

CAPÍTULO 4

COMPÓSITOS DE BASE POLIMÉRICA COM RESÍDUOS DE COBRE: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS



<https://doi.org/10.22533/at.ed.152152503024>

Data de aceite: 13/02/2025

Jennifer Ferreira Fernandes

Universidade Federal do Pará, faculdade de Engenharia de Materiais, Ananindeua – Pará
<http://lattes.cnpq.br/1870190983115933>

Emerson Cardoso Rodrigues

Universidade Federal do Pará, Doutor em Engenharia de Recursos Naturais, Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/7459428211048580>

Yan Christian Silva de Araújo

Universidade Federal do Pará, faculdade de Engenharia de Materiais, Ananindeua – Pará
<http://lattes.cnpq.br/5136415587850242>

Deibson Silva da Costa

Universidade Federal do Pará, Doutor em Engenharia de Recursos Naturais, Ananindeua – Pará
<http://lattes.cnpq.br/1521124351431087>

Ana Paula Souza de Sousa

Universidade Federal do Pará, Mestra em Engenharia Química, Belém - Pará
<http://lattes.cnpq.br/9161169241736758>

Haianny Beatriz Saraiva Lima

Universidade Federal do Pará, Mestra em Engenharia Química, Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/1714688542542658>

Alessandro José Gomes dos Santos

Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/4473253556335182>

Diego Cardoso Estumano

Universidade Federal do Pará, Doutor em Engenharia Mecânica, Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/5521162828533153>

RESUMO: O presente trabalho, tem como objetivo promover uma possível utilização para os resíduos de cobre sulfetado utilizando a fração mássica de 10% e 20% em matriz polimérica. Utilizou-se para a matriz polimérica um acelerador de Cobalto na proporção 1,5% v/v, iniciador BUTANOX M-50 e a resina poliéster. Para a fabricação adotou-se o método manual (*hand lay-up*) e realizou-se o vazamento com 10% de cobre, 20% de cobre e matriz plena. Após a cura dos compósitos, foi realizado os ensaios físicos que seguiram a norma ASTM D1984-92 para determinar propriedades de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) e para o ensaio de impacto adotou-se a norma ASTM

D6110-18. Nos ensaios físicos, os compósitos não apresentaram resultados significativamente distinto da matriz de poliéster, porém teve uma diminuição na AA e na PA e MEA um aumento de acordo com a adição do cobre sulfetado na matriz. No ensaio de impacto o compósito atuou como reforço, alcançando um aumento de 22,29% em relação a matriz polimérica.

PALAVRAS-CHAVE: Compósito polimérico; resíduo industrial; fabricação manual.

POLYMER-BASED COMPOSITES WITH COPPER WASTE: EVALUATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

ABSTRACT: The present work aims to promote a potential application for sulfide copper residues by incorporating mass fractions of 10% and 20% into a polymeric matrix. The polymeric matrix was prepared using a cobalt accelerator at a concentration of 1.5% v/v, the BUTANOX M-50 initiator, and polyester resin. The fabrication process followed the manual hand lay-up method, and casting was performed with 10% copper, 20% copper, and a pure matrix. After curing the composites, physical tests were conducted according to ASTM D1984-92 to determine water absorption (WA), apparent porosity (AP), and apparent specific mass (ASM). For the impact test, ASTM D6110-18 was adopted. In the physical tests, the composites did not show significantly different results compared to the polyester matrix. However, there was a decrease in WA and AP, while ASM increased according to the addition of sulfide copper in the matrix. In the impact test, the composite acted as reinforcement, achieving a 22.29% increase compared to the polymeric matrix.

KEYWORDS: Polymeric composite; industrial residue; manual fabrication.

INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento do setor industrial ocorrido nas últimas décadas tem sido um dos principais responsáveis pela contaminação das águas, solos e subsolos. Assim, a negligencia no tratamento antes de dar um destino final ao resíduo sendo por falta de compreensão e/ou instrução no determinado assunto (Dalpasquale; Fukamachi; Ferreira, 2011).

O problema decorrente da exploração de minas e a ocupação de áreas com barragens para depositar a céu aberto o resíduo de cobre sulfetado, pode contaminar o meio ambiente no momento do rompimento, ocasionado devido ao acúmulo comumente avaliado em milhares de toneladas por ano. Devido à baixa pureza desse material, sua recuperação direta não é viável. Como alternativa, uma solução promissora é a incorporação desses rejeitos na produção de compósitos (Carvalho, 2015).

Tais materiais possibilitam uma busca para serem reaproveitados e surgir novos compósitos com propriedades diferentes. Logo, o material pode ter fases dispersa e a matriz e ser por um material cerâmico, metálico ou polimérico. Esses materiais formados de duas ou mais fases podem ser classificados de acordo com o tipo de reforço sendo: compósitos fibras, compósitos com partículas, compósitos estruturais e nanocompósitos (Callister; Rethwisch, 2020).

O trabalho objetivou fabricar compósitos de matriz polimérica com 10% e 20% de fração mássica dos resíduos de caulim para a análise das propriedades físicas e mecânico de impacto Charpy, posteriormente, averiguar a fratura do compósito.

METODOLOGIA

O material polimérico usado foi a resina poliéster isoftálica de nome comercial AM 910 AEROJET tem boa resistência química, baixa viscosidade, possui uma cor amarelada, média reatividade, baixa viscosidade, densidade de 1,15 g/cm³, um 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 na proporção de 1% v/v com finalidade no sistema de formação de reticulação.

O resíduo de cobre sulfetado, foi fornecido pela empresa VALE S.A, a qual obtém o minério da Mina do Sossego em Canaã dos Carajás. O resíduo foi levado para secagem por 24 horas em uma estufa, logo, houve um processo de peneiramento com peneira de 100 mesh da série Tyler. Foram determinados as massas e levados novamente para estufa de circulação para extração de umidade em temperatura de 105 °C durante 30 minutos.

Para fabricação dos corpos de prova dos ensaios físicos, adicionou-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 para facilitar a remoção do material do molde. Logo, ocorreu a fabricação pelo método manual *hand lay-up*. A mistura foi vazada no molde metálico. Adotou-se a norma ASTM D 1984-92 para os ensaios físicos as amostras foram cortadas no tamanho 25 mm x 25 mm x 2,7 mm e colocadas em uma bandeja durante 24 horas na estufa para a obtenção da massa seca, deixadas em água destilada durante 24h para determinação da massa úmida e para a massa imersa foi montado um aparato para a medição das amostras na balança de precisão, com o intuito de calcular as propriedades de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA).

Para a fabricação dos corpos de prova do ensaio de impacto a mistura foi posta em um molde de silicone e seguiu a norma ASTM D 6110-18, foram utilizados 8 corpos de prova para cada série, com dimensões de 80 mm x 12,7 mm x 10 mm. Logo, foi realizada por intermédio do equipamento a obtenção da resistência ao impacto Charpy, o qual é chamado de testador de impacto de pêndulo do fabricante Gunt Hamburg 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.

A análise fractográfica da fratura foi realizada pelo MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) em um equipamento do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da UFPA e também do Laboratório de Materiais do Instituto Federal do Pará (IFPA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaios Físicos

Os resultados evidenciados na Tabela 1, são 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 10% e 20% dos resíduos de cobre sulfetado.

Fração Mássica (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)
Matriz Plena	0,25 ± (0,03)	0,30 ± (0,04)	1,20 ± (0,09)
10	0,25 ± (0,04)	0,32 ± (0,05)	1,27 ± (0,07)
20	0,24 ± (0,04)	0,34 ± (0,06)	1,36 ± (0,07)

Tabela 1 – Resultados dos ensaios físicos da matriz plena e de 10% e 20% com adição do resíduo de cobre sulfetado

Fonte: Autores, 2025

Na Tabela 1 nota-se que quando adiciona o resíduo de cobre, ocorre uma redução na absorção de água (AA), pode-se constatar isto observando a mínima diferença entre os valores dos ensaios o que está relacionado com a boa homogeneização da mistura. Todavia, os compósitos com 20% em massa de resíduo de cobre apresentaram uma porosidade aparente (PA) 13,33% menor do que a matriz plena, o que reforça a hipótese de que o aumento da PA nas demais formulações está relacionado ao método de fabricação. Conforme El Banna (2017), a destruição de cobre sulfetado não possui características hidrofílicas e, em seu estudo, a porosidade aparente dos compósitos contendo essa explicação apresentou uma redução superior a 50% em relação à matriz plena. Os valores da massa específica aparente, aumentam de acordo com a incorporação de resíduos de cobre sulfeto e obedecem a regra das misturas (Callister, Rethwisch, 2020).

Ensaio de Impacto

Os resultados da Tabela 2, mostra os dados da resistência ao impacto da matriz plena e dos compósitos de acordo com adição de resíduo de cobre sulfetado.

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

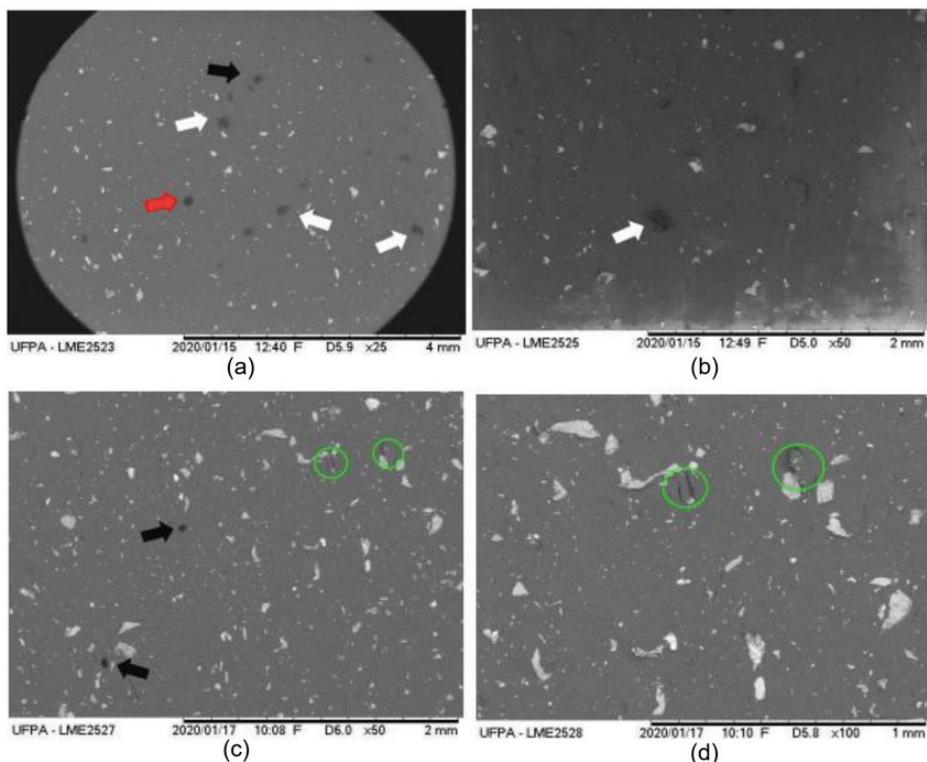
Tabela 2 – Resistência ao impacto com 10% e 20% de cobre sulfetado e a matriz

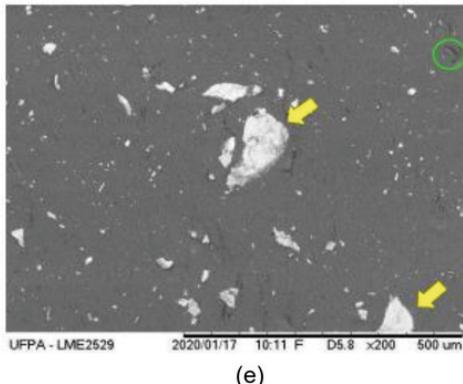
Fonte: Autores, 2025

Na Tabela 2, observa-se que a inserção de resíduo na matriz manteve os resultados estáveis. Apesar de os resultados demonstrarem semelhança, identifica-se um pequeno aumento nos valores de resistência ao impacto, o compósito de 10% de resíduo de cobre alcançou 22,29% em relação à matriz plena. Com o aumento da fração mássica na matriz, cresce possivelmente material os vazios no compósito e as imperfeições formadas como, bolhas, trincas e outros influenciam diretamente nos resultados de resistência ao impacto de um compósito. Dessa forma, a fratura ocorre preferencialmente nesses pontos de fragilização por meio de propagação de trincas dos compósitos, durante uma solicitação mecânica (Costa, 2017). O ensaio de impacto Charpy em compósitos de matriz poliéster foi realizado 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 (Pinheiro Filho, 2018).

Análise Fractográfica

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) representada na Figura 1, nota-se que a superfície de fratura dos compósitos com 10% e 20% de resíduo de cobre sulfetado após os ensaios de impacto.





(e)

Figura 1 - MEV dos compósitos com resíduo de cobre sulfetado: (a) 10%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 20% e (e) 20%

Fonte: Autores, 2025

Os materiais compósitos com resíduo de cobre exibidos fratura plana, mostrados na Figura 1, de acordo com Farias (2019) e El Banna (2017), a boa dispersão é um fator que aumenta a resistência mecânica do material, com homogeneização boa da fase particulada resulta em uma transferência de tensão maior que da matriz para o particulado. Com relação aos compósitos com 10% de resíduo 1 (a) estão presentes vazios (indicado pela seta preta), algumas imperfeições na estrutura (indicadas pelas setas brancas) e a presença de bolhas (seta vermelha). Na qual as imperfeições levam à fragilização da estrutura e diminuem a resistência ao impacto do compósito. Para os compósitos com 20% de resíduo, notou-se na 1 (c) alguns vazios (setas pretas), algumas irregularidades (circuladas em verde) presentes também em 1 (d). porém em 1 (e), apresentou a presença de aglomerados de resíduos que são formados, que durante o processo de homogeneização na confecção dos compósitos.

Logo, a situação foi observada e estudada a inserção de resíduo de lama vermelha em matriz poliéster e expõe que os aglomerados que se tornam concentradores de tensão que interfere de forma desfavorável no material mecânico do compósito (Farias, 2019).

CONCLUSÃO

O resíduo de cobre sulfetado como carga em compósitos de matriz poliéster provocou, no geral, influência nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Assim, os compósitos com resíduo de cobre, nos ensaios físicos, apresentam valores próximos aos da matriz plena, de forma que a PA com a adição de 10% e 20% de resíduos de cobre sulfetado, respectivamente, sugerindo que aumentou de acordo com o acréscimo de resíduos. Na MEA aumentou está de acordo com a regra de mistura, principalmente no compósito com 20% de resíduos, alcançando em de $0,16 \text{ g/cm}^3$.

A resistência ao impacto dos compósitos, no geral, foi maior que a matriz plena, com o destaque para o compósito com 10% de resíduo de cobre, onde esse aumento na resistência é de aproximadamente 22,29%.

Dante disso, as análises realizadas nesse artigo, revelaram que a adição de cobre sulfetado reforçou as propriedades da matriz de poliéster, tornando-se, uma alternativa de reaproveitamento desses resíduos.

REFERÊNCIAS

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

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

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

CARVALHO, M.C, SABOIA, R.P., Sugestão de um modelo cinético para lixiviação de cobre oxidado em tanques e em colunas. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. 2015.

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.

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

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, Musaceae*). 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.

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.

SOUZA, A. P. S. 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 (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, 2022.

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