



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

ANA PAULA SOUZA DE SOUSA

**INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE CAULIM E COBRE
NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICA DE IMPACTO E FLAMABILIDADE
DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER ISOFTÁLICA**

Ananindeua, PA
2022

ANA PAULA SOUZA DE SOUSA

**INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE CAULIM E COBRE
NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICA DE IMPACTO E FLAMABILIDADE
DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER ISOFTÁLICA**

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

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro José Gomes dos Santos

Ananindeua, PA
2022

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

S725i Sousa, Ana Paula Souza de.
Influência dos resíduos do beneficiamento de caulim e cobre
nas propriedades físicas, mecânica de impacto e flamabilidade
dos compósitos de matriz poliéster isoftálica /Ana Paula Souza
de Sousa. — 2022.
66 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Prof. Dr. Alessandro José Gomes dos
Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de
Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua,
2022.

1. Matriz Polimérica. 2. Resíduos Industriais. 3.
Resina Poliéster. I. Título.

CDD 620.11

ANA PAULA SOUZA DE SOUSA

**INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE CAULIM E COBRE
NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICA DE IMPACTO E FLAMABILIDADE
DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER ISOFTÁLICA**

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


Data da defesa: 27/06/2022

CONCEITO: Excecente

BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dr. Alessandro José Gomes dos Santos
(FEI/CABAE/UFPA – Coorientador)



Prof. Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula
(FEMat/CAMPANANIN/UFPA – Examinador Interno)



Dr. Eng. Dilson Nazareno Pereira Cardoso
(FEQ/ITEC/UFPA – Examinador Externo)

Ananindeua, PA
2022

Aos meus pais Manuel Francisco de Sousa e Rosilene Souza de Sousa por terem me ensinado o quão longe se pode chegar por meio da educação e por serem os melhores incentivadores que eu poderia ter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me permitido chegar até aqui, pela graça de conseguir concluir algo tão desejado por mim e, principalmente, por me permitir enxergá-lo em cada instante da minha graduação. Tudo é, definitivamente, sobre Ele.

Ao meu pai, Manuel Francisco de Sousa por seu infinito amor, carinho, apoio, encorajamento, por ser tão exigente quanto aos meus estudos, por acreditar que eu conseguiria realizar sonhos quando nem eu mesmo acreditei e por me ensinar a permanecer firme diante das situações difíceis.

Agradeço a minha mãe por todo amor, apoio, zelo, pelo tempo dedicado a mim, por ser tão amiga e por tornar os meus dias muito mais leves e alegres. Sem ela eu jamais teria chegado até aqui.

Aos meus avós e tios que sempre torceram por mim e cuidaram de mim como filha. Em especial ao meu padrinho Benedito Claudomiro, o qual tenho grande admiração pela sabedoria, inteligência, integridade e mesmo que não esteja mais comigo, está em meu coração e pensamentos a todo momento.

Ao Pedro Rocha por, além de namorado, ser meu melhor amigo. Agradeço por todo apoio, por ser tão parceiro, e por estar ao meu lado nos dias bons e ruins da graduação e da vida.

Aos meus primos pela amizade e apoio. Em especial a Aryanne Souza, por praticamente viver a graduação junto comigo e por ser a melhor amiga que eu poderia ter. Ao primo, João Paulo Coutinho por ser o único a entender e discutir comigo os dilemas da engenharia. Aos meus amigos Thales Arraes, Wanuzza Barbosa, Wilson Souza, Juliana Araújo e Beatriz Nobre pela amizade, por fazerem parte da minha jornada acadêmica e por tornarem a graduação muito mais leve e divertida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Deibson Silva da Costa por ter me permitido fazer parte do seu grupo de pesquisa desde o início, pela dedicação, por todos os ensinamentos, paciência e conselhos.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Alessandro José Gomes dos Santos por aceitar me orientar neste trabalho, pelos ensinamentos, paciência e disponibilidade.

A Universidade Federal do Pará, ao Laboratório de Engenharia Química (LEQ) e Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS) pela disponibilidade e apoio.

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda”

Paulo Freire

RESUMO

As atividades industriais no mundo geram diferentes tipos de resíduos com diferentes propriedades químicas e físicas, o que causa uma preocupação com a produção em massa desses materiais. Dessa forma, tem-se um grande interesse na reutilização de resíduos industriais em materiais compósitos devido ao bom desempenho que essa combinação apresenta. Nesse sentido, esse trabalho tem o objetivo de analisar a influência dos resíduos industriais de caulim e cobre sulfetado como carga em compósitos de matriz poliéster a partir da análise de caracterizações físicas, mecânica e de flamabilidade. Para a confecção dos materiais, utilizou-se o método de fabricação manual *hand lay-up* no qual foi empregada a resina poliéster insaturada isoftálica com a utilização de acelerador na proporção de 1,5 % v/v e iniciador na proporção de 1 % v/v. Para os ensaios físicos e de flamabilidade, o resíduo de cobre foi inserido na matriz nas frações mássicas de 10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 % e o de caulim nas frações de 10 %, 20 %, 30 % e 40 %, já para o ensaio de impacto os resíduos foram inseridos nas frações de 10 % e 20 %, nos quais foi utilizada uma peneira de 100 mesh da série Tyler. Após a confecção dos materiais, realizou-se os ensaios físicos (ASTM D 1984-92), resistência ao impacto (ASTM D 6110-18), análise da superfície de fratura por meio de microscopia eletrônica de varredura e flamabilidade horizontal (ASTM D 635-18). Nos resultados obtidos para absorção de água e porosidade aparente, todos os compósitos apresentaram valores menores que os da matriz plena, destacando-se os materiais com 40 % de resíduo de caulim e 30 % de resíduo de cobre. Para os ensaios de impacto os resultados se mantiveram estáveis, pois todos os materiais apresentaram valores de resistência próximos da matriz plena (19,38 kJ/m²), destacando-se os compósitos com 20 % de resíduo de caulim (21,20 kJ/m²) e 10 % de resíduo de cobre (21,20 kJ/m²). Na análise das superfícies de fratura, notou-se a presença de mecanismos de falha como vazios, bolhas e aglomerados e os materiais apresentaram boa dispersão dos resíduos na matriz. Já no ensaio de flamabilidade, todos os materiais tiveram resultados satisfatórios visto que apresentaram taxas de propagação menores que o exigido pela norma e pelo CONTRAN-14 (Conselho Nacional de Trânsito), destacando-se os compósitos com 10 % de caulim e cobre que apresentaram redução de 85,49 %.

Palavras-chave: Matriz Polimérica. Resíduos Industriais. Resina Poliéster.

ABSTRACT

Industrial activities in the world generate different types of waste with different chemical and physical properties, which causes a concern with the mass production of these materials. Thus, there is a great interest in the reuse of industrial waste in composite materials due to the good performance that this combination presents. In this sense, this work aims to analyze the influence of kaolin and copper sulphide industrial waste as filler in polyester matrix composites from the analysis of physical, mechanical and flammability characterizations. For the manufacture of the materials, the manual hand lay-up method was used, in which the isophthalic unsaturated polyester resin was used with the use of an accelerator in the proportion of 1,5 % v/v and initiator in the proportion of 1 % v/v. For the physical and flammability tests, the copper residue was inserted into the matrix in the mass fractions of 10 %, 20 %, 30 %, 40 % and 50 % and the kaolin residue in the fractions of 10 %, 20 %, 30 % and 40 %, while for the impact test the residues were inserted in the fractions of 10 % and 20 %, in which a 100 mesh Tyler series sieve was used. After making the materials, physical tests were carried out (ASTM D 1984-92), impact resistance (ASTM D 6110-18), analysis of the fracture surface by means of scanning electron microscopy and horizontal flammability (ASTM D 635-18). In the results obtained for water absorption and apparent porosity, all composites showed lower values than those of the full matrix, highlighting the materials with 40 % kaolin residue and 30 % copper residue. For the impact tests, the results remained stable, as all materials showed strength values close to the full matrix (19,38 kJ/m²), especially the composites with 20 % kaolin residue (21,20 kJ/m²) and 10 % copper residue (21,20 kJ/m²). In the analysis of fracture surfaces, it was noted the presence of failure mechanisms such as voids, bubbles and agglomerates and the materials showed good dispersion of residues in the matrix. In the flammability test, all materials had satisfactory results since they showed lower propagation rates than required by the standard and by CONTRAN-14 (National Traffic Council), especially the composites with 10 % kaolin and copper that showed reduction of 85,49 %.

Keywords: Polymer Matrix. Industrial Waste. Polyester resin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Classificação dos materiais compósitos quanto ao reforço	19
Figura 2.2 – Classificação dos polímeros quanto ao comportamento térmico e mecânico.....	20
Figura 2.3 – Estrutura molecular de poliéster isoftálica.....	23
Figura 2.4 – Área das minas de extração de caulim em Ipixuna do Pará	27
Figura 2.5 – Minério de cobre da área de extração da Mina do Sossego	29
Figura 2.6 – Ensaio de flamabilidade horizontal.....	33
Figura 2.7 – Micrografia de superfície do compósito de matriz polimérica com resíduo de madeira (a) aumento de 500x e (b) seção transversal com aumento de 50x.....	34
Figura 3.1 – Equipamentos: (a) Moinho de bolas; (b) estufa; (c) molde metálico; (d) balança analítica; (e) balança de precisão; (f) peneira; (g) prensa hidráulica; (h) serra de bancada; (i) Molde de silicone.....	35
Figura 3.2 – (a) Resina poliéster; (b) Iniciador MEK-P; (c) Acelerador de Cobalto ...	36
Figura 3.3 – (a) Resíduo de caulim; (b) Resíduo de cobre sulfetado	37
Figura 3.4 – Fluxograma da fabricação e caracterização dos compósitos.....	39
Figura 3.5 – Aparato utilizado para obtenção da massa imersa.....	40
Figura 3.6 – Equipamento utilizado para o ensaio de impacto	41
Figura 3.7 – Equipamento para Microscopia Eletrônica de Varredura	41
Figura 3.8 – Aparato metálico utilizado nos testes de flamabilidade	42
Figura 3.9 – Esquema representativo do ensaio	43
Figura 4.1 – Gráfico de AA e PA em função da fração mássica de resíduo de caulim..	45
Figura 4.2 – Gráfico da MEA em função da incorporação de resíduo de caulim	46
Figura 4.3 – Gráfico de AA e PA em função da fração mássica de resíduo de cobre sulfetado.....	48
Figura 4.4 – Gráfico da MEA em função da incorporação de resíduo de cobre sulfetado.....	49

Figura 4.5 – Gráfico da resistência ao impacto em função da fração mássica de resíduo de caulim	50
Figura 4.6 – Gráfico da resistência ao impacto em função da fração mássica de resíduo de cobre sulfetado.....	52
Figura 4.7 – MEV dos compósitos com resíduo de caulim: (a) 10 %, (b) 10 %, (c) 20 % e (d) 20 %.....	53
Figura 4.8 – MEV dos compósitos com resíduo de cobre sulfetado: (a) 10 %, (b) 10 %, (c) 20 %, (d) 20 % e (e) 20 %.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos resíduos sólidos.....	25
Tabela 2.2 – Principais minerais de cobre	29
Tabela 4.1 – Resultados dos testes de AA, PA e MEA dos compósitos de acordo com a inserção de resíduo de caulim.....	44
Tabela 4.2 – Resultados dos testes de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente dos compósitos de acordo com a inserção de resíduo de cobre sulfetado.....	47
Tabela 4.3 – Dados obtidos no ensaio de impacto da matriz plena e dos compósitos com resíduo de caulim.	49
Tabela 4.4 – Dados obtidos no ensaio de impacto da matriz plena e dos compósitos com resíduo de cobre sulfetado.	51
Tabela 4.5 – Dados obtidos no ensaio de resistência a chama da matriz plena e dos compósitos com resíduos de cobre sulfetado e caulim.	57
Tabela 4.6 – Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho com as normas exigidas e com trabalhos semelhantes encontrados na literatura.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
ASTM	American Society for Testing and Materials
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
Cu	Cobre
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
HB	Horizontal Burning
IFPA	Instituto Federal do Pará
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IRCC	Imerys Rio Capim Caulim
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
MEA	Massa Específica Aparente
MEK-P	Peróxido de Metil Etil Cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
M_i	Massa imersa
M_s	Massa seca
M_u	Massa úmida
MP	Matriz Plena
ρ	Massa específica
RCA-10	10 % Resíduo de Caulim
RCA-20	20 % Resíduo de Caulim
RCA-30	30 % Resíduo de Caulim
RCA-40	40 % Resíduo de Caulim
RCU-10	10 % Resíduo de Cobre
RCU-20	20 % Resíduo de Cobre
RCU-30	30 % Resíduo de Cobre
RCU-40	40 % Resíduo de Cobre
RCU-50	50 % Resíduo de Cobre
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 Estrutura do trabalho.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Materiais Compósitos.....	18
2.1.1 Compósitos de matriz polimérica	19
2.1.2 Matrizes poliméricas.....	21
2.1.2.1 Resina poliéster.....	22
2.2 Compósitos reforçados com particulados.....	24
2.3 Resíduos industriais.....	24
2.3.1 Resíduo de caulim.....	26
2.3.2 Resíduo de cobre	28
2.4 Caracterização dos compósitos.....	30
2.4.1 Ensaio físicos	30
2.4.2 Ensaio de impacto.....	31
2.4.3 Flamabilidade	32
2.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	33
3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	35
3.1 Equipamentos utilizados.....	35
3.2 Materiais.....	36
3.2.1 Matriz polimérica	36
3.2.2 Resíduos industriais de caulim e cobre.....	37
3.3 Procedimentos experimentais.....	37

3.3.1	Confecção dos materiais compósitos	37
3.4	Caracterização dos materiais fabricados	39
3.4.1	Ensaio físico	39
3.4.2	Ensaio de impacto	40
3.4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	41
3.4.4	Ensaio de Flamabilidade	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Ensaio físico	44
4.2	Ensaio de impacto	49
4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	52
4.3.1	Análise da superfície de fratura dos compósitos com resíduo de caulim	52
4.3.2	Análise da superfície de fratura dos compósitos com resíduo de cobre sulfetado	54
4.4	Ensaio de flamabilidade	56
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	60
5.1	Conclusões	60
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o cenário global acerca das questões ambientais, tem sido bastante discutida a importância da produção de materiais biodegradáveis e sustentáveis, visto que há uma grande preocupação com o meio ambiente envolvendo a produção de materiais com relação a degradação e principalmente ao descarte, acúmulo e impactos de resíduos industriais. Devido a isso, o desenvolvimento e processamento de materiais compósitos reforçados com resíduos industriais vem crescendo gradativamente devido a busca por promover um reaproveitamento desses resíduos e por práticas sustentáveis (CAMPOS; OLIVEIRA; SOUSA, 2016).

Dessa forma, os materiais compósitos surgiram por meio da exigência e busca industrial por fabricação de materiais que possibilitam, em uma mistura de materiais diferentes, propriedades mais satisfatórias quando comparadas à de materiais unicamente poliméricos, metálicos ou cerâmicos. Nesse sentido, os compósitos são materiais de duas ou mais fases que manifestam propriedades mecânicas e/ou físicas bastante significativas quando comparadas às propriedades de cada fase constituinte. Somado a isso, os materiais compósitos apresentam a fase matriz, a qual pode ser constituída por um material cerâmico, metálico ou polimérico e a fase dispersa ou reforço, nas quais estão as fibras e partículas (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

As propriedades dos compósitos estão diretamente relacionadas com suas fases constituintes, o que vai depender da quantidade relativa de cada uma e da geometria da fase dispersa. Nesse caso, a geometria envolve a forma, tamanho, distribuição e orientação das fibras e/ou partículas (MARINUCCI, 2011). Ademais, podem ser classificados de acordo com o tipo de reforço em compósitos reforçados com fibras, compósitos reforçados com partículas, compósitos estruturais e nanocompósitos (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). Logo, nota-se que os materiais compósitos reúnem uma série de opções que os tornam interessantes e são disseminados por diversos setores de atividades industriais que apresentam grandes exigências e visibilidade tecnológica (MAGALHÃES; MORAIS; MOURA, 2010).

Diante desse contexto, este estudo apresenta a análise de caracterizações físicas, mecânicas e de flamaabilidade de compósitos de matriz poliéster com a adição dos resíduos de caulim e cobre sulfetado visando o reaproveitamento dos mesmos e, conseqüentemente, a redução dos impactos ambientais.

1.1 Justificativa

Segundo o IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) (2012), as taxas de crescimento econômico do Brasil subiram consideravelmente com relação ao aumento de consumo, o qual tange a demanda de extração de matéria-prima, seu processamento, produção, distribuição, geração de resíduo, tratamento e disposição final. Isso provoca o aumento dos impactos ambientais e aumento da geração de resíduos industriais. Desse modo, segundo Beltrão *et al.* (2014), as atividades industriais geram variados tipos de resíduos com características diferentes, o que causa grande preocupação acerca do alto volume de produção desses materiais, principalmente quando o despejo é inadequado. Esse fator, instiga a busca por soluções que promova a minimização dos danos ao meio ambiente e a diminuição da quantidade desses resíduos despejados.

Visando essa temática e, de acordo com o volume de resíduos industriais produzidos, tem-se a necessidade de viabilizar o reaproveitamento dos mesmos por meio do desenvolvimento e processamento de novos materiais. Diante disso, os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com resíduos industriais, se tornaram uma excelente alternativa para o reaproveitamento de resíduo e, principalmente pela performance que esses compósitos apresentam com relação a suas propriedades (DUBEY; MISHRA; SHARMA, 2021).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência dos resíduos industriais de beneficiamento do caulim e do cobre sulfetado como carga em compósitos de matriz poliéster isoftálica por meio das caracterizações físicas, mecânica e de flamabilidade.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os efeitos da adição dos resíduos de caulim e de cobre sulfetado nas propriedades físicas por meio da absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente dos compósitos produzidos.

- Analisar a influência dos resíduos na resistência ao impacto dos materiais compósitos produzidos.
- Analisar as superfícies de fratura dos compósitos após o ensaio de impacto por intermédio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
- Avaliar a influência dos resíduos nas propriedades de flamabilidade dos compósitos visando o retardo de chama.

1.3 Estrutura do trabalho

Na primeira seção é apresentada uma breve introdução acerca do assunto abordado com ênfase na utilização dos resíduos industriais em materiais compósitos, tem-se a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos gerais e específicos deste estudo.

Posteriormente, na segunda seção consta uma revisão bibliográfica acerca do tema estudado, na qual se apresentam conceitos e classificações dos compósitos, as características físicas e químicas dos resíduos e da resina utilizados de acordo com os dados encontrados na literatura.

A terceira seção aborda os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova fabricados e os instrumentos necessários para tal fabricação com a exibição de imagens de cada item. Além disso, apresenta o método de confecção dos compósitos com a exposição de fluxogramas e os procedimentos experimentais de cada ensaio de acordo com as normas utilizadas.

Posteriormente, a quarta seção trata dos resultados obtidos para os corpos de prova por meio dos ensaios físicos, mecânico e de flamabilidade com a exposição de tabelas, gráficos e discussões sobre cada um dos termos.

Por fim, a quinta seção aborda, de forma objetiva, a conclusão do estudo apresentando uma relação entre os principais resultados e os objetivos apontados no início do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos

Os compósitos são materiais utilizados há muito mais tempo de se tornar uma classe distinta dos cerâmicos, polímeros e metais visto que as combinações de diferentes materiais é uma prática antiga, a exemplo de tijolos de argila reforçados com palha. A partir desse contexto, o advento dos compósitos possibilitou uma enorme variedade de combinações entre os materiais, as quais fornecem excelentes resultados em processamento, estrutura, propriedades e desempenho desses produtos (MAGALHÃES; MOURA; MORAIS, 2010).

Dessa forma, um material compósito pode ser entendido como um sistema multifásico, no qual cada fase fornece a proporção ideal de características para a melhor combinação possível de propriedades, obtendo-se um material com características físicas e/ou mecânicas superiores às de cada fase constituinte (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

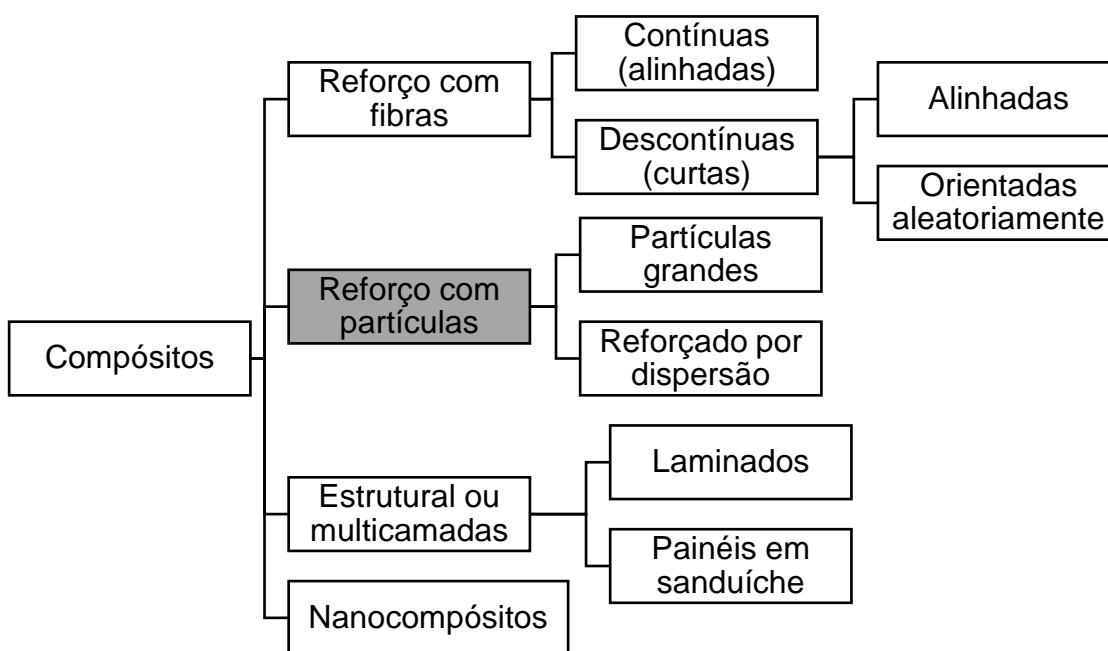
Ademais, os compósitos são constituídos por uma fase matriz e fase reforço. A matriz é contínua, envolve o reforço e pode ser um material metálico, cerâmico ou polimérico. Além disso, apresenta a função de distribuir a carga de modo uniforme e transferi-la para a fase reforço sendo necessário, para isso, um material de matriz com boas propriedades de adesão, visto que algumas propriedades do material compósito vai depender das características da matriz (WANG; ZHENG; ZHENG, 2011).

Já a fase dispersa (fase reforço) é classificada como reforço com partículas ou com fibras. As partículas são classificadas em partículas grandes ou por dispersão e as fibras podem ser contínuas ou descontínuas. Assim, o reforço fornece características ao material de acordo com sua geometria, ou seja, de acordo com sua forma, tamanho, distribuição e orientação. Dessa maneira, nos compósitos reforçados com partículas, tem-se as dimensões iguais dos particulados em todas as direções e nos compósitos reforçados com fibras a fase dispersa apresenta dimensões que envolvem uma relação entre comprimento e diâmetro (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Seguindo a classificação dos materiais compósitos mostrada na Figura 2.1, tem-se ainda os compósitos estruturais e os nanocompósitos. Os estruturais ou em multicamadas, tem como característica baixa massa específica e são destinados às aplicações de alto desempenho mecânico e, devido a isso, as propriedades desses

compósitos vão depender também da geometria das camadas sendo essa classe subdividida em compósitos laminados e compósitos painéis-sanduíche (ASKELAND; WRIGHT, 2014). Os nanocompósitos são reforçados com partículas de tamanho nanométrico, o que fornece propriedades superiores às dos compósitos com reforços convencionais, além de apresentar a possibilidade de manipulação dessas propriedades para um desempenho específico (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Figura 2.1 – Classificação dos materiais compósitos quanto ao reforço



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch, 2020.

2.1.1 Compósitos de matriz polimérica

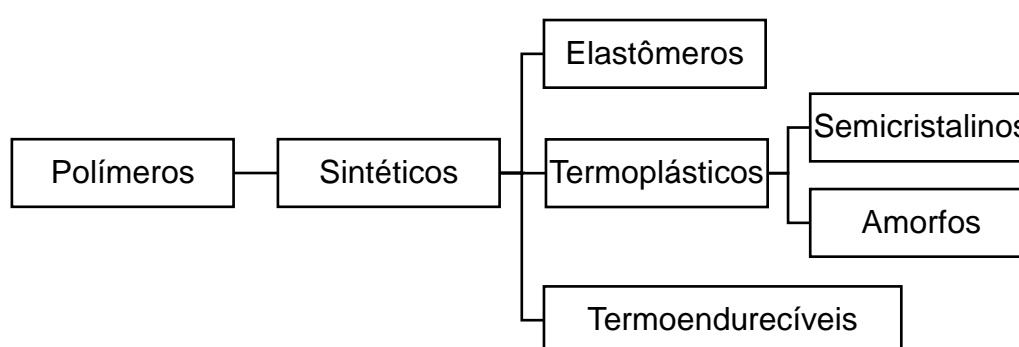
A matriz de um material compósito é uma das fases constituintes de grande importância para as propriedades do material, pois ela está sujeita a mudanças físicas e químicas durante o seu processamento com relação a forma e principalmente adesão entre a matriz e o reforço. Desse modo, a matriz, além de influenciar diretamente nas propriedades dos compósitos, vai determinar os parâmetros e processos que são adotados para a formação do material. Além disso, sabe-se que as propriedades mecânicas está, em sua grande parte, ligada ao reforço utilizado no compósito, entretanto o tipo de matriz é responsável por afetar propriedades como a

resistência ao calor, cisalhamento, compressão e outros (WANG; ZHENG; ZHENG, 2011).

Para compósitos de matriz polimérica, tem-se que os polímeros são macromoléculas formadas por várias unidades de repetição chamadas mero, as quais são unidas por ligações covalentes por meio do processo de polimerização, no qual os monômeros formam as cadeias através de reações químicas. Os polímeros apresentam alguns tipos de classificação, dentre elas tem-se plásticos, borrachas e fibras. Esta classificação se dá de acordo com o tipo de monômero, o tipo de ligação covalente e número médio de meros por cadeia (CANEVAROLO, 2006).

Os polímeros sintéticos podem ser classificados quanto a característica mecânica e comportamento térmico, o que envolve os tipos de estrutura molecular das cadeias (lineares, ramificados, com ligações cruzadas e em rede) sendo tal classificação mostrada no esquema da Figura 2.2 (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Figura 2.2 – Classificação dos polímeros quanto ao comportamento térmico e mecânico



Fonte: Adaptado de Cavaleiro, 2018.

Os termoplásticos apresentam fluidez quando aquecidos e, de acordo com a temperatura, podem se liquefazer e solidificar quando resfriados. Isso torna o processo de aquecimento reversível e permite que essa classe de polímeros possa ser conformado, remoldado e reciclado (HASHEMI; SMITH, 2012). Por outro lado, os termoendurecíveis são polímeros em rede ou com cadeias de ligações cruzadas, o que os tornam permanentemente rígidos, impedindo-os de apresentar fluidez quando aquecidos, ou seja, os termoendurecíveis não são remoldados e/ou reciclados (ASKELAND; WRIGHT, 2014; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

A partir desse contexto, os materiais poliméricos são utilizados como matriz em compósitos na forma de resinas devido às propriedades de interesse que elas

forneem como baixa densidade, facilidade de fabricação, baixo custo, boas propriedades em temperatura ambiente e outros (CAVALEIRO, 2018). Com essas propriedades e outras que variam de acordo com o tipo de resina e reforço, os compósitos de matriz polimérica são bastante utilizados em setores de constante desenvolvimento como a indústria aeronáutica, aeroespacial, naval, esportiva, petroquímica, automotiva e outros (MAGALHÃES; MOURA; MORAIS, 2010).

2.1.2 Matrizes poliméricas

Os polímeros aplicados em matrizes de compósitos são utilizados como resinas, as quais apresentam características e propriedades intrínsecas de acordo com o tipo e, no geral, quando combinadas com fibras e/ou partículas exibem uma variada classe de compósitos com boa combinação de resistência e rigidez, alta resistência à fadiga e resistência química assim como já mencionado anteriormente. Somado a isso, as resinas podem ser termoplásticas ou termoendurecíveis, dentre as quais tem-se as epoxídicas e poliésteres que são as mais utilizadas em materiais compósitos (MOROZOV; VASILIEV, 2001).

As resinas termoplásticas, quando comparadas às termoendurecíveis, além de ser recicláveis, apresentam maior resistência ao impacto, menor higroscopicidade (capacidade de absorver água/umidade) e facilidade de fabricação por injeção, extrusão e termoformação. Por outro lado, as resinas termoendurecíveis apresentam maior facilidade de impregnação de fibras e são processadas por meio da mistura de resina, acelerador e iniciador, os quais causam a polimerização e o processo de cura do material. Esse processo ocorre em temperatura ambiente ou, para algumas resinas, faz-se necessária aplicação de calor e pressão (MAGALHÃES; MOURA; MORAIS, 2010).

Os materiais poliméricos apresentam temperaturas de transição que influenciam diretamente em seu comportamento termomecânico. Nesse caso, com relação às cadeias poliméricas, tem-se a mobilidade sendo uma característica ligada à agitação das moléculas, tornando-a proporcional à temperatura (CANEVAROLO, 2006). A partir desse contexto, um polímero parcialmente ou totalmente amorfo apresenta temperatura de transição vítrea que caracteriza a alteração de um comportamento rígido para o de amolecimento e, à medida que a temperatura aumenta, o mesmo se torna um líquido viscoso quando atinge a temperatura de fusão.

Portanto, as resinas termoendurecíveis não apresentam fusão, ou seja, após o estado de amolecimento elas degradam e, devido a isso, trabalha-se com o controle da temperatura de transição vítrea por meio do grau de reticulação da estrutura, o qual é consideravelmente menor que nos termoplásticos (MAGALHÃES; MOURA; MORAIS, 2010).

O estudo de Pereira *et al* (2021) apresenta uma análise na resistência à tração de compósitos reforçados com fibras da folha do buriti variando a matriz em resinas de poliéster isoftálica, poliéster ortoftálica e epóxi com o objetivo de determinar a melhor combinação entre fibra e matriz. Os compósitos com matriz epóxi apresentaram melhores resultados para produção de compósitos mais resistentes, maleáveis e leves visto que, de acordo com os ensaios realizados na matriz plena, esta apresentou melhor resistência à tração, menor tensão de escoamento, maior módulo de elasticidade e maior alongamento na ruptura. Já os compósitos com matriz poliéster isoftálica, apresentou alta aderência entre fibra e matriz, o que também gera boa combinação entre resistência e baixa densidade visto que para os resultados da matriz plena, essa resina apresentou maior tensão de escoamento com menor alongamento na ruptura, o que proporciona maior rigidez aos compósitos. A resina de poliéster ortoftálica apresentou valores inferiores às demais se tornando, dentre estas, a menos indicada para a produção de compósitos.

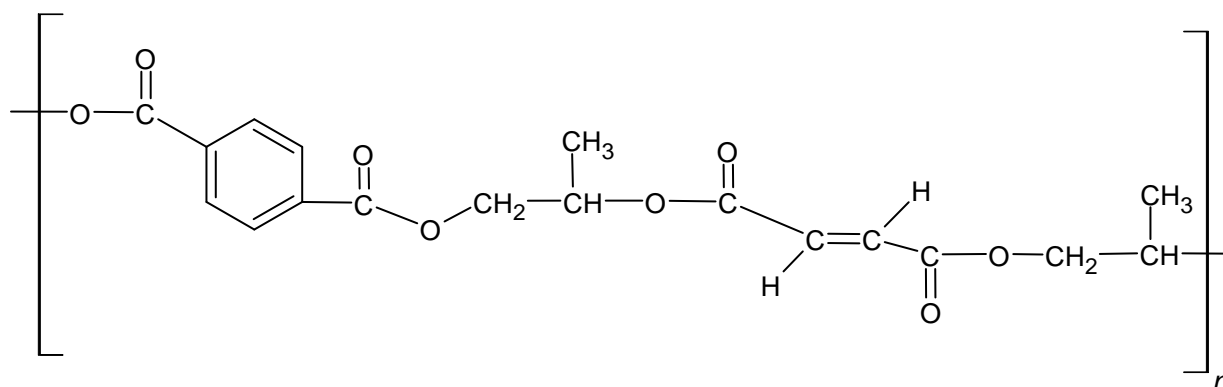
2.1.2.1 Resina poliéster

As resinas de poliéster são polímeros que apresentam uma vasta aplicação, na qual estão plásticos, fibras, revestimentos, compósitos e outros. Tais aplicações estão diretamente ligadas ao tipo de monômero, aditivo, iniciadores e agentes de cura que possibilitam variadas combinações de propriedades mecânicas e químicas ao material (CHIRAYIL; HOSUR; THOMAS, 2019) .

Segundo Magalhães, Moura e Morais (2010) resinas poliéster são encontradas na forma saturada e insaturada. A saturada é utilizada, geralmente, para fabricação de filmes, fibras, resinas termoplásticas e outros. Já a poliéster insaturada é a mais utilizada em matrizes de materiais compósitos devido apresentar boa relação entre as propriedades mecânicas, químicas e elétricas, além de permitir ser quimicamente modificada com reticuladores, apresentar baixo custo e fácil processamento.

Ademais, a resina poliéster insaturada é obtida a partir de uma reação de esterificação entre um ácido dicarboxílico (saturado ou insaturado) ou anidridos (os quais estão o anidrido ftálico, ácido isoftálico, anidrido maleico e/ou ácido fumárico) com álcoois bifuncionais sob uma faixa de temperatura entre 210 °C a 230 °C por policondensação resultando em cadeias poliméricas insaturadas e água (HASHEMI; SMITH, 2012; CHIRAYIL; HOSUR; THOMAS, 2019). O ácido ou o anidrido fornece, por meio do grupo insaturado do poliéster, reatividade para que ocorram as futuras ligações cruzadas. Já o álcool ou glicol favorece a esterificação e a ligação entre os ácidos para a polimerização. Esses elementos estão representados na Figura 2.3, a qual apresenta a cadeia poliéster isoftálica. Além disso, o monômero de estireno (monômero vinílico) é inserido para atuar como diluente do polímero formado para diminuir a viscosidade da resina e facilitar o processamento, além de atuar como copolímero promovendo copolimerização com os radicais livres do poliéster resultando em uma estrutura reticulada, tridimensional e rígida (MELO, 2013; CHIRAYIL, HOSUR, THOMAS, 2019).

Figura 2.3 – Estrutura molecular de poliéster isoftálica.



Fonte: Melo, 2013.

Para esta polimerização de radical livre, é inserido um iniciador que vai gerar radicais livres sob condições adversas e, assim, iniciar a polimerização por radicais livres por meio de sua dissociação. Para o processo de cura sob temperatura ambiente, torna-se necessária a utilização de um acelerador para ativar o iniciador e, assim, acelerar o processo de cura em temperatura ambiente. Somado a isso, o tipo de ácido e álcool vão alterar a estrutura e as propriedades das resinas, nesse caso, tem-se a poliéster isoftálica, ortoftálica, tereftálica e bisfenólica (CHIRAYIL; HOSUR; THOMAS, 2019).

2.2 Compósitos reforçados com particulados

Segundo Askeland e Wright (2016), os compósitos reforçados com partículas apresentam uma combinação de propriedades incomuns. Em sua grande maioria, a fase particulada apresenta maior rigidez e dureza que a fase matriz e, de acordo com o tamanho das partículas, tem-se um aumento na resistência a nível atômico (reforço por dispersão) e não atômico (reforço com partículas grandes). Além disso, Callister e Rethwisch (2020) citam que as partículas podem apresentar tamanhos variados, o que remete à classificação das mesmas em compósitos reforçados com partículas grandes e por dispersão, o que influencia no aumento de resistência mencionado anteriormente.

Diante desse contexto, nos compósitos com partículas grandes a interação do reforço com a matriz não se dá em nível atômico e, nesse caso, durante as solicitações mecânicas, parte da carga é transferida para o reforço, pois o mesmo limita o movimento da matriz na interseção de cada partícula. Já nos compósitos reforçados por dispersão, as partículas são consideravelmente menores com diâmetros que podem variar entre 10 a 100 nm e, diante disso, a interação entre reforço e matriz são tratadas a nível atômico, ou seja, durante as solicitações mecânicas, a carga é suportada pela matriz e as partículas dispersas impedem a movimentação das discordâncias, o que gera um aumento na resistência mecânica do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Diante disso, há um grande interesse na fabricação desses materiais devido a vasta combinação de propriedades que podem apresentar, já que as cargas podem melhorar ou até modificar as propriedades do compósito. Além disso, as partículas substituem parte do volume da matriz reduzindo, assim, o custo de fabricação do material, além de apresentar ainda a facilidade de processamento (ASKELAND; WRIGHT, 2016).

2.3 Resíduos industriais

Segundo o IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) (2012), os processos industriais produzem diversos resíduos diferentes, os quais apresentam composição segundo o processo industrial e características de acordo com o setor industrial como alimentício, petroquímico, metalúrgico, mineração e outros. Assim,

dentre os resíduos sólidos, a Tabela 2.1 apresenta uma classificação relacionando o tipo de resíduo, por onde é produzido e possíveis aplicações.

Tabela 2.1 – Classificação dos resíduos sólidos

Resíduo Sólido	Origem	Aplicação
Resíduos industriais	Escória de aço, resíduo de construção civil, resíduos da combustão de carvão, bauxita (lama vermelha), etc.	Tijolos, cimento, blocos, tintas, telhas, concreto, compósitos, etc.
Resíduos Agroindustriais	Talo de algodão, bagaço de arroz e palha de trigo, talo de banana, casca de noz, sisal e outros resíduos vegetais.	Papel de impressão, placas de isolamento, painel de parede, telhas, aglutinante de combustível, cimento, tijolos, compósito reforçado com fibras.
Resíduos de Mineração	Resíduos de mineração de sobrecarga de ferro, carvão, cobre, ouro, zinco, alumínio, etc.	Combustível agregado leve, telhas, tijolos, compósitos, etc.
Resíduos Perigosos	Resíduos de galvanização, resíduos metalúrgicos, curtume.	Tábuas, telhas, tijolos de cimento, etc.
Outros resíduos de processos não perigosos	Resíduos de gesso, resíduos de calcário, processamento de mármore, resíduos de vidro e cerâmicas.	Gesso, gesso fibroso, placas, tijolos, blocos, clínquer de cimento, aglutinante, hidráulico de cimento.

Fonte: Dubey; Mishras; Sharma, 2021.

Materiais residuais tem sido utilizados como elemento de carga em materiais compósitos devido apresentar componentes que proporcionam bom desempenho, tornando-os materiais de interesse para utilização em compósitos. Além disso, a utilização de resíduos industriais é de extrema importância, já que ocorre o reaproveitamento de um material que não apresenta utilidade industrial, o que reduz a quantidade do mesmo na natureza (GIRGE *et al*, 2021).

Dessa forma, o estudo de Rakesh e Ranacoti (2020) apresenta a caracterização físico-mecânica de compósitos de matriz epóxi com resíduo industrial

de seda e fibra de juta, no qual a quantidade de fibra se manteve a mesma e a fração mássica de resíduo variou de 4 a 14 %. Nesse estudo, por intermédio dos testes de resistência à tração, à flexão, impacto e dureza, a resistência mecânica dos compósitos híbridos aumentou de acordo com a inserção de resíduo de seda na matriz para frações mássicas de até 12 %, o que, segundo os autores, está relacionado com a boa interação entre o resíduo, fibra e matriz. Além disso, a adição do resíduo ocasionou uma redução na taxa de desgaste específica. Por outro lado, a fração de vazios aumentou com a adição de resíduo de seda, tendo a maior fração nos compósitos híbridos com 14 % em peso.

Barbosa *et al* (2020) apresentam o efeito da adição do resíduo de mármore e granito com fibras de sisal nas propriedades de compósitos de matriz poliéster isoftálica, no qual variou-se as frações mássicas de resíduo e a fibra se manteve na fração de 3 %. Para a caracterização física, os compósitos com 15 e 20 % de resíduo apresentaram os menores valores em absorção de água devido, segundo os autores, à adição de resíduo e sua característica hidrofóbica. Com relação a resistência à tração, o compósito com fração mássica de 10 % de resíduo apresentou o melhor resultado em desempenho mecânico quando comparado às demais frações de resíduo, as quais se mantiveram próximas à resistência da matriz plena e, de acordo com os autores, a adição de resíduo em compósitos causam o surgimento de porosidades e, conseqüentemente, reduz as propriedades mecânicas do material.

2.3.1 Resíduo de caulim

O caulim é denominado como uma rocha de granulometria fina composta por material argiloso com baixo teor de ferro e coloração branca, o qual apresenta um grupo de silicatos hidratados em sua composição tendo como principal constituinte o mineral caulinita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$). Outros compostos, em menores quantidades, são encontrados em sua composição como a haloisita e impurezas como óxido de ferro, óxido de titânio e mica (MURRAY, 2006).

Por outro lado, o caulim é classificado como um dos minerais mais abundantes da crosta e está entre os de maior importância industrial devido suas propriedades e aplicações. Dentre as reservas mundiais, 95 % desse material está distribuído em quatro países sendo, aproximadamente, 53 % nos Estados Unidos, 28 % no Brasil, 7 % na Ucrânia e 7 % na Índia (DNPM, 2014). Segundo dados do Departamento

Nacional de Produção Mineral (2014), a região Norte do Brasil possui as maiores mineradoras de caulim nacional, sendo o Pará representando aproximadamente 71 % da produção interna desse material, o que equivale a 1.516.163 toneladas produzidas e o Amapá com produção de 278.468 toneladas. Nesse sentido, a Figura 2.4 apresenta uma das áreas de extração do caulim localizada em Ipixuna do Pará da empresa Imerys Rio Capim Caulim (IRCC), a qual é o maior produtor de caulim do mundo e dispõe de minas e usinas na Austrália, Estados Unidos, Reino Unido, Portugal e Brasil (DNPM, 2014).

Figura 2.4 – Área das minas de extração de caulim em Ipixuna do Pará



Fonte: Imerys Brasil, 2022.

Somado a isso, o caulim é um material de grande interesse comercial devido apresentar características de ser quimicamente inerte em uma faixa ampla de pH, é macio, tem boa refratariedade, apresenta excelente cobertura quando utilizado como pigmento, é pouco abrasivo, tem baixa condutividade elétrica e térmica e, comparado aos outros materiais com estas aplicações, apresenta os menores custos (CHAVES *et al*, 2018). Desse modo, tem-se como principal aplicação a participação do caulim como agente de enchimento no processamento do papel e como componente de massas cerâmicas (louças, porcelanas, refratários e outros) além da utilização do mesmo em borrachas, plásticos, substratos catalisadores e outros (MURRAY, 2006; ALMEIDA, CASTRO, VIDAL, 2016).

Diante desse contexto, entende-se que o caulim é um mineral utilizado em grande escala no mundo e no Brasil, devido a isso as etapas de beneficiamento

utilizadas no processo de extração causam um grande volume de resíduo com altas concentrações de caulinita (BARATA *et al*, 2022). Desse modo, o processamento para obtenção do caulim pode gerar resíduos líquidos e sólidos, o qual apresenta alguns metais mais pesados como ferro, alumínio, zinco, cádmio e outras substâncias contaminantes (CHAVES *et al*, 2018). Em virtude da grande concentração de caulinita presente no resíduo e seu grande volume, esse material apresenta grande potencial para reutilização (BARATA *et al*, 2022).

Jesus *et al* (2021) estuda a adição de resíduos industriais de caulim, cinza volante e lama vermelha em compósitos de matriz poliéster isoftálica por intermédio de caracterizações físicas e mecânica de impacto. Nas propriedades físicas, a absorção de água e porosidade aparente aumentaram com a inserção de resíduos de lama vermelha e cinza volante, porém para os compósitos com resíduo de caulim essas propriedades apresentaram estabilidade. Já para análise mecânica, a resistência ao impacto dos compósitos aumentou para frações mássicas de 10 % e 20 % dos resíduos e, a partir disso, a resistência diminuiu conforme a inserção dos resíduos, o que é justificado pelo fato de os resíduos atuarem como carga de enchimento em compósitos.

2.3.2 Resíduo de cobre

De acordo com Santos (2020), o cobre está dentre os metais mais utilizados desde o início das civilizações, fazendo-se presente em um período de grande importância pra história, o qual ficou conhecido como “Idade do Bronze” visto que se trata de uma liga metálica formada por cobre e estanho. A partir das Revoluções Industriais e com o avanço da tecnologia, a utilização do cobre e suas ligas se tornou ainda maior devido suas variadas aplicações com base em suas propriedades.

Segundo Cunha *et al* (2019), no Brasil, as minas de cobre são encontradas apenas nos estados do Pará, Goiás e Bahia seguindo a distribuição, respectivamente, de 68,8 %, 30,0 % e 1,2 % com relação a produção de minério bruto em toneladas. Entretanto, apenas 1 % da produção bruta é beneficiada, o que equivale a produção anual das usinas de tratamento. A Figura 2.5 mostra uma área de extração de minério de cobre na Mina do Sossego localizada no Pará.

Figura 2.5 – Minério de cobre da área de extração da Mina do Sossego

Fonte: Vale S.A, 2022.

Estima-se que, dentre todos os depósitos da crosta, 50 % é encontrado na forma de calcopirita (CuFeS_2) um mineral sulfetado com, aproximadamente, 35 % de cobre ligado ao ferro. Entretanto, o cobre pode ser encontrado na forma de outros minerais, os quais estão apresentados mostrados na Tabela 2.2 de acordo com o percentual teórico.

Tabela 2.2 – Principais minerais de cobre

Tipo	Mineral	Fórmula	% Teórico de Cu
Sulfeto	Calcopirita	CuFeS_2	35
	Bornita	Cu_5FeS_4	63
	Calcocita	Cu_2S	79,8
Óxido	Cuprita	Cu_2O	88,8
	Tenorita	CuO	79,9
Carbonato	Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	58
	Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	55

Fonte: Cunha et al, 2019.

Dentre as características do cobre, tem-se alta ductilidade, maleabilidade, elevada condutividade elétrica e térmica, elevada resistência mecânica e à fadiga, boa resistência a corrosão e facilidade de fabricação, o que torna esse material aplicável em diversos setores industriais (BECK; BOEIRA, 2007). Diante desse contexto, as produções relacionadas a condutividade elétrica se tornaram as mais importantes, já

que 55 % da produção anual de cobre é aplicada em fios, cabos, aparelhos, geradores, etc. Além disso, devido a condutividade térmica, o cobre é muito utilizado em dispositivos trocadores de calor em equipamentos como refrigeradores, ar-condicionado e bobinas (OLIVEIRA; SILVA; SOBRAL, 2020).

Diante disso, sabe-se que as atividades de mineração geram uma grande quantidade de resíduo, o qual é considerado um inconveniente ambiental estocado geralmente em bacias de contenção ou, em alguns casos, é reintroduzido em outro processo de produção a exemplo do setor de construção civil (KATO, 2018). Nesse sentido, o resíduo de mineração do cobre sulfetado, é proveniente da etapa de flotação no beneficiamento do minério e é constituído basicamente por sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro. Somado a isso, há vários estudos acerca do reaproveitamento do resíduo de cobre em sua grande maioria aplicado ao setor da engenharia civil a exemplo da reutilização do resíduo para fabricação de concreto e misturas asfálticas (SANTOS, 2020; KATO, 2018).

Hejna *et al* (2021) estudou a inserção de resíduo de cobre em compósitos de matriz polimérica de polietileno, no qual mostrou na análise das propriedades físicas o aumento da massa específica e da porosidade dos compósitos em função da inserção de resíduo de cobre e associou tais resultados com a presença de inclusões de ar nos materiais devido à aglomeração de partículas de carga. Além disso, para análise mecânica de tração, a inserção de resíduo de cobre diminuiu a resistência mecânica e o alongamento na ruptura, o que é justificado pelo aumento da porosidade que interfere na descontinuidade da estrutura dos compósitos.

2.4 Caracterização dos compósitos

2.4.1 Ensaio físicos

As propriedades físicas são aquelas que podem ser analisadas ou obtidas sem que a composição ou integridade do material seja afetada. Desse modo, a caracterização física na qual se obtém a absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) é de suma importância para compreensão da relação entre as propriedades do material em questão a exemplo da densidade aparente que, além de relacionar o peso da peça produzida em suas dimensões reais, pode indicar o grau de cristalinidade do material. Já a absorção de água em

compósitos está relacionada com a degradação prematura causada pela penetração de água ou outro líquido, o que pode causar aumento de volume, degradação da estrutura molecular, redução gradual das propriedades mecânicas e outros (COSTA, 2017).

Dessa forma, a partir dos dados de massa úmida (M_u), massa seca (M_s) e massa imersa (M_i) e, de acordo com a norma ASTM D 1984-92 citada por Santos (1989), é possível realizar os ensaios em questão utilizando as Equações 1, 2 e 3 para a obtenção da absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente, respectivamente.

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

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

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

2.4.2 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto visa avaliar as características da fratura dos materiais quando são submetidos à altas taxas de carregamento, ou seja, analisa o comportamento dúctil-frágil de um material (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). Desse modo, a carga aplicada se dá por meio de esforços por choques e o impacto por intermédio da queda de um pêndulo ou martelo, posicionados a uma determinada altura, sobre o corpo de prova (GARCIA; SANTOS; SPIM, 2012).

Diante disso, os ensaios mais utilizados são o Izod e Charpy, os quais são métodos que apresentam distinção na forma da fixação do corpo de prova na máquina de ensaio. Desse modo, pode-se analisar com o resultado, a tenacidade ao impacto do material, ou seja, a energia absorvida até a fratura e relacionar a resistência ao impacto a partir da energia absorvida com a área da seção resistente (GARCIA; SANTOS; SPIM, 2012).

Somado a isso, os ensaios de impacto são utilizados para analisar, especificamente, a transição do comportamento dúctil para o comportamento frágil de

um material que pode ocorrer em função da temperatura de serviço do mesmo, o que possibilita ainda conhecer a faixa de temperatura que ocorre esta transição. Assim, é um ensaio comum na indústria naval, bélica e em materiais que são expostos a baixas temperaturas (GARCIA; SANTOS; SPIM, 2012).

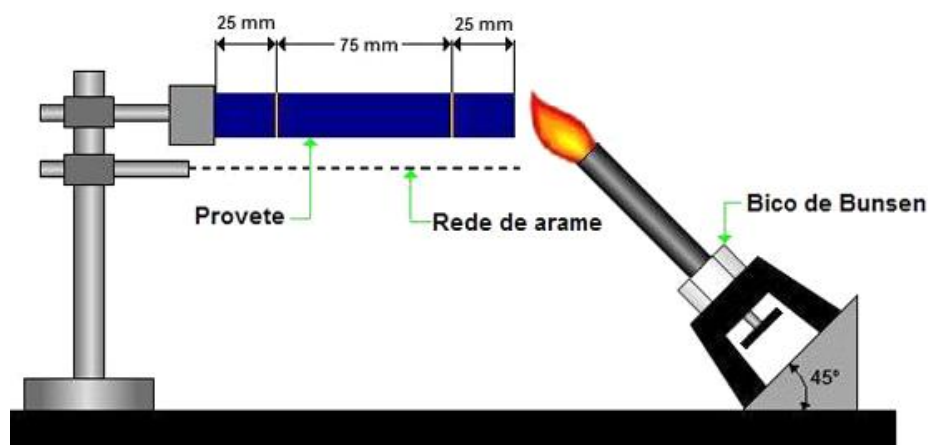
2.4.3 Flamabilidade

A flamabilidade dos materiais é uma característica importante, especialmente quando se refere aos polímeros e compósitos de matriz polimérica visto que grande parte dos polímeros, em sua forma pura, são inflamáveis e, devido a isso, existe uma grande preocupação com a redução da inflamabilidade desses materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Diante desse contexto, muitos produtos tem sido desenvolvidos com o intuito de diminuir a taxa de propagação da chama, os quais são chamados retardantes de chama. Esses produtos são inseridos nos materiais poliméricos expostos à altas temperaturas ou exposição ao fogo promovendo uma desaceleração ou interrupção da combustão/queima (BELARMINO *et al.*, 2013). Isso ocorre devido ao retardante promover uma interferência no processo de combustão pela fase gasosa ou por iniciar uma reação de combustão que gera menos calor e, conseqüentemente, diminuindo a temperatura (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Segundo Belarmino, Ladchumananandasivam e Ribeiro (2013) o ensaio de flamabilidade pode ser realizado na direção vertical e/ou horizontal, ilustrado na Figura 2.6. Para o teste horizontal, os corpos de prova devem ser marcados em três regiões sendo uma com 100 mm para medir a propagação da chama, uma com 5 mm onde a chama deve permanecer para promover o aquecimento do polímero e de 25 mm onde a chama pode iniciar sua propagação antes de iniciar a contagem do tempo de propagação (SANTOS, 2020).

Figura 2.6 – Ensaio de flamabilidade horizontal



Fonte: Caetano, 2022.

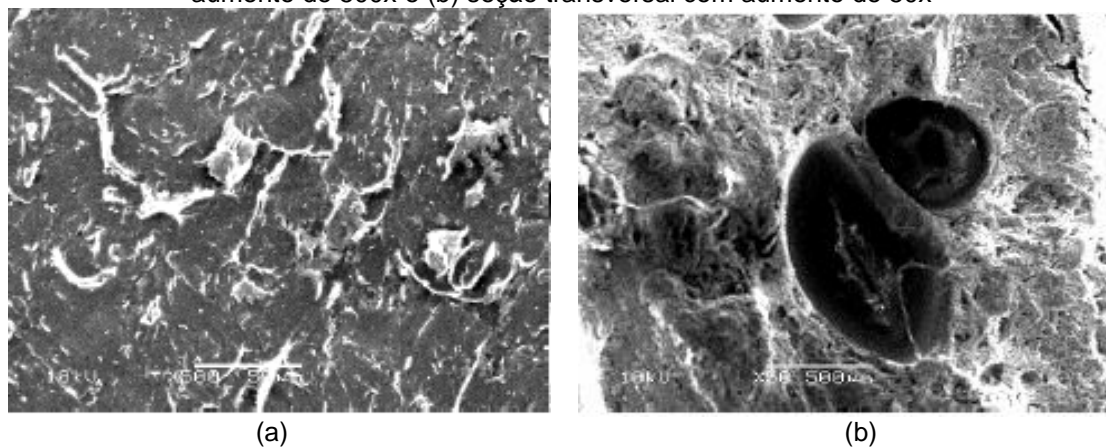
2.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é utilizada para analisar a estrutura da superfície de um material de forma mais ampliada que a microscopia óptica (CALLISTER; RETWISHK, 2020). Assim, a superfície é varrida com um feixe de elétrons, o qual é refletido e coletado para exibir, a partir da taxa de varredura em um tubo se raios catódicos, a imagem em uma tela representando as características da superfície da amostra (SHACKELFORD, 2008).

Ademais, as variações na topografia da superfície da amostra influenciam na intensidade do feixe de elétrons permitindo a inspeção de superfícies irregulares, o que difere da técnica de Microscopia Óptica que necessita de uma superfície minuciosamente polida. Desse modo, o MEV possibilita a análise de superfícies que apresentam fratura fornecendo, então, dados sobre a natureza do mecanismo de fratura da amostra (SHACKELFORD, 2008). Além dessa característica, possibilita ainda realizar uma análise e/ou identificação da composição microestrutural do material e, segundo Callister e Retwishk (2020), é possível obter ampliações entre 10 e mais de 50.0003 e profundidades de campo bastante elevadas.

De acordo com a Figura 2.7, Mählmann, Müller e Scheeren (2020) realizam o estudo do compósito polimérico reforçado com resíduo de madeira, no qual as micrografias mostram em 2.7 (a) uma boa aderência das fibras de madeira com a matriz, o que favorece a resistência do material. Em 2.7 (b), tem-se a presença de bolhas na estrutura causada pela umidade liberada durante o aquecimento da mistura.

Figura 2.7 – Micrografia de superfície do compósito de matriz polimérica com resíduo de madeira (a) aumento de 500x e (b) seção transversal com aumento de 50x



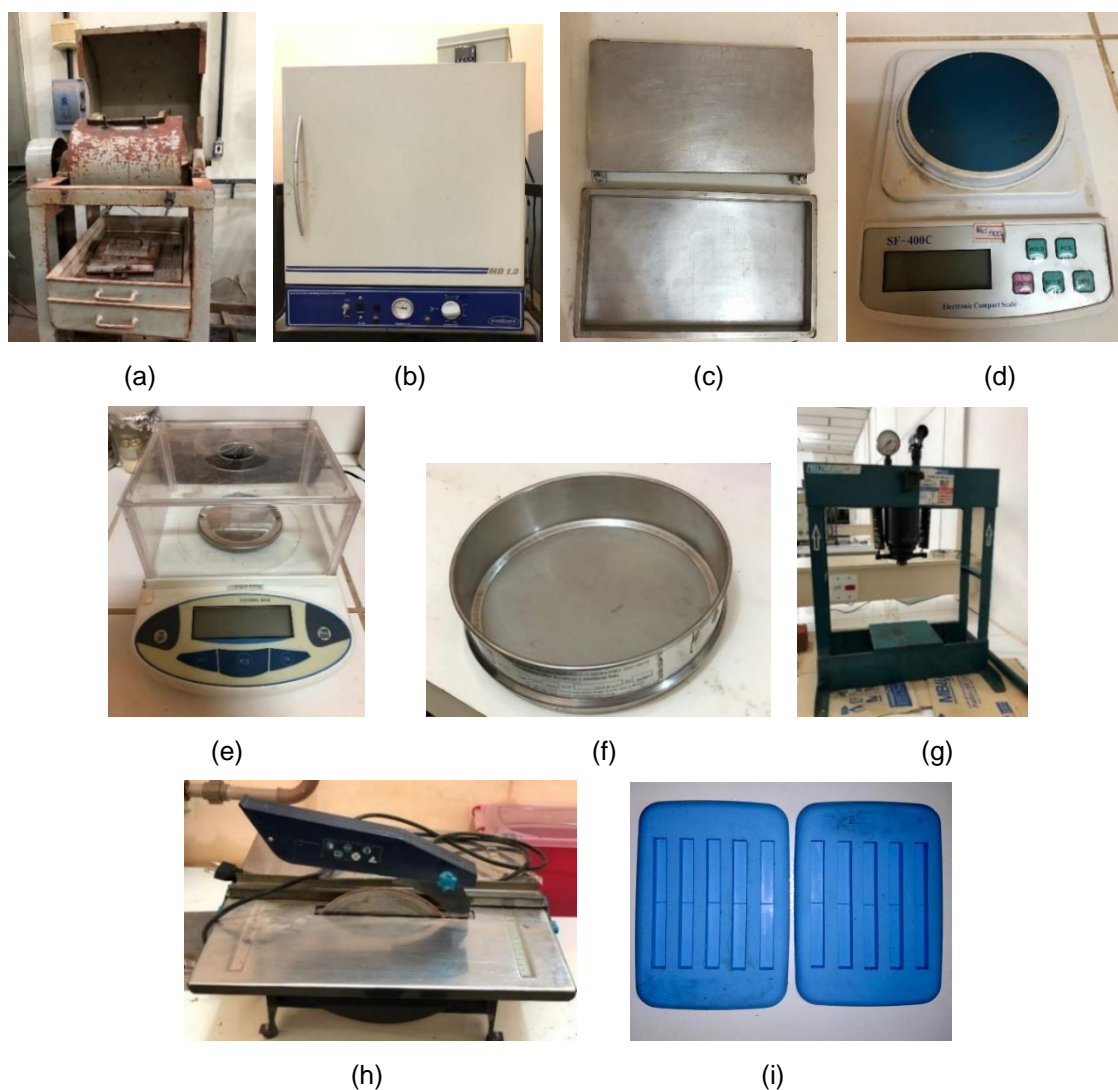
Fonte: Mählmann; Müller; Scheeren, 2020.

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados para a execução desse trabalho foram disponibilizados pelo Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, os quais são: Moinho de bolas, estufa do fabricante DE LEO Equipamentos Laboratoriais, molde metálico, balança analítica, balança de precisão, peneira de 100 mesh da série Tyler, prensa hidráulica de capacidade de 15 toneladas do modelo MPH-15 do fabricante MARCON, serra de bancada e molde de silicone. Esses equipamentos estão dispostos na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Equipamentos: (a) Moinho de bolas; (b) estufa; (c) molde metálico; (d) balança analítica; (e) balança de precisão; (f) peneira; (g) prensa hidráulica; (h) serra de bancada; (i) Molde de silicone.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.2 Materiais

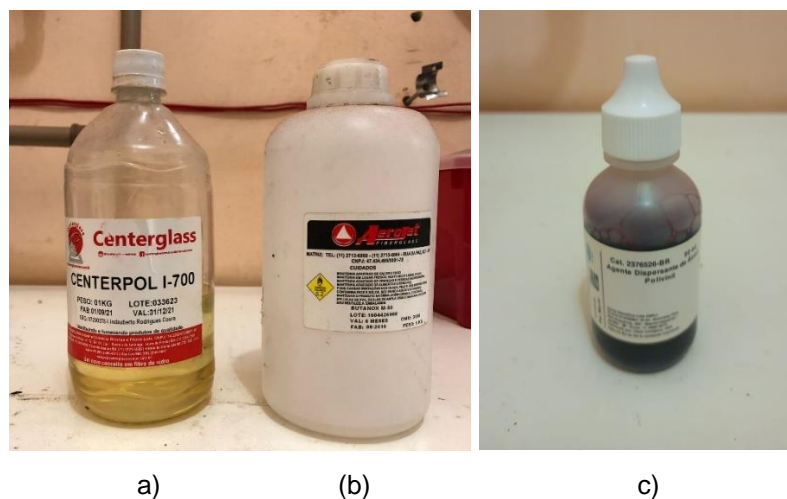
3.2.1 Matriz polimérica

O material polimérico utilizado nesse trabalho foi a Resina Poliéster Isoftálica de nome comercial AM 910 AEROJET, a qual apresenta cor amarelada, média reatividade, boa resistência química, baixa viscosidade, densidade de $1,15 \text{ g/cm}^3$ e sem a presença de um agente que promova reticulação.

Para o sistema de formação de reticulação, utilizou-se o acelerador de Cobalto na proporção 1,5 % v/v como agente promotor de reticulação de nome comercial CAT MET UMEDECIDO (solução de octoato de cobalto) e o iniciador de nome comercial BUTANOX M-50 marca de AEROJET (Peróxido de metil etil cetona – MEK-P) na proporção de 1 % v/v.

Todos os materiais citados foram fornecidos pela empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA e a Figura 3.2 apresenta os materiais utilizados para a produção da matriz.

Figura 3.2 – (a) Resina poliéster; (b) Iniciador MEK-P; (c) Acelerador de Cobalto



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.2.2 Resíduos industriais de caulim e cobre

Os resíduos de caulim e cobre sulfetado foram submetidos ao mesmo procedimento, no qual foram levados para secagem por 24 horas em uma estufa e ao processo de peneiramento com peneira de 100 mesh da série Tyler.

Além disso, o resíduo de caulim foi fornecido pela empresa Imerys Rio Capim Caulim, a qual obtém o caulim das minas localizadas em Ipixuna do Pará por meio do transporte do mesmo por minerodutos que segue até o município de Barcarena, onde ocorre o beneficiamento. Nesse sentido, o resíduo de caulim é obtido da etapa de beneficiamento do caulim, apresentado na Figura 3.3 (a).

O resíduo de cobre sulfetado apresentado na Figura 3.3 (b) foi fornecido pela empresa VALE S.A, a qual obtém o minério da Mina do Sossego em Canaã dos Carajás. Desse modo, o resíduo de cobre sulfetado utilizado é obtido após o processo de flotação utilizado nas etapas de extração do cobre.

Figura 3.3 – (a) Resíduo de caulim; (b) Resíduo de cobre sulfetado



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.3 Procedimentos experimentais

3.3.1 Confeção dos materiais compósitos

Os materiais foram produzidos na forma de placas retangulares de acordo com o molde metálico e para os compósitos destinados ao ensaio de impacto, utilizou-se

molde de silicone. O método de fabricação utilizado foi laminação manual (*hand lay-up*). Inicialmente, foram definidas as massas de cada uma das matérias-primas do compósito e, posteriormente, os resíduos foram levados para estufa de circulação para extração de umidade durante 30 minutos sob temperatura de 105 °C.

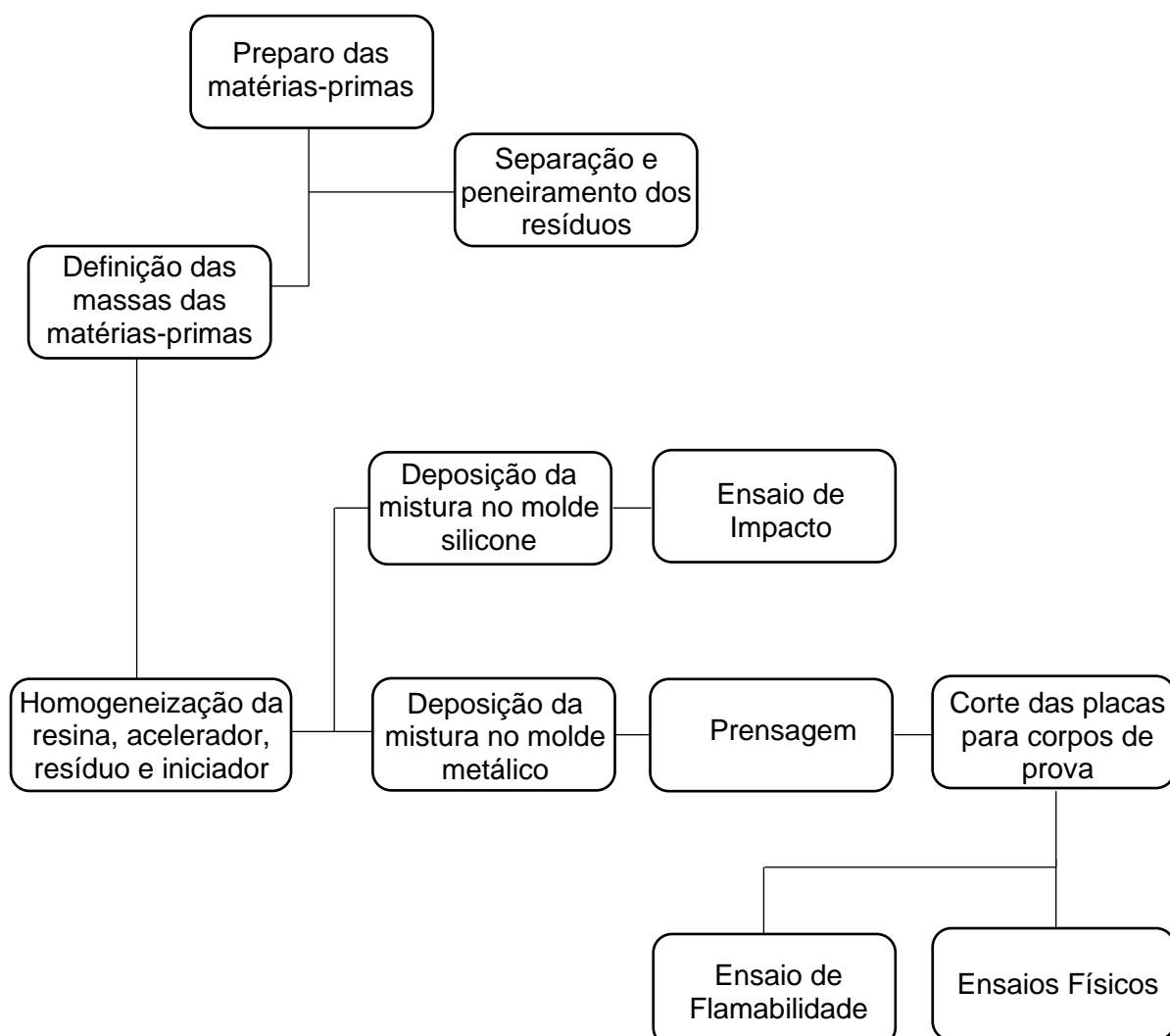
Em seguida, para facilitar a remoção do material do molde, aplicou-se desmoldante líquido do fabricante AEROJET no molde metálico de aço inoxidável de dimensões retangulares de 320 mm x 172,5 mm x 5 mm. Posteriormente, iniciou-se o processo de homogeneização entre matriz e resíduo, no qual o acelerador de cobalto foi inserido (1,5 % v/v) na resina seguindo da adição do resíduo e, por fim, adição do iniciador MEK-P (1,0 % v/v). Essa mistura foi realizada em um béquer por 5 minutos e seguiu para o vazamento no molde metálico e em molde de silicone.

Para os materiais compósitos destinados ao ensaio de impacto, o vazamento se deu em molde de silicone e após o tempo de gel, os materiais foram retirados do molde após 1 hora e, para a polimerização completa (processo de cura), os corpos de prova foram armazenados por 24 horas.

Para os materiais destinados aos ensaios físicos e de flamabilidade, a mistura foi despejada em molde metálico, no qual foi utilizada uma espátula de metal e um rolo metálico para promover melhor compactação, para remover as bolhas de ar e possíveis não conformidades no material. Após atingir o tempo de gel, o qual se deu entre 15 a 20 minutos, o molde metálico foi fechado e prensado por uma prensa hidráulica sob uma carga de 2,5 kN durante 20 minutos. Posteriormente, os materiais foram retirados dos moldes e foram armazenados em um local adequado para possibilitar o processo total de cura que ocorreu em 24 horas. Após esse processo, para a confecção dos corpos de prova, realizou-se a etapa de corte dos compósitos fabricados por intermédio de uma serra de bancada circular, os quais foram seccionados de acordo com as dimensões das normas para cada ensaio.

A Figura 3.4 mostra um fluxograma que simplifica as etapas de fabricação e caracterização dos compósitos.

Figura 3.4 – Fluxograma da fabricação e caracterização dos compósitos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.4 Caracterização dos materiais fabricados

3.4.1 Ensaio físicos

Os ensaios físicos foram realizados com o intuito de determinar propriedades de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) e, para isso, adotou-se a norma ASTM D 1984-92.

Para a realização dos ensaios físicos, 10 amostras foram cortadas no tamanho 25 mm x 25 mm x 2,7 mm e levadas ao forno a 105 °C em uma bandeja durante 24 horas. A posteriori, foram medidas as massas das amostras por meio da balança de

precisão (da marca Biscoale e modelo FA 2204 de precisão $\leq \pm 0,2$ mg) com o intuito de obter a massa seca de cada corpo de prova e, em seguida, os mesmos foram imersos em um recipiente com água por 24 horas. Após esse tempo, essas amostras foram removidas do recipiente e dispostas em uma bancada para escoamento do líquido superficial para, em seguida, realizar a medição das massas e obter a massa úmida de cada amostra. Já a massa imersa foi obtida por meio de um sistema mostrado na Figura 3.5, no qual a balança foi colocada sob um aparato de madeira, onde uma haste de aço sustentou o corpo de prova imerso em um recipiente colocado abaixo do aparato e as propriedades são determinadas por intermédio das Equações 1, 2 e 3 já mencionadas em 2.4.1.

Figura 3.5 – Aparato utilizado para obtenção da massa imersa



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.4.2 Ensaio de impacto

Para o ensaio de impacto, foram utilizados 8 corpos de prova para cada série fabricados em molde de silicone com dimensões de 80 mm x 12,7 mm x 10 mm e, utilizou-se a norma ASTM D 6110-18 para o ensaio. Além disso, a obtenção da resistência ao impacto Charpy foi realizada por intermédio do equipamento mostrado na Figura 3.6, o qual é chamado de testador de impacto de pêndulo do fabricante Gunt Hamburg e modelo WP 410 com capacidade de 300 Nm, martelo com massa de 9,9 kg, comprimento do pêndulo de 840 mm, ângulo de queda de 150° e velocidade de impacto equivalente a 5,5 m/s.

Figura 3.6 – Equipamento utilizado para o ensaio de impacto

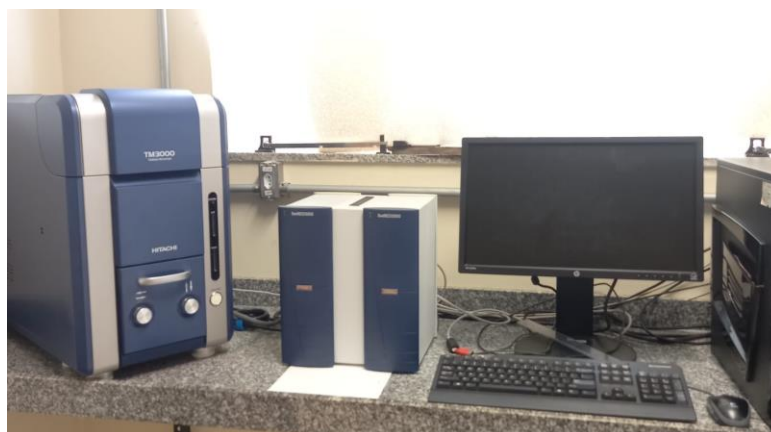


Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises da superfície de fratura dos compósitos foram realizadas com o MEV por meio dos equipamentos do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da UFPA e também do Laboratório de Materiais do Instituto Federal do Pará (IFPA). Assim, a Figura 3.7 apresenta o equipamento utilizado.

Figura 3.7 – Equipamento para Microscopia Eletrônica de Varredura



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.4.4 Ensaio de Flamabilidade

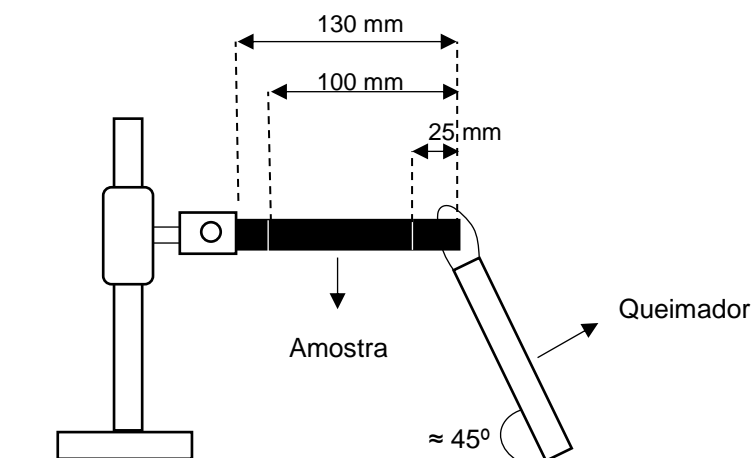
O teste de resistência a chama foi realizado por flamabilidade horizontal, no qual foram utilizados 6 corpos de prova para cada composição. Adotou-se a norma ASTM D 635-18 e, para isso, foi utilizado um aparato de estrutura metálica para acoplar e sustentar o corpo de prova, mostrado na Figura 3.8. Para conduzir a chama pelo corpo de prova, utilizou-se um Bico de Bunsen posicionado a 45°.

Figura 3.8 – Aparato metálico utilizado nos testes de flamabilidade



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Dessa forma, os corpos de prova foram testados de acordo com as frações mássicas de resíduos de cobre sulfetado (10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 % de resíduo) e resíduo de caulim (10 %, 20 %, 30 % e 40 % de resíduo) com dimensões de 130 mm x 13 mm x 3 mm. A Figura 3.9 mostra o esquema de representação do ensaio com as marcações de 25 mm e 100 mm da extremidade do corpo de prova.

Figura 3.9 – Esquema representativo do ensaio

Fonte: Adaptado de Santos, 2020.

Além disso, a taxa de queima (v), é calculada por meio da Equação 4, onde L é o comprimento útil do corpo de prova em milímetros e t é o tempo que a chama percorre o comprimento útil em segundos.

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

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio físicos

- **Compósitos com resíduo de caulim**

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) da matriz plena e dos compósitos de acordo com a inserção de resíduo de caulim.

Tabela 4.1 – Resultados dos testes de AA, PA e MEA dos compósitos de acordo com a inserção de resíduo de caulim.

Fração Mássica (%)	Absorção de Água (%)	Porosidade Aparente (%)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)
Matriz Plena	0,62 ± (0,05)	0,67 ± (0,09)	1,26 ± (0,08)
RCA – 10	0,96 ± (0,07)	0,56 ± (0,04)	1,44 ± (0,04)
RCA – 20	0,45 ± (0,03)	0,82 ± (0,06)	1,65 ± (0,06)
RCA – 30	0,41 ± (0,02)	0,48 ± (0,03)	1,87 ± (0,03)
RCA – 40	0,32 ± (0,04)	0,35 ± (0,04)	2,09 ± (0,09)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

De acordo com os resultados da Tabela 4.1, tem-se que a absorção de água diminuiu com o aumento da fração mássica de resíduo de caulim, o que o torna um resultado satisfatório visto que a absorção de água está relacionada à presença de poros e imperfeições no material. Desse modo, destaca-se o RCA-40 com redução na absorção de água em 48,39 % e redução de porosidade aparente de 47,76 % com relação à matriz plena.

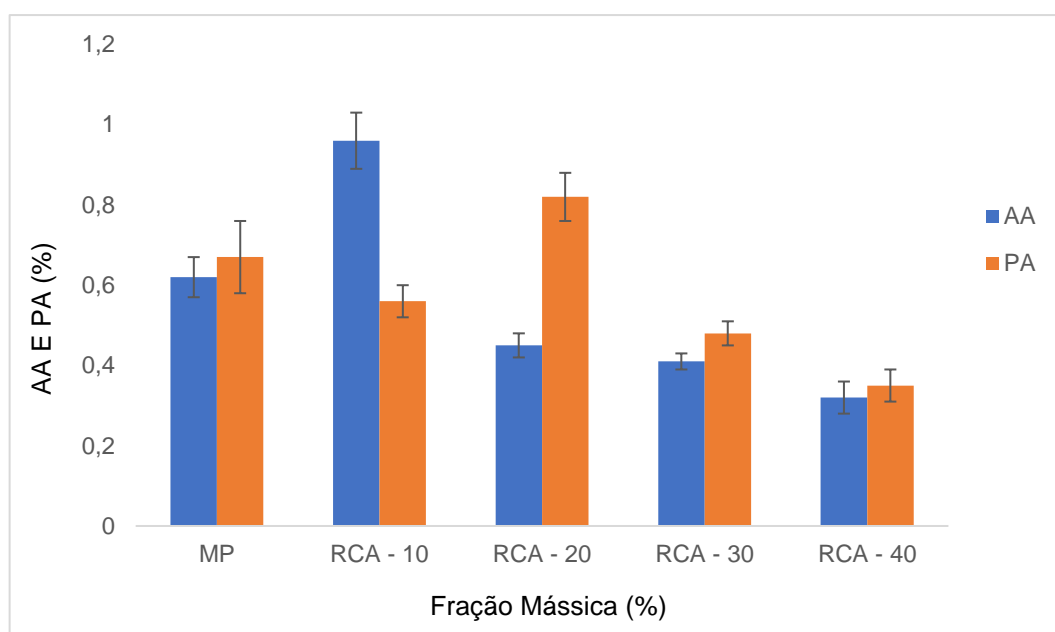
Segundo Tavares (2021), os resíduos, no geral, apresentam características hidrofílicas, o que induz o aumento da absorção de água de acordo com a incorporação de resíduo. Entretanto, tal situação não ocorreu no ensaio realizado, o que pode ser justificado pela boa homogeneização entre resíduo e matriz, além do fato de a matriz apresentar característica hidrofóbica.

Para a porosidade aparente, observa-se uma redução assim como na absorção de água, com exceção do compósito com 20 % de resíduo. Tal redução ocorre

também pela boa homogeneização da mistura entre resíduo e matriz resultando em menores quantidades de poros, bolhas e defeitos no material.

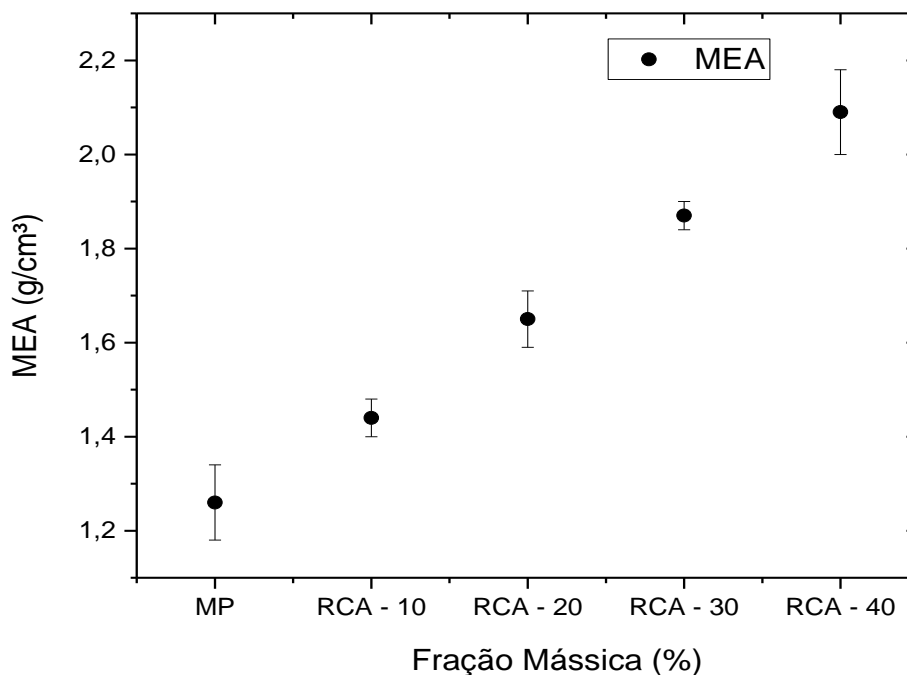
Somado a isso, ressaltar-se que existe uma relação direta entre as propriedades de absorção de água e porosidade aparente, visto que as duas envolvem a variação de vazios presente no material e, desse modo, a inserção de resíduos na matriz afeta diretamente tais propriedades (BARBOSA, 2021; SANTOS, 2020). Devido esta relação de influência, a Figura 4.1 apresenta um gráfico comparativo da absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) em função da fração mássica do resíduo de caulim.

Figura 4.1 – Gráfico de AA e PA em função da fração mássica de resíduo de caulim



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

A Figura 4.2 apresenta o gráfico da massa específica aparente da matriz plena e dos compósitos com resíduo de caulim.

Figura 4.2 – Gráfico da MEA em função da incorporação de resíduo de caulim

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Para a massa específica aparente, tem-se um aumento progressivo à medida que se aumenta a fração mássica do resíduo de caulim, o que se torna coerente com a regra das misturas visto que, segundo Callister e Rethwisch (2020), as cargas inseridas em compósitos vão modificar ou melhorar as propriedades do material, além de substituir uma parte do volume do polímero. Ademais, de acordo com a ficha técnica da resina poliéster, tem-se que sua massa específica é de $1,16 \text{ g/cm}^3$ e do resíduo de caulim, segundo Costa (2016) equivale a $2,60 \text{ g/cm}^3$, o que também justifica o aumento progressivo da MEA no ensaio. Diante disso, destaca-se o compósito com 40 % de resíduo (RCA-40) apresentando um aumento de 65,87 % na massa específica aparente quando comparada com a matriz plena.

- **Compósitos com resíduo de cobre sulfetado**

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) da matriz plena e dos compósitos de acordo com a incorporação de resíduo de cobre sulfetado.

Tabela 4.2 – Resultados dos testes de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente dos compósitos de acordo com a inserção de resíduo de cobre sulfetado.

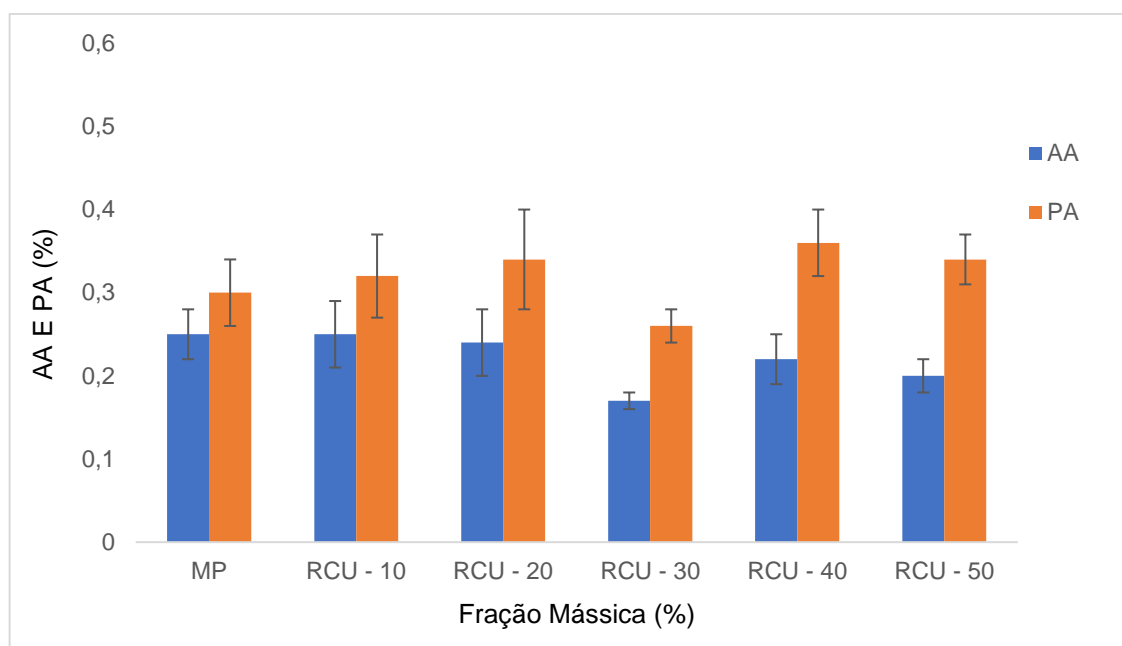
Fração Mássica (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)
Matriz Plena	0,25 ± (0,03)	0,30 ± (0,04)	1,20 ± (0,09)
RCU – 10	0,25 ± (0,04)	0,32 ± (0,05)	1,27 ± (0,07)
RCU – 20	0,24 ± (0,04)	0,34 ± (0,06)	1,36 ± (0,07)
RCU – 30	0,17 ± (0,01)	0,26 ± (0,02)	1,47 ± (0,06)
RCU – 40	0,22 ± (0,03)	0,36 ± (0,04)	1,57 ± (0,08)
RCU – 50	0,20 ± (0,02)	0,34 ± (0,03)	1,71 ± (0,08)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

De acordo com os dados da Tabela 4.2, tem-se uma pequena redução na absorção de água de acordo com a incorporação de resíduo de cobre, o que está relacionado com a boa homogeneização da mistura já citado anteriormente. O compósito com fração mássica de 30 % de resíduo apresentou menor valor de absorção de água tendo uma redução de aproximadamente 32 % quando comparado com a matriz plena.

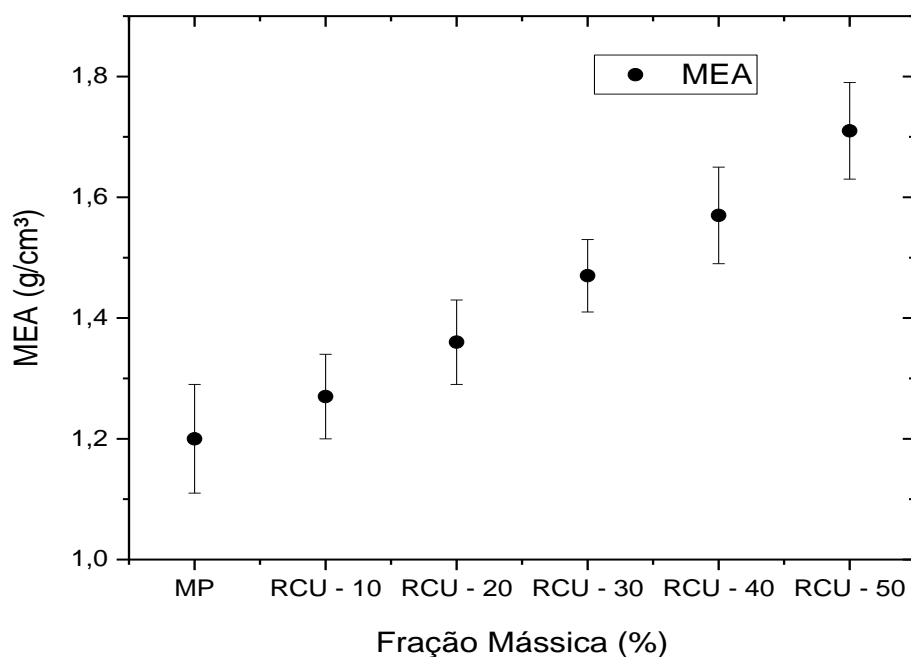
Por outro lado, apesar da proximidade dos valores da porosidade aparente dos compósitos com relação à matriz plena, houve um pequeno aumento desta propriedade em função da adição de resíduo. Esse aumento se refere à presença de poros e bolhas no material que pode ser justificado pelo método de fabricação manual utilizado, o qual apresenta elevada probabilidade de surgimento de poros, bolhas, trincas e outras imperfeições durante a inserção e homogeneização do resíduo com a matriz. Todavia, a formulação com 30 % de resíduo de cobre apresentou porosidade aparente menor que a matriz plena com redução de 13,33 %, o que sustenta a questão do aumento da PA das outras formulações estar associada ao método de fabricação visto que, segundo El Banna (2017) o resíduo de cobre sulfetado não apresenta característica hidrofílica e, em seu estudo, a porosidade aparente dos compósitos com resíduo de cobre apresentou uma redução superior a 50 % com relação à matriz plena.

Visto que a absorção de água ocorre de acordo com a presença de poros, a Figura 4.3 apresenta o gráfico comparativo da absorção de água e porosidade aparente dos compósitos em função da fração mássica de resíduo de cobre.

Figura 4.3 – Gráfico de AA e PA em função da fração mássica de resíduo de cobre sulfetado

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Figura 4.4 apresenta o gráfico da massa específica aparente da matriz plena e dos compósitos fabricados com resíduo de cobre sulfetado. Além disso, a massa específica do resíduo de cobre sulfetado é de $2,86 \text{ g/cm}^3$ (EL BANNA, 2017) e da matriz $1,16 \text{ g/cm}^3$. Desse modo, os valores obtidos no ensaio obedecem a regra das misturas visto que o aumento da MEA se dá de acordo com a incorporação de resíduo devido o mesmo apresentar massa específica maior que da matriz plena.

Figura 4.4 – Gráfico da MEA em função da incorporação de resíduo de cobre sulfetado

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

4.2 Ensaio de impacto

• Compósitos com resíduo de caulim

A Tabela 4.3 apresenta os dados obtidos neste ensaio, na qual tem-se a resistência ao impacto da matriz plena e dos compósitos de acordo com a inserção de resíduo de caulim.

Tabela 4.3 – Dados obtidos no ensaio de impacto da matriz plena e dos compósitos com resíduo de caulim.

Fração Mássica (RCA)	Resistência ao Impacto (kJ/m ²)
0 %	19,38 ± (2,44)
10 %	19,96 ± (1,71)
20 %	21,20 ± (2,47)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A partir dos dados da Tabela 4.3, nota-se um pequeno aumento da resistência ao impacto dos compósitos com resíduo de caulim quando comparados ao da matriz

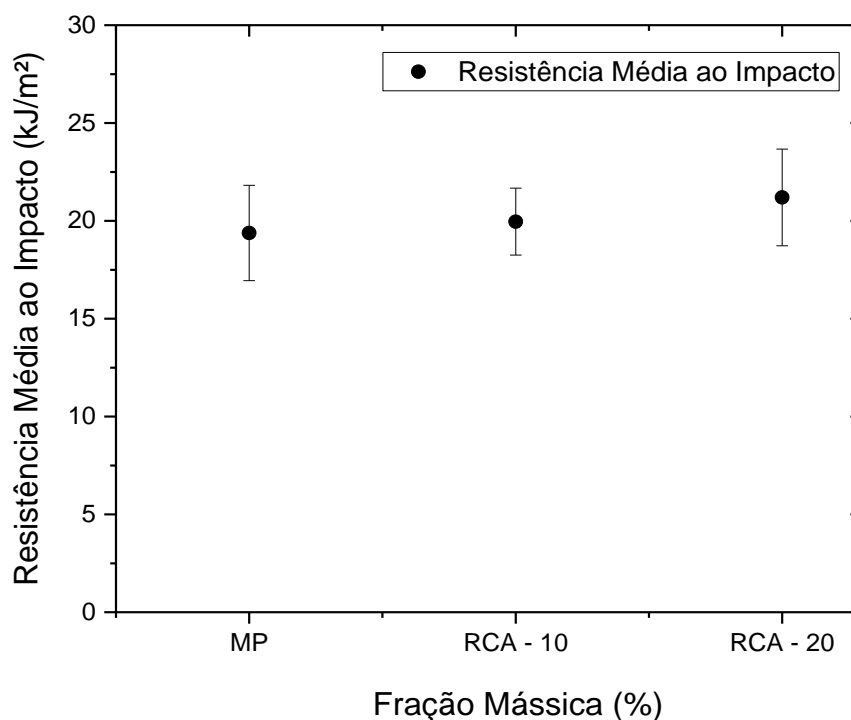
plena. Logo, não houve um aumento de grande relevância, o que constata uma estabilidade dos resultados quanto a resistência ao impacto.

Torres (2013) menciona que uma boa interação entre partícula-matriz ou partícula-fibra representa maior adesão e o crescimento de trinca requer maior consumo de energia. Nesse sentido, o aumento da resistência ao impacto em função do aumento da fração mássica de resíduo se dá devido a boa interação entre as partículas e a matriz, o que aumenta sua capacidade de absorção de energia.

El Banna (2017) cita que quando o compósito é solicitado mecanicamente, as regiões com partículas atuam como barreiras contra tal solicitação, induzindo a necessidade de uma força maior na região para contornar a partícula ou para fraturá-la. Dessa forma, tem-se como resultado uma absorção maior de energia e, conseqüentemente, maior resistência ao impacto.

A Figura 4.5 exibe o gráfico da resistência média ao impacto em função da inserção de resíduo de caulim.

Figura 4.5 – Gráfico da resistência ao impacto em função da fração mássica de resíduo de caulim



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

- **Compósitos com resíduo de cobre sulfetado**

A Tabela 4.4 apresenta os dados da resistência ao impacto da matriz plena e dos compósitos de acordo com a inserção de resíduo industrial de cobre.

Tabela 4.4 – Dados obtidos no ensaio de impacto da matriz plena e dos compósitos com resíduo de cobre sulfetado.

Fração Mássica (RCU)	Resistência ao Impacto (kJ/m²)
0 %	19,38 ± (2,44)
10 %	23,70 ± (1,85)
20 %	20,33 ± (1,03)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

De acordo com a Tabela 4.4, observa-se que a inserção de resíduo na matriz manteve os resultados estáveis quando comparado com a matriz plena. Embora os resultados tenham se mostrado estáveis, nota-se uma pequena redução nos valores da resistência ao impacto dos compósitos em função do aumento da fração mássica de resíduo industrial de cobre.

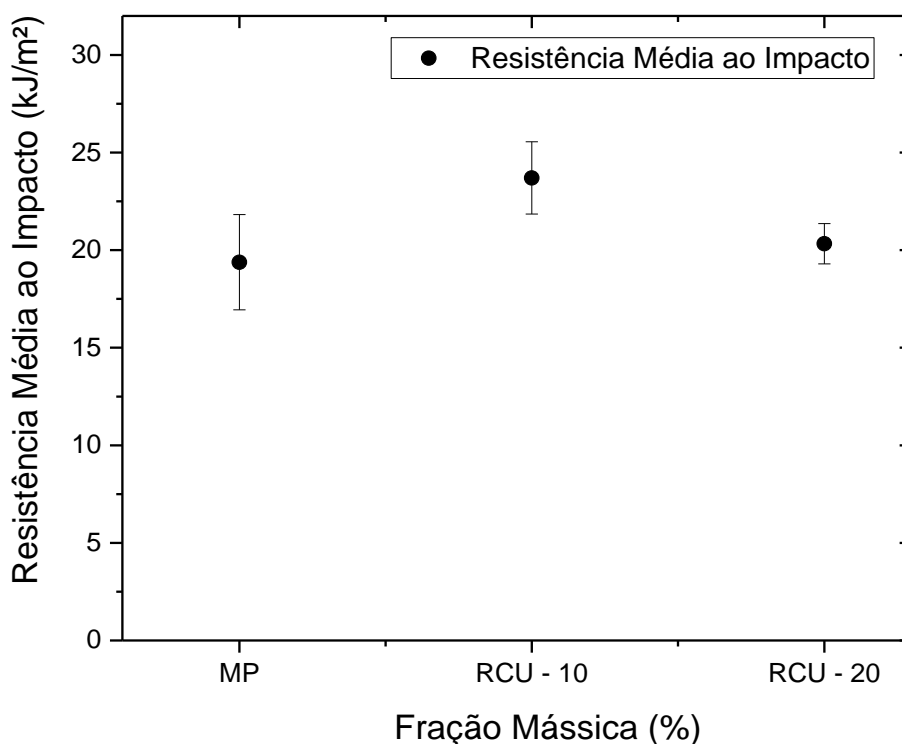
As imperfeições presentes na estrutura de um material como vazios, bolhas trincas e outros influenciam diretamente nos resultados de resistência ao impacto de um compósito, visto que se trata de um ensaio dinâmico com esforços bruscos. Portanto, durante uma solicitação mecânica, a fratura ocorre preferencialmente nesses pontos de fragilização por meio de propagação de trincas (COSTA, 2017). Logo, a diminuição da resistência ao impacto pode estar relacionada à presença desses tipos de imperfeições no material, visto que na análise de porosidade aparente com resíduo de cobre, houve um pequeno aumento da mesma com a inserção de resíduo.

Diante desse contexto, Costa (2017) estudou a inserção de resíduo de mármore em matriz polimérica e obteve também uma redução de até 15 % na absorção de energia de acordo com o aumento da fração mássica de resíduo. Pinheiro Filho (2018) realizou o ensaio de impacto Charpy em compósitos de matriz poliéster com enchimento de gesso, no qual a energia absorvida também diminuiu com o aumento da carga em 30 % para a formulação com 50 % de resíduo. Ademais, Silva (2020) em seu estudo com a mesma resina e carga de pó de cimento teve diminuição

na energia de impacto de até 11,6 %. Em todos os casos citados, os autores ressaltam a questão do resíduo atuar como carga de enchimento e não como reforço efetivo do compósito, o que induz na diminuição da resistência ao impacto do mesmo.

A Figura 4.6 apresenta um gráfico comparativo da resistência média ao impacto da matriz plena e dos compósitos com resíduo de cobre sulfetado.

Figura 4.6 – Gráfico da resistência ao impacto em função da fração mássica de resíduo de cobre sulfetado.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

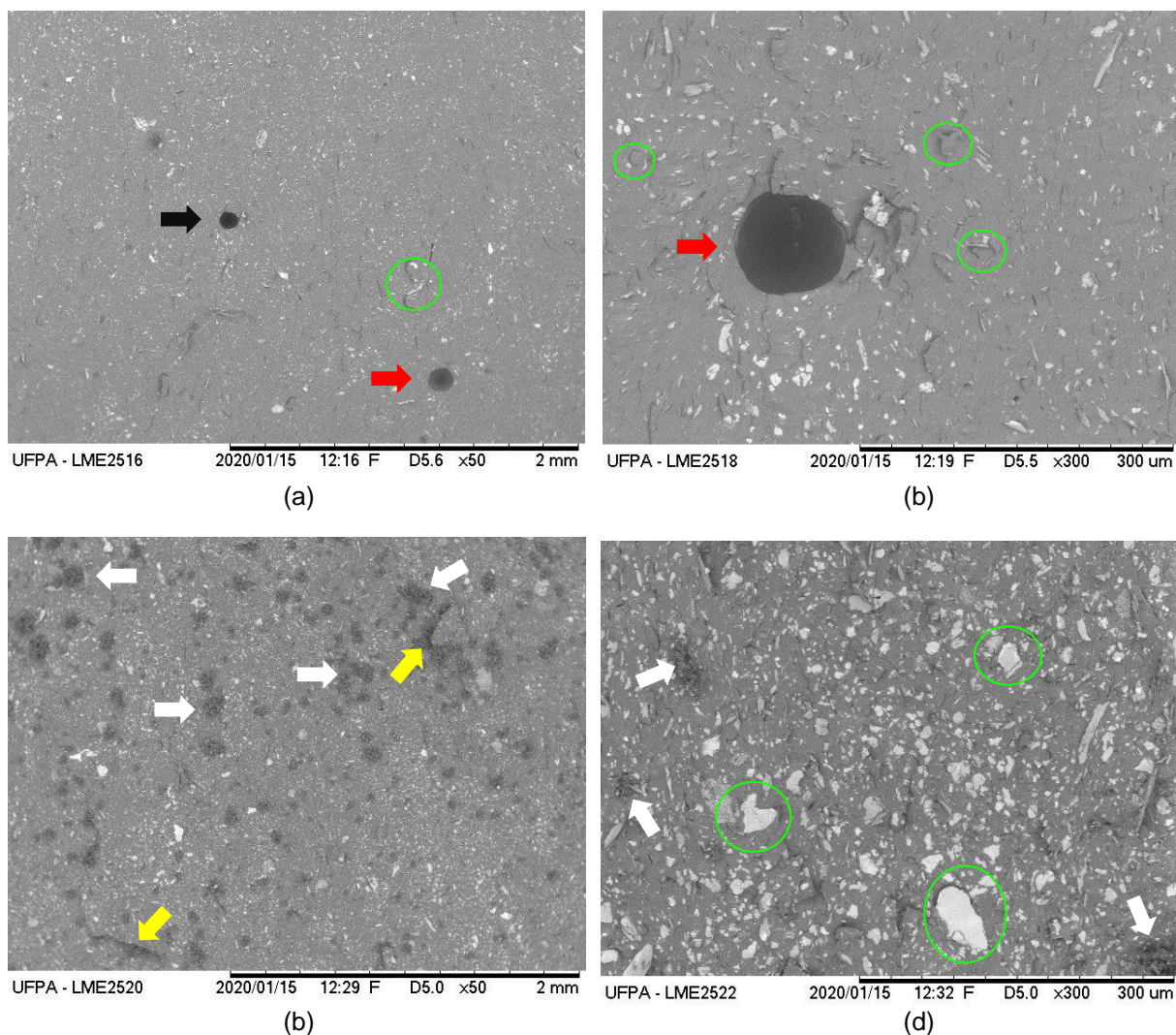
4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

4.3.1 Análise da superfície de fratura dos compósitos com resíduo de caulim

Através da análise da superfície de fratura de um material realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), pode-se visualizar e analisar a presença de imperfeições como vazios, bolhas, trincas e relacioná-las aos mecanismos de falha e suas causas. Pode-se observar também a dispersão e sedimentação do resíduo na matriz, além do estudo de propagação de trincas.

A Figura 4.7 apresenta a microscopia da superfície de fratura dos compósitos com 10 e 20 % de resíduo de caulim após os ensaios de impacto, onde constam os mecanismos de falha predominantes.

Figura 4.7 – MEV dos compósitos com resíduo de caulim: (a) 10 %, (b) 10 %, (c) 20 % e (d) 20 %



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

As superfícies de fratura apresentaram fratura plana, o que caracteriza uma fratura frágil e, no compósito com 10 % de resíduo de caulim, nota-se a presença de vazios em 4.7 (a) indicado pela seta preta e a formação de bolhas, a qual se tornou ainda mais evidente em 4.7 (b) indicada pela seta vermelha, além de pequenas irregularidades ou microcavidades (circuladas em verde) presentes por toda a estrutura. Essas imperfeições interferem diretamente na resistência ao impacto do material de modo a reduzi-la em função da quantidade das imperfeições, visto que as

fraturas ocorrem preferencialmente nessas regiões por intermédio do surgimento e propagação de trincas (COSTA, 2016). Por outro lado, ainda para o compósito com 10 % de resíduo, nota-se regiões com boa dispersão do resíduo, o que causa aumento da resistência ao impacto do material.

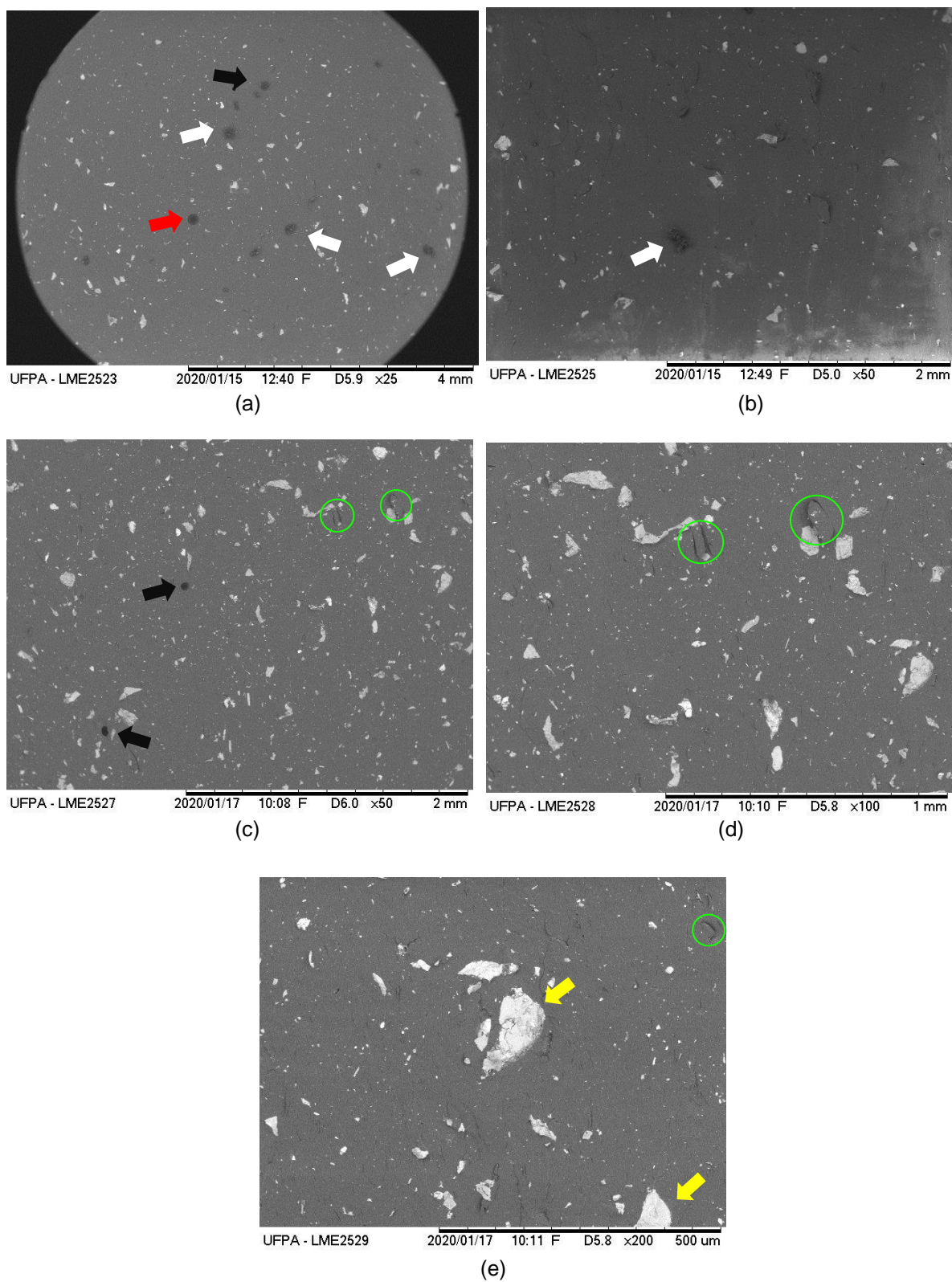
Nos compósitos com 20 % de RCA indicados por 4.7 (c) e 4.7 (d), nota-se a presença de pequenas trincas (indicadas pelas setas amarelas) e a formação de algumas imperfeições (indicados pelas setas brancas) na superfície que podem ter sido geradas por agregados de partículas, o que influencia negativamente na absorção de energia do material. Os agregados se fizeram presentes no trabalho de Cunha (2015), no qual a formação de agregados de lama vermelha diminuiu conforme a inserção de resíduo na matriz. Somado a isso, observa-se a existência de alguns aglomerados de resíduos com morfologias diferentes da maioria, os quais geralmente são formados durante o processo de homogeneização da mistura. Para Moraes (2019) as dimensões e os formatos das partículas podem influenciar na formação de aglomerados, cuja presença pode interferir na distribuição das tensões internas e elevar a porosidade no compósito.

Em contrapartida, observa-se que mesmo com o aumento na fração mássica de resíduo, não ocorreu sedimentação do mesmo na matriz, mas sim um aumento na dispersão do particulado, resultando em uma melhor compactação e, conseqüentemente, contribuição para o aumento da resistência ao impacto do material.

4.3.2 Análise da superfície de fratura dos compósitos com resíduo de cobre sulfetado

A Figura 4.8 apresenta a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos compósitos com 10 % e 20 % de resíduo de cobre após os ensaios de impacto, onde constam os mecanismos de fratura predominantes no material.

Figura 4.8 – MEV dos compósitos com resíduo de cobre sulfetado: (a) 10 %, (b) 10 %, (c) 20 %, (d) 20 % e (e) 20 %



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

De acordo com a Figura 4.8, os materiais compósitos com resíduo de cobre apresentaram fratura plana, poucas imperfeições quando comparados aos com resíduo de caulim e ótima dispersão do resíduo na matriz. Dessa forma, de acordo com Farias (2019) e El Banna (2017), a boa dispersão é um fator que eleva a resistência mecânica do material, visto que uma boa homogeneização da fase particulada resulta em uma transferência de tensão mais efetiva da matriz para o particulado.

Com relação aos compósitos com 10 % de resíduo, em 4.8 (a) estão presentes vazios (indicado pela seta preta), algumas imperfeições na estrutura (indicadas pelas setas brancas) e a presença de bolhas (seta vermelha). Essas imperfeições levam à fragilização da estrutura e, conseqüentemente, diminuem a resistência ao impacto do compósito.

Para os compósitos com 20 % de resíduo, observa-se também em 4.8 (c) alguns vazios (setas pretas), algumas irregularidades (circuladas em verde) presentes também em 4.8 (d). Na imagem 4.8 (e), nota-se a presença de aglomerados de resíduos que são formados, geralmente, durante o processo de homogeneização na confecção dos compósitos. Esta situação foi observada por Farias (2019) ao estudar a inserção de resíduo de lama vermelha em matriz poliéster e expõe que esses aglomerados se tornam concentradores de tensão que interferem negativamente no desempenho mecânico do material.

4.4 Ensaio de flamabilidade

Os dados obtidos no ensaio de flamabilidade horizontal estão apresentados na Tabela 4.5, onde consta o tempo de queima, a taxa de propagação da chama e a classificação do material de acordo com a inserção dos resíduos de cobre e caulim na matriz. Somado a isso, para a realização e análise deste ensaio, foi utilizada a norma ASTM D 635–18 e a resolução Nº 498 de 2014 do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) para aplicação em revestimentos internos da indústria automobilística.

Tabela 4.5 – Dados obtidos no ensaio de resistência a chama da matriz plena e dos compósitos com resíduos de cobre sulfetado e caulim.

Compósitos	Tempo (s)	Taxa de queima (mm/min)	Queima total	Classificação
MP	203,28	23,81	Sim	HB
RCU-10	322,91	14,51	Sim	HB
RCU-20	266,23	19,82	Sim	HB
RCU-30	307,44	14,81	Sim	HB
RCU-40	266,92	22,31	Sim	HB
RCA-10	298,92	14,51	Sim	HB
RCA-20	291,75	17,12	Sim	HB
RCA-30	305,27	14,81	Sim	HB
RCA-40	314,84	17,12	Sim	HB

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Embora as matrizes poliméricas, no geral, não sejam recomendadas para aplicações em meios de maior probabilidade de ocorrência de incêndios, a matriz poliéster utilizada na fabricação dos compósitos se mostrou adequada visto que apresentou taxa de propagação de 23,81 mm/min, consideravelmente menor que o patamar de 40 mm/min exigido pela norma ASTM D 635-18, ou seja, 40,48 % menor que a taxa exigida.

Ademais, observa-se que a inserção dos resíduos na matriz foi satisfatória visto que, embora algumas formulações (40 % de resíduo de cobre) tenham apresentado taxa de queima muito próxima da matriz, no geral, todos os valores se mostraram menores em comparação com a mesma. Além disso, todos os compósitos fabricados tiveram queima completa e se enquadram na classificação HB, pois apresentam taxa de queima inferior à 40 mm/min.

Para os compósitos com resíduo de cobre, obteve-se resultados satisfatórios e as composições com 10 % e 30 % de resíduo se destacaram por apresentar menor taxa de propagação, o que representa uma redução de, respectivamente, 39,21 % e

37,79 % quando comparado com a matriz plena. Nesse sentido, a resistência à chama desses materiais pode estar relacionada à composição química e às fases que constituem o resíduo utilizado.

De acordo com Moraes (2019) a morfologia das partículas dos minerais causam diferentes interações físicas durante a difusão do oxigênio, um elemento primordial no processo de difusão. Com relação ao resíduo de cobre, El Banna (2017) ao realizar uma análise da composição mineralógica do mesmo por meio de difração de raios-x, destacou a presença de muscovita e menciona ser um composto bastante utilizado como retardante de chama.

Os compósitos com resíduo de caulim, no geral, apresentaram os menores valores de taxa de propagação e, as composições com 10 % e 30 % se destacaram pelos dois menores valores (39,21 % e 37,79 %) quando comparado com a matriz plena. Diante desse contexto, segundo Moraes (2019) e Almeida (2020), a redução da taxa de queima pode estar ligada à morfologia do material em questão e, no caso do resíduo de caulim, por apresentar em sua composição grande quantidade de caulinita, um obstáculo físico é criado pelo seu arranjo lamelar, o que impede a difusão do oxigênio para o meio reativo, diminuindo a troca de calor e a liberação de gases inflamáveis, causando uma redução na propagação da chama.

De acordo com a resolução de nº 498 de 2014 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN-14) é recomendado que os revestimentos internos do setor da indústria automobilística apresentem taxa de propagação de chama máxima de 100 mm/min. Seguindo este parâmetro e a norma ASTM D 635-18, os compósitos fabricados neste trabalho se adequam para tais aplicações, visto que apresentaram valores menores que o patamar descrito pelas normas.

A Tabela 4.6 expõe um comparativo dos compósitos que apresentaram melhores resultados quanto à taxa de propagação de chama neste trabalho com trabalhos encontrados na literatura com outros resíduos, além de apresentar ainda um comparativo com os parâmetros exigidos pelas normas.

Tabela 4.6 – Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho com as normas exigidas e com trabalhos semelhantes encontrados na literatura.

Composição/Normas	Taxa de propagação (mm/min)	FONTE
10 % de Resíduo de Cobre sulfetado	14,51	Este trabalho
10 % de Resíduo de Caulim	14,51	Este trabalho
10 % de Cinza Volante	18,61	Costa (2016)
10 % de Resíduo de minério de Ferro	21,42	Almeida (2020)
10 % de Lama Vermelha	14,85	Santos (2020)
10 % de Resíduo de Mármore e Granito	20,94	Barbosa (2021)
-	100	CONTRAN 498-14
-	40	ASTM D 635-18

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

De acordo com os dados apresentados, nota-se que tanto os materiais fabricados nesse trabalho quanto os encontrados na literatura, apresentaram resultados satisfatórios uma vez que a taxa de queima se mostrou menor que o máximo exigido pelas normas e se enquadram na classificação HB, o que indica o efeito positivo da inserção de resíduos em matriz poliéster.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Os resíduos de caulim e cobre sulfetado como carga em compósitos de matriz poliéster provocou, no geral, influência nas propriedades físicas, mecânicas e de flamabilidade desses materiais. Ademais, a técnica de fabricação utilizada gerou materiais com ótima dispersão das partículas na matriz e boa homogeneidade, o que torna viável o método *hand lay-up*.

Nos ensaios físicos, para os compósitos com resíduo de caulim a absorção de água e porosidade aparente diminuíram com a inserção de resíduo, destacando-se o RCA – 40 com uma redução de 48,39 % e 47,76 % respectivamente. Já os compósitos com resíduo de cobre, apresentaram valores menores e mais próximos aos da matriz plena, em destaque o RCA – 30 com 32 % de redução em absorção de água e 13,33 % em porosidade aparente. A massa específica aparente dos materiais aumentou com a inserção dos dois resíduos na matriz.

A resistência ao impacto, no geral, se apresentou maior que a matriz plena, porém com valores muito próximos, ou seja, os resultados se mostraram estáveis quanto a resistência ao impacto. Com a análise fractográfica, observou-se a relação entre a resistência ao impacto com os mecanismos de falha presentes nas superfícies de fratura por meio das imperfeições e a relação da resistência com a dispersão dos resíduos na matriz de acordo com o aumento das frações mássicas.

No ensaio de flamabilidade, todos os compósitos fabricados apresentaram classificação HB e considerados resistentes à chama, além de que os materiais com 10 % de resíduo apresentaram os melhores resultados em taxa de propagação. A partir da resolução de N° 498 do CONTRAN–14, os compósitos apresentaram taxas consideravelmente menores que o máximo exigido, sendo as formulações RCA-10 e RCU-10 obtiveram uma redução de 85,49 %.

Dessa forma, as análises realizadas neste trabalho tornou a incorporação desses resíduos industriais em materiais compósitos uma alternativa viável para promover o reaproveitamento desses resíduos, visto que os mesmos são produzidos em grandes quantidades, não apresentam utilidade industrial e são considerados elementos de alto risco para o meio ambiente por conter muitos agentes poluentes em sua composição.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Investigar a influência de diferentes granulometrias dos resíduos utilizados nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.
- Estudar a inserção de fibras sintéticas para elaboração de compósitos híbridos com os mesmos resíduos para verificar os efeitos nas caracterizações físicas, mecânicas e de flamabilidade.
- Estudar a inserção dos resíduos de caulim e cobre em outras matrizes poliméricas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, K. M.; CASTRO, N. F.; VIDAL, F. W. H. Estudo de caracterização e beneficiamento de resíduo de caulim. SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE, nº 4, 2016, João Pessoa. **Anais** [...] João Pessoa: Centro de Tecnologia Mineral, 2016.

ALMEIDA, L. R. Reaproveitamento do resíduo de minério de ferro em compósitos de matriz polimérica. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

ASKELAND, D. R.; WRIGH, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ASKELAND, D. R.; WRIGH, W. J. **The science and engineering of materials**. 7ª ed. Boston: Cengage Learning, 2016. 870 p.

ASTM D 6110-18 "Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2018.

ASTM D 635-18 – "Standard Test Method for Rate of Burnin or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position". Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2018.

ASTM D 1984 - 1969 (1992) "Standard Specification for Tall Oil Fatty Acids", ASTM International, West Conshohocken, 1992.

BARATA, M. S. *et al.* Kaolin mining waste to produce geopolymers: Physicomechanical properties and susceptibility to efflorescence formation. **Case studies in construction materials**. v. 16, 2022.

BARBOSA, K. S. L. Influência granulométrica de partículas de rejeito mineral e adição de fibras vegetais nas propriedades dos compósitos poliméricos. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

BARBOSA, K. S. L. *et al.* Efeito da adição do resíduo de mármore e granito com fibras de sisal nas propriedades de compósitos poliméricos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p.7653-7667, feb. 2020.

BECK, D.; BOEIRA, A. P. **Tecnologia dos materiais**. Passo Fundo: Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, 2007. 93 p.

BELARMINO, D. D. *et al.* Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (PALF). **HOLOS**. v. 1, p. 115-126, 2013.

BELTRÃO, S. L. D., *et al.* Kaolin residue as an alternative binder for grout seat and revetment. **Materials Science Forum**. v. 775-776, p. 653-658, jan. 2014.

CAETANO, M. J. L. **Flamabilidade: ensaios de resistência à chama**. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-termicas/flamabilidade/ensaios-de-resistencia-a-chama/> . Acesso em: 26 abr. 2022.

CALLISTER, JR. W.; RETHWISCH, D. **Ciência e tecnologia de materiais: Uma introdução**. 10^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. 864 p.

CAMPOS, J. C. B.; OLIVEIRA, B. M.; SOUSA, C. A. F. Panorama do gerenciamento dos Resíduos Sólidos no Brasil e no Nordeste após a implementação do PNRS. **ANAP Brasil**. v. 9, n. 15, 2016.

CANEVAROLO, S. V. JR. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos engenheiros. 2^a ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CAVALEIRO, J. M. H. Fabrico e maquinação de compósitos de matriz polimérica com fibras curtas. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Design e Produto) – Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2018.

CHAVES, A. C. *et al.* Characterization of kaolin residues from the jarí valley reservations provided by Cadam S/A Company. **Materials Science Forum**. v. 930, p. 14-19, set. 2018.

CHIRAYIL, C. J.; HOSUR, M.; THOMAS, S. **Unsaturated polyester resins: Fundamentals, design, fabrication, and applications**. 1^a ed. Elsevier, 2019.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). **Resolução nº. 498** - "Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos automotores nacionais e importados." 29 de julho de 2014.

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

COSTA, L. C. F. Obtenção e estudo de um compósito de matriz de poliéster e carga de resíduos de mármore. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

CUNHA, S. *et al.* Cobre: Produção industrial e aplicações. **Química nova**. v. 42, nº 10, p. 1154-1161, 2019.

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). 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

DIAGNÓSTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS. Brasília: IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2012. 67 p.

DUBEY, S. C.; MISHRA, V.; SHARMA, A. A review on polymer composite with waste material as reinforcement. **Materials today: Proceedings**. v. 47, part 11, p. 2846-2851. mar. 2021.

EL BANNA, W. R., Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (*Musa Sapientum*, *Musacae*). 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais - PRODERNA) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

FARIAS, D. C. Compósitos híbridos com fibras de bambu (*bambusa vulgaris*) e lama vermelha: efeito do tratamento químico na resistência à tração dos compósitos. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

GARCIA, A.; SANTOS, C. A.; SPIM, J. A. **Ensaio dos materiais**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p.

GIRGE, A., *et al.* Industrial waste filled polymer composites – A review. **Materials Today: Proceedings**. v. 47, nº 11, p. 2852-2863, 2021.

HASHEMI, J.; SMITH, W. F. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5ª ed. Porto Alegre: LTDA, 2012. 691 p.

HEJNA, A., *et al.* Copper Slag as a potential waste filler for polyethylene-based composites manufacturing. **Tanzania Journal of Science**. v. 47, nº 2, p. 405-420, 2021.

IMERYS BRASIL. **Minas de extração de caulim**. Disponível em: <https://www.imerys.com/pt-br/brasil>. Acesso em: 15 mar. 2022.

JESUS, W. B. S., *et al.* Resíduos industriais em compósitos: caracterização física e de impacto. **Engenharia do século XXI**. v. 22, p. 57-63, 2021.

KATO, R. B. Aplicação do resíduo da mineração de cobre para melhoria do desempenho de misturas asfálticas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil (REEC)**. v. 14, nº 1, p. 16-24, 2018.

MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. S. F.; MORAIS, A. B. **Materiais compósitos: Materiais, fabrico e comportamento mecânico**. 2ª ed. Porto: Publindústria, 2010.

MÄHLMANN, C. M.; MÜLLER, F.; SCHEEREN, D. Avaliação das propriedades de um compósito de matriz de polipropileno reciclado reforçado com resíduo de madeira. **Tecno-Lógica**. v. 24, nº 2, p. 132-141, 2020.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e tecnologia**. 1ª ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2011. 329 p.

MELO, A. J. L. Avaliação da estrutura de tecidos técnicos como elemento reforçante em compósitos poliméricos sistema poliéster isoftálico. 2013. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

MORAES, M. H. M. Caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica com adição de resíduos sólidos industriais. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

MOROZOV, E. V.; VASILIEV, V.V. **Mechanics and analysis of composite materials**. 1ª ed. Kidlington: Elsevier Science, 2001.

MURRAY, H. **Applied clay mineralogy**: occurrences, processing and applications of kaolins, bentonites, palygorskitesepiolite and common clays. 1ª ed. v. 2. Elsevier Science, 2006. 188 p.

OLIVEIRA, D. M.; SILVA, I. G.; SOBRAL, L. G. S. **Pré-requisitos para extração de metais de base a partir de rejeitos de minérios oxidados**: O caso do rejeito de minério de cobre. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 2020.

PEREIRA, W.A., *et al.* Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti. **Revista Matéria**, v.26, n.1, 2021.

PINHEIRO FILHO, J. F. H. Obtenção e caracterização de um compósito de matriz de resina poliéster e gesso. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

RAKESH, P.K.; RANAKOTI, L. Physio-mechanical characterization of tasar silk waste/jute fiber hybrid composite. **Composites Communications**, v. 22, 100526, 2020.

SANTOS, A. J. G. Caracterização de material compósito incorporado com fibras de bambu (*bambusa vulgaris*) e resíduos sólidos industriais para utilização como componente estrutural para a construção civil. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

SANTOS, P. S, **Ciência e tecnologia de argilas**. 2.ed. Edgard Blücher, 408 p. v. 1, 1989.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SILVA, E. J. Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito com resina poliéster e carga de pó de cimento. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

SUMÁRIO MINERAL. Brasília: DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral, v. 34, 2014. 152 p.

TAVARES, J. F. S. Estudo da incorporação do resíduo industrial de caulim em compósitos de matriz polimérica. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Bacharela em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

TORRES, R. B. Desenvolvimento de compósito híbrido de fibra de vidro e micropartículas de sílica e cimento para uso em caneleiras. 2013. Dissertação. (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João Del-Rei, São Del-Rei, 2013.

VALE S. A. **Mineração:** Cobre. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/copper/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 26 mar. 2022.

WANG, Ru-Min; ZHENG, Shui-Rong ; ZHENG, Ya-Ping. **Polymer matrix composites and technology**. Beijin: Science Press, 2011.