Luiz Antonio Vieira; TEIXEIRA, Ana Maria Abreu Jorge. “Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção”. **Tecnologia**, 2008. Disponível em: <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_quad_2008/propr_caract_compostos_compositos.pdf>.

CARVALHO, F. V.; RIBEIRO, R. C. C. “Relação da interação do polipropileno com minerais na resistência mecânica do compósito gerado”. **Mineralis**, 2013. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1423/1/FERNANDA%20VELOSO%20DE%20CARVALHO.pdf>>.

CHAVOOSHI, A.; MADHOUSHI, M. **“Mechanical and physical properties of aluminum powder/MDF dust/polypropylene composites”**. p. 214-220, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/257390033_Mechanical_and_physical_properties_of_aluminum_powderMDF_dustpolypropylene_composites>.

CHO, J., JOSHI, M.S., SUN, C.T. “Effect of inclusion size on mechanical properties of polymeric composites with micro and nano particles”. Estados Unidos, **Composites Science and Technology**, p. 1941-1952, 2006.

CONSTATINO, V. R. L. *et al.* **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. São Paulo, v.25, n. 3, 490-498. 2002.

CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito). Resolução nº 498 – **“Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos e de outras providências.”** Ministério da Infraestrutura, 01 de janeiro de 2015. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=273318>>. Acesso em: 15 de agosto de 2020.

COSTA, D. S. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2016. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. 227 f. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/7601>>.

COURA, I. R. **“Avaliação do processamento de compósitos baseados em polietileno de alta densidade e rejeito de mineração de ferro”**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, (Dissertação de mestrado), 2018.

CUNHA, E. J. S. **Influência do uso de resíduo do processo bayer nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de base polimérica reforçados com fibra de curauá (ananas lucidus. Mill)**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – PRODERNA/ITEC, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2015. Disponível em: <<https://proderna.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/Edinaldo.pdf>>.

DALPIAZ, G. **“Estudo do efeito de cargas minerais em compósitos poliméricos particulados em matriz de polipropileno”**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. 236 f. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/13882>>.

DANIEL, B. T. F. *et al.* **Efeito da Incorporação de Resíduo Mineral de Calcário nas Propriedades Físicas e de Resistência Mecânica em Compósitos Poliméricos**, São José dos Pinhais, vol. 6, n.2, p.6493, fev./2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/6763>. Acesso em: 20 jul/2020.

DAS, A.; BAR, M.; ALAGIRUSAMY, R. Flame retardant polymer composites. **Fibers and Polymers**, v. 16, n. 4, p. 705-717, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12221-015-0705-6>>.

DAVID, E., KOPAC, J.; **Hydrolysis of aluminum dross material to achieve zero hazardous waste**; *Journal of Hazardous Materials*; 209– 210; 501–509; 2012. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389412000957>>.

EL BANNA, W. R. **Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (musa sapientum, musacae)**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Pará, Belém, 2017. 150 f. Disponível em: < <https://www.proderna.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/2017/WASSIM%20RAJA.pdf>>.

FACTORI, Irina Marinho. **Processamento e propriedade de compósitos de poliamida 6.6 reforçada com partículas de vidro reciclado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de materiais) - Escola politécnica da Universidade de São Paulo- SP, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde29092010163249/publico/Dissertacao_Irina_Marinho_Factori.pdf>.

FERNANDES, F. A. N.; LONA, L. M. F. **Introdução à modelagem de sistemas de polimerização**. Editora Booklink, São Carlos- SP, 1ª ed., 2004.

FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos: Editora UFSCar, 2ª ed., 2002.

FERREIRA, V.H. *et al.*, (2018), “Cinzas Volantes em Compósitos Poliméricos: Análise Mecânica e Flamabilidade”, **Anais do 23º CBECIMAT 2018-** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu- PR.

FROTA, L. E. M. **“Avaliação do uso de diferentes fontes de bauxita no processo de produção de óxido de alumínio”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Campina Grande- PB, 49p, 2012.

FINKLER, M. *et al.* “Compósitos de HDPE com Resíduos de Fibras Têxteis. Parte I: Caracterização Mecânica”. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. vol. 15, n. 3, p. 171-175, 2005. Disponível em: < <https://www.redalyc.org/pdf/470/47015305.pdf>>.

FONSECA, M. H. F. *et al.* (2016) “Análise das propriedades mecânicas de um compósito natural desenvolvido com fibra de carnaúba”, **Anais do 22º CBECIMAT 2016-** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal-RN. Disponível em: < <http://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/205-028.pdf>>.

GUIMARÃES, I. O. **“Desenvolvimento de membranas cerâmicas tubulares obtidas a partir de um resíduo da produção de alumina”**. Universidade Federal de Campina Grande, (Tese de doutorado), 2014. Disponível em: < <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/344?mode=full>>.

HERTER, F. F. **Desempenho de Compósitos Tri-Componentes Epóxi/Fibra de Vidro/Hidróxidos Duplos Lamelares**. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010. Disponível em: < <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/25806>>.

HIND, A. R; BHARGAVA, S.K; GROCOTT, S.C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.146, p. 359-374, 1999. Disponível em: < <https://paratechglobal.com/wp-content/uploads/2020/01/The-surface-chemistry-of-Bayer-process-s.pdf>>.

HOLLAWAY, L. C. “The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure.” **Construction and Building Materials**, 17, 365-378, 2003. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061803000382>>.

HOLLER, F. J.; SKOOG, D.A.; CROUCH, S. R. **Princípios de análise instrumental**. 6. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 1055 p.

JB COMÉRCIO E INDÚSTRIA, 2020. **Produtos**. Disponível em: < <https://www.jbjateamento.com.br/abrasivos/> >. Acesso em: 21, janeiro de 2020.

KELLER, T. “Recent all-composite and hybrid fibre reinforced polymer bridges and buildings”, **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 3, n. 2, p. 132-140, 2002. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/37449886_Recent_All-Composite_and_Hybrid_Fibre-Reinforced_Polymer_Bridges_and_Buildings>.

KUMAR, A. *et al.* “**The Atomic-Level Structure of Cementitious Calcium Silicate Hydrate –Supporting Information**”, p. 1-40, 2017.

LABORATÓRIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X E MICROSCOPIA. **Universidade de Caxias do sul**. Bom Princípio – Rio Grande do Sul, 2020. Disponível em: < <https://www.ucs.br/site/imc/o-instituto/infraestrutura/laboratorio-de-difracao-de-raios-x-e-microscopia/> >. Acesso em: 28 de setembro, 2020.

LAOUTID *et al.* 2008. “New prospects in flame retardant polymer materials – from fundamentals to nanocomposites”. **Materials Science and Engineering R**. vol. 63, p. 100-125, 2008. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/222396793_New_Prospects_in_Flame_Retardant_Polymer_Materials_From_Fundamentals_to_Nanocomposites>.

LEVY NETO F.; PARDINI L. C., **Compósitos estruturais Ciência e tecnologia**, Edgard Blücher: São Paulo, 2006. Disponível em: < <https://www.blucher.com.br/livro/detalhes/compositos-estruturais-220>>.

LI, Y.; ZHOU, S.; CHEN, Y.; ZOU, H.; LIANG, M.; LOU, W. “Effect of Expandable Graphite Particle Size on the Flame Retardant, Mechanical, and Thermal Properties of Water-Blown Semi-Rigid Polyurethane Foam”. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 131, 2014. Disponível em: < <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.39885>>.

LIONETTO, F., RIZZO, R., LUPRANO, V. A. M. et al, “**Phase Transformation during the Cure of Unsaturated Polyester Resins**”. *Materials Science & Engineering A*, v.370, pp. 284-287, 2004.

LORANDI, N. P. *et al.* “**Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos**”. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. vol. 4, n. 13, p. 48-60, 2016.

MAHAPATRA, S. S.; DATTA, S. A. “Grey-based Taguchi method for wear assessment of red mud filled polyester composites”. *Internacional Journal of Modeling and Optimization*, vol. 1, n. 1, p. 80-88, 2011. Disponível em: < <http://www.ijmo.org/show-7-209-1.html>>.

MÁRTIRES, R. A. C. “**Alumínio cap. 03- Sumário Mineral**”, Brasília, vol. 23, 2003. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2003>>.

HITACHI. **Medical Expo**, 2020. Disponível em: < <https://www.medicalexpo.com/pt/prod/hitachi-high-technologies/product-80782712244.html>>. Acesso em: 15/07/2020.

MELO, K. M. *et al.* “**Study of the reuse potential of the sisal fibers powder as a particulate material in polymer composites**”. p. 4019-4025, 2019.

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**”, Belém - PA, 80p. (dissertação de mestrado), 2019.

MIRJALILI, F., CHUAH, L., SALAH, E., “Mechanical and morphological properties of polypropylene/nano alpha-Al₂O₃ composites”, *The Scientific World Journal*, v. 2014, pp. 1-12, Feb. 2014.

MOHANTY, A. K.; Misra, M.; Drzal, L. T. “Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites”. [s.l.]: **CRC Press**. 2005. Disponível em: < <https://www.routledge.com/Natural-Fibers-Biopolymers-and-Biocomposites/Mohanty-Misra-Drzal/p/book/9780849317415>>.

MOHMAD, M. *et al.* “Physical-mechanical properties of palm kernel activated carbon reinforced polymeric composite: Potential as a self-lubricating material”. *Malaysia*, vol. 17, p. 77-92, 2018. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/326008724_Physical-mechanical_properties_of_palm_kernel_activated_carbon_reinforced_polymeric_composite_Potential_as_a_self-lubricating_material>.

MOURA, M.F.S.F.; MORAIS, A.B.; MAGALHÃES, A.G. “Materiais compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico”. **Publindústria**, 2011.

MOURISCO, A. J. “**Preparação e caracterização de compósito de matriz de alumínio 1100 com partículas de sic por metalurgia do pó**”, São Paulo. (dissertação de mestrado), 1995. Disponível em: < http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Aroldo%20Jose%20Mourisco_M.pdf>.

MULINARI, D. R. **“Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar”**. Universidade Estadual Paulista. (Tese de doutorado), 2009. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/106312>>.

NOGUEIRA, Clara Leal. **Obtenção e caracterização de compósitos termoplásticos avançados à base de matrizes de poli(propileno) reforçadas com fibra de carbono**, 2004. 227f. Tese (Doutorado em Ciências). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/ITA_1bbb73e7f255fb61667ef432d19ae59b>.

OLIVEIRA, L. B. **“Produção e caracterização de compósito de matriz geopolimérica com adição de um resíduo industrial”**. Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM. (dissertação de mestrado), 2019. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/7706/5/Disserta%20a7%20a3o_LuanaOliveira_PP_GEC.pdf>.

PANZERA, T. H. *et al.* **“Propriedades mecânicas de materiais compósitos à base de cimento portland e resina epóxi”** Cerâmica 96, p. 77-82, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/ce/v56n337/v56n337a13.pdf>>.

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

PAULA, P. G. **Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Campos dos Goytacazes- RJ, 2011. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenhariademateriais/wpcontent/uploads/sites/2/2013/07/DIS_SERTA%2087%2083OIMPRIMIR.p>.

PIMENTEL, V. R.; **“Compósitos poliméricos de resíduos industriais e fibras vegetais: caracterização mecânica segundo a norma asmt6110-10”**, Belém - PA, 2015.

QUARESMA, D. da S.; PEREIRA, A. P. S.; SANTOS, D. H. dos.; MULLER, E. de A.; LOUREIRO, G. E.; SOUZA, J. A. da S. **Produção de agregados sintéticos a partir do rejeito do processo bayer e da cinza de caldeira**. 2013. In: 57º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2013. Disponível em: <https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/57/PDF/13-036.pdf>.

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. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3472>>.

RAY, S.S., OKAMOTO M., “Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing”, **Progress in Polymer Science**, v. 28, n. 11, pp. 1539-1641, nov. 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228712833_PolymerLayered_Silicate_Nanocomposites_A_Review_from_Preparation_to_Processing>.

RIBEIRO, L. M. *et al.* “Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (palf)”. **Holos**. vol. 1, p. 115-126, 2013. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/4815/481548602009.pdf>>.

ROCHA, I. G. **Influência do Retartante de Chamas nas Propriedades Mecânicas e Flamabilidade em Compósitos Poliméricos de Epóxi/Fibra de Curauá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/20602>>.

SALINAS, J. G. P. “**Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en Guardachoques para Buses**”. Dissertação (Mestrado em Design Mecânico), Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ambato, Ecuador, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/2609>>.

SALOMÃO, R. *et al.* “Aditivos de secagem para concretos refratários: pó de alumínio e fibras poliméricas”. **Cerâmica**, p. 259-267, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/250982405_Aditivos_de_secagem_para_concretos_refratarios_po_de_aluminio_e_fibras_polimericas>.

SANCHEZ, E. M.; CAVANI, C. S.; SANCHEZ, C. G. “Compósitos de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-se-açúcar: Influência do tratamento das fibras nas propriedades”. **Polímeros**, v. 20, p. 194-200, 2010.

SANTOS, E. A. “**Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de matriz de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais**”. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, (Dissertação de mestrado), 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15731>>.

SILVA, A. S. *et al.* “Incorporação de resíduos de borracha em compósitos de matriz polimérica termorrígida”. **Revista Matéria**, v. 17, n. 4, p. 1158-1165, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/p43LChSwn6TqfGWHYx8WL6m/?lang=pt&format=pdf>>.

SILVA, M. C. *et al.* “Síntese do óxido de alumínio pelo método dos precursores poliméricos (Pechini) na relação 4:1 de ácido cítrico:cátion metálico: efeito da temperatura de calcinação”. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 9, n. 3, p. 130-136, 2014.

SOARES JÚNIOR, A. B. “**Produção do poli(tereftalato de etileno) modificado com glicerol e derivados**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/AldoBatistaSoaresJunior.pdf>.

SOLOMONS, T. W. G.; FRYHLE, C. B. **Organic chemistry**. 9a ed. Wiley, 2008.

SOUZA, L. T. “**Avaliação da resistência em flexão de compósitos dentários sob a influência de diferentes meios de armazenamento.**” Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2005.

SOUZA, M. A. *et al.* “Nanocompósitos de Poli(Cloreto de Vinila) (PVC)/Argilas Organofílicas”. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. vol. 16, n. 4, p. 257-262, 2006. Disponível em: < <https://redalyc.org/pdf/470/47016402.pdf>>.

USGS (Science for a changing world), **National Minerals Information Center**. USA, 2020. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/bauxite-and-alumina-statistics-and-information?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con>. Acesso em: 25 de novembro de 2020.

VENTURA, A. M. F. M. “Os Compósitos e a sua Aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas”. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. vol. 21, n. 3/4, p. 10-19, 2009. Disponível em: <https://www.academia.edu/36770951/Os_Comp%C3%B3sitOs_e_a_sua_apliCa%C3%A7%C3%A3O_na_Reabilita%C3%A7%C3%A3O_de_estRutuRas_met%C3%A1lIcas>.

VIEIRA, J. H. A. **Resíduo de pneu como matriz de compósito reforçado com pó de marmoraria, lama e escória de alto-forno**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá-PA, 2016. Disponível em: < <https://docplayer.com.br/206453852-Universidade-federal-do-sul-e-sudeste-do-para-instituto-de-geociencias-e-engenharias-faculdade-de-engenharia-de-materiais.html>>.

ZAMMARANO, M.; FRANCESCHI, M.; BELLAYER, S.; GILMAN, J.W.; MERANI, S. **POLYMER**, 2005, 46, 9314.

ZAMRI, M.H; AKIL, H.M; BAKAR, A.A; et al. “Effect of water absorption on pultruded jute/glass fiber-reinforced unsaturated polyester hybrid composites”. **J Compos Mater** 2012; 46: 51–61. Disponível em: < <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998311410488>>.