



ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE COBRE

Souza, J.M.¹; Silva, I.A.¹; Gomes, L.V.¹; Rodrigues, E. C.¹; Costa, D.S.²;
Estumano, D.C.¹; Costa, D.S.³;

¹Universidade Federal do Pará – Campus Belém, FEQ, UFPA. Rua Augusto Corrêa, 01-Guamá. CEP:66075-110; Belém, Pará- Brasil. ²Universidade Federal do Sul e do Sudeste- Marabá, UNIFESSPA. ³ Universidade Federal do Pará- Campus Ananindeua, FEMat, UFPA.

E-mail para contato: Jamilymartins1p@gmail.com

RESUMO

Em 2023, o Brasil produziu 326 milhões de toneladas de minério de cobre destinadas à exportação. No entanto, essa produção gerou uma grande quantidade de resíduos, que frequentemente são descartados de forma inadequada, resultando em diversos problemas ambientais. Este estudo propõe desenvolver compósitos, reutilizando o resíduo de minério de cobre para reduzir esses impactos. Para tal, o resíduo foi submetido a tratamentos para análises granulométricas e mineralógicas por Difratorômetro de Raios X. Em seguida, o resíduo em proporções em massa de 10%, 20% e 30%, foi incorporado à resina poliéster juntamente com acelerador de cobalto e iniciador de cura, e submetido ao ensaio de flamabilidade. A análise de flamabilidade, conforme a norma ASTM D 635, revelou que os compósitos apresentaram boa resistência à chama. Em particular, o compósito com 20% de resíduo obteve uma redução de 41% em relação ao padrão da ASTM D 635. Esses resultados indicam que os compósitos desenvolvidos são promissores pela resistência ao fogo, contribuindo significativamente para a redução de resíduos e a fomentação de tecnologias mais sustentáveis.

Palavras chaves: Resistência à chama, Particulados, Flamabilidade.

INTRODUÇÃO

Em 2023, o Brasil produziu 326 milhões de toneladas de minério de cobre destinadas à exportação, registrando um aumento de cerca de 4,3% em relação a 2022. Para essa alta produção é utilizada a técnica de flotação, que é fundamental para a concentração do cobre. Entretanto, essa técnica resulta na geração de uma quantidade significativa de resíduos sem valor econômico, que são frequentemente descartados de maneira inadequada, ocasionando diversos problemas ambientais (1).

Diante desse cenário, surge a necessidade de mais pesquisas voltadas para a reutilização desses resíduos. Nesse contexto, a produção de materiais compósitos com matriz polimérica apresenta-se como uma alternativa promissora para o reaproveitamento desses resíduos. Os materiais compósitos combinam diferentes matérias para obter propriedade superiores, envolvendo uma fase matriz (que pode ser cerâmica, metálica ou polimérica) e uma fase de reforço, na qual os resíduos podem ser reutilizados (2).

Este trabalho visa produzir compósitos de matriz polimérica utilizando resíduos de minério de cobre e avaliar sua resistência ao fogo por meio do ensaio de flamabilidade horizontal. Além disso, busca-se que a produção contribua para a redução dos impactos causados pelo resíduo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Equipamentos Utilizados

A Figura 1 apresenta os equipamentos utilizados na realização deste trabalho, os quais foram fornecidos pelo Laboratório de Catálise e Biocatálise da faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, sendo estes em ordem de uso: estufa, peneira de 100 *mesh* da série *Tyler* e a balança analítica.

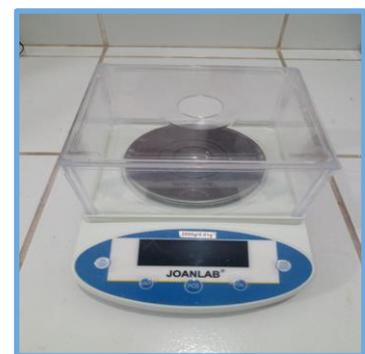
Figura 1: Equipamentos utilizados. estufa (a), peneira de 100 *mesh* da série *Tyler* (b), balança analítica (c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Os autores.

Materiais Utilizados

Matriz Polimérica

Foi utilizado a resina poliéster cristal como a matriz polimérica (MP). Para o sistema catalítico utilizou-se o acelerador de cobalto (CAT-MET) na proporção de 1,5% (v/v) e como iniciador de cura o BUTANOX M-50 (MEK-P) na proporção 1% (v/v).

Resíduo de Minério de Cobre

O resíduo de minério de cobre (RMC) utilizado neste trabalho foi fornecido pela empresa VALE S.A, obtido na etapa de flotação do beneficiamento do cobre na mina de Sossego, localizada na região de Canaã do Carajás no Estado do Pará. A Figura 2 exibe o resíduo antes do início do processo.

Figura 2: Resíduo de Minério de cobre.



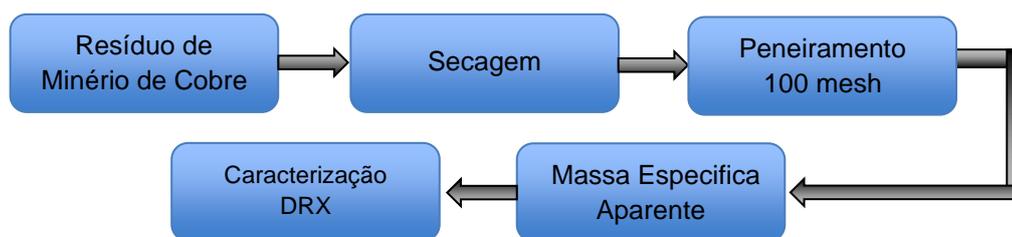
Fonte: Os Autores.

Procedimentos Experimentais

Preparação do Resíduo

O resíduo de minério de cobre, foi levado na estufa por 2h a uma temperatura de 100 °C para retirada da umidade. Logo após, o material passou por peneiramento com uma peneira de 100 *Mesh* (0,150 mm) para a classificação da granulometria. Uma parte do resíduo foi separada para calcular a massa específica aparente utilizando a técnica do picnômetro e realizar a análise de Difratômetro de Raio X (DRX). A Figura 3 apresenta um fluxograma com as principais etapas desse processo realizado nos resíduos antes da fabricação dos compósitos.

Figura 3: Fluxograma do processamento dos resíduos.



Fonte: Os Autores.

Determinação da Massa Específica

A massa específica aparente dos resíduos foi realizada pelo método do picnômetro. Esse método consiste em medir a massa do picnômetro vazio (M_1), massa do picnômetro + resíduo (M_2), massa do picnômetro + resíduo + água destilada (M_3), picnômetro + água destilada (M_4). Diante disso, foi calculada a massa específica aparente por meio da equação 1 abaixo.

$$MEA = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 + M_2) - (M_1 + M_3)} * \rho_{H_2O} \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (1)$$

Onde ρ_{H_2O} é tabelado de acordo com a temperatura da água destilada utilizada.

Caracterização Mineralógica por DRX

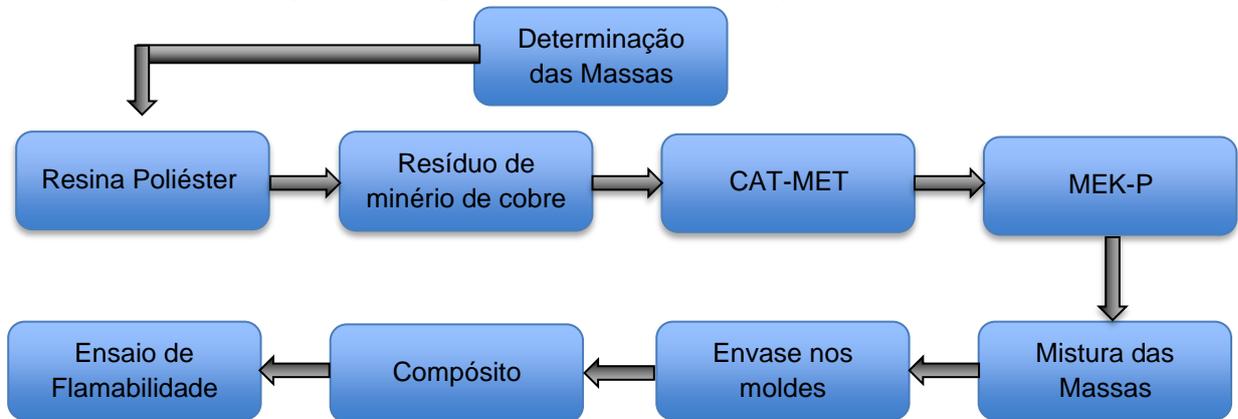
A caracterização mineralógica do resíduo de minério de cobre foi realizada pelo Laboratório de Caracterização Mineral do instituto de geologia, onde foi usado um Difratorômetro de Raios X (DRX), modelo EMPYREAN da PANalytical, com goniômetro θ - θ , tubo de raios X cerâmico e anodo de Co ($K\alpha_1 = 1,789010 \text{ \AA}$), com foco fino longo, e filtro $K\beta$ de Fe. O detector utilizado foi de área, do tipo PIXel3D 2x2, com abertura (active length) de 3,3473o 2 θ e 255 canais ativos. Com a finalidade de identificar as fases cristalinas presentes do material.

As condições de análise foram as seguintes: varredura de 5° a 75° 2 θ ; voltagem de 40kV e corrente de 35 mA; tamanho de passo de 0,02o 2 θ e 30s o tempo/passo; fenda divergente de 1/4° e anti espalhamento de 1/2°; máscara de 10mm. A aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore, ambos da PANalytical.

Fabricação dos Compósitos

A Fabricação foi realizada, utilizando o método manual (*hand lay-up*) sem compressão, na usina (USIMAT) da Universidade Federal do Pará. Com as seguintes proporções em massas: 10%, 20% e 30 de resíduo de minério de cobre. A Figura 4 apresenta o fluxograma do processo de produção dos compósitos.

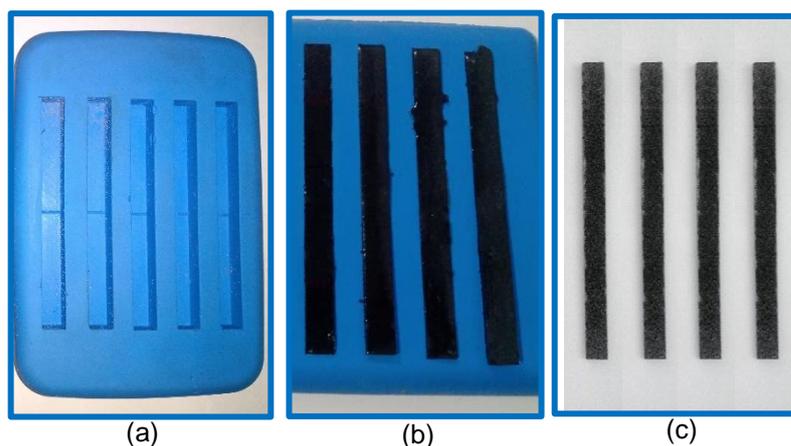
Figura 4: fluxograma do processo de produção dos compósitos.



Fonte: Os Autores.

Inicialmente o resíduo de minério de cobre (RMC) foi levado na estufa a 100°C por 20 minutos, para remover a umidade. Em seguida, as massas dos materiais foram calculadas de acordo com as especificações do ensaio. A preparação da mistura obedeceu a uma sequência precisa: resina, resíduo, CAT-MET (1,5% v/v) e MEK-P (1% v/v) onde cada componente foi misturado até total homogeneização para então serem transferidos para os moldes de silicone, sem compressão. A Figura 5 demonstra respectivamente o molde de silicone, a mistura após o envase e os compósitos após o tempo de cura (24 h).

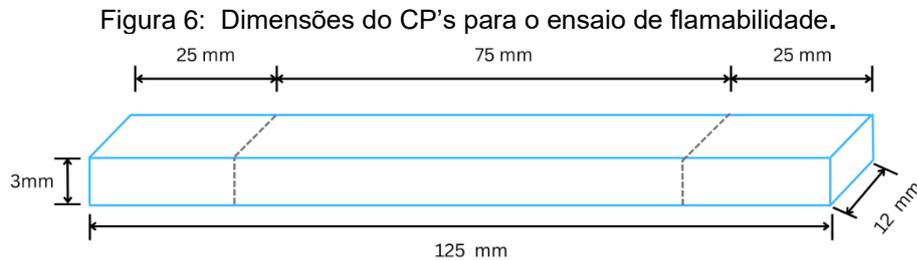
Figura 5: Molde de silicone(a); Mistura envasada no molde(b) e compósitos após o processo de cura (c).



Fonte: Os Autores.

Ensaio de Flamabilidade

O ensaio de flamabilidade foi realizado na Usina de Materiais (USIMAT) da Universidade Federal do Pará o qual seguiu os parâmetros da norma ASTM D 635 (3). Para o ensaio foram produzidos cinco corpos de prova (CP's) para cada proporção do resíduo. A Figura 6 representa as dimensões dos CP's utilizados.



Fonte: Os Autores.

No ensaio utilizou-se um aparato de estrutura metálica para acoplar e sustenta o corpo de prova, mostrado na Figura 7. Para conduzir a chama pelo corpo de prova, utilizou-se um Bico de Bunsen posicionado a 45°.

Figura 7: Aparato para o ensaio de flamabilidade.



Fonte: Os Autores.

Durante o ensaio registrou-se o tempo necessário para a combustão atingir a marca de 25 mm e o tempo necessário para atingir a marca de 75 mm. A taxa de propagação de chama foi calculada através da Equação 2 exibida abaixo:

$$\text{Taxa} = \frac{L}{t} \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) \quad (2)$$

Onde L é o comprimento útil do corpo de prova em milímetros e t é o tempo em minutos, no qual a chama leva para percorrer o comprimento útil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

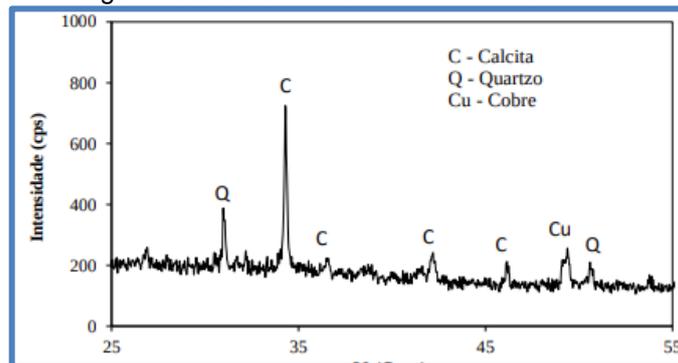
Massa Específica Aparente

De acordo com a equação apresentada no tópico 2, foi obtido o valor da massa Específica aparente do resíduo do minério de cobre 2,848 g/cm³ onde o mesmo está de acordo com a literatura (4).

Caracterização Mineralógica por DRX

As composições mineralógicas do resíduo de minério de cobre foram averiguadas por meio da análise de DRX. A Figura 8, apresenta o difratograma do resíduo.

Figura 8: DRX do resíduo de minério de cobre.



Fonte: Os Autores.

Na Figura 8, foi possível identificar os principais componentes mineralógicos do RMC, de acordo com suas fichas PDF, sendo os principais picos correspondentes a Calcita (C) – PDF 98-003-4956, o quartzo (Q) – PDF 98-001-2466 e o Cobre (Cu) – PDF 98-007-2623 (5).

Ensaio de Flamabilidade

A Tabela 1 apresenta a taxa de propagação de chama obtidas pelo ensaio de flamabilidade nos compósitos de minério de cobre produzidos nas proporções 10%; 20% e 30%.

Tabela 1: Dados obtidos do ensaio de flamabilidade.

Resíduo / Proporção	Taxa de Propagação (mm/min)
MP	23,962
RMC-10%	21,429
RMC-20%	18,428
RMC-30%	21,248

Fonte: Os Autores

Observa-se que a inserção do RMC foi satisfatória, visto que, todas as proporções apresentaram taxas de propagação inferior ao da MP, com destaque para RMC-20% que apresentou uma redução de 23,1% em comparação a MP. Em relação à norma do CONTRAN 498, com especificações para a taxa de propagação no âmbito automobilístico de 100 mm/min, há uma redução ainda mais significativa de 81,57%. Isso pode ser explicado devido a incorporação de resíduos inorgânicos, como a calcita, apresentada no DRX, o qual atua na redução do material combustível disponível para a propagação da chama, reduzindo assim a taxa de queima (6).

A Tabela 2 exibe um comparativo entre a taxa de propagação de chamas com compósitos de minério de cobre, com melhores desempenhos no ensaio de flamabilidade encontrados nas literaturas.

Tabela 2: Dados comparativos com a literatura em relação ao trabalho.

Materiais	Taxa de Propagação (mm/min)	Fonte
RMC-20%	18,43	Trabalho próprio
Resíduo de Cobre 25%	19,63	MORAES (2019)
Resíduo de Cobre 20%	19,82	SOUSA (2022)

Fonte: Os Autores.

Na Tabela 2, observou-se que os materiais fabricados principalmente como o RMC-20% apresentam uma boa taxa de redução na propagação de chamas quando comparados às normas e estudos anteriores. Isso ocorre porque os menores valores de taxa de propagação de chamas são observados para os compósitos com inserção de resíduos, uma vez que a inclusão dos resíduos reduz a quantidade de material

inflamável, neste caso, o polímero. No entanto, outros fatores também devem ser analisados, como a quantidade de material de resíduo utilizado, o método de fabricação, e as propriedades físicas e químicas dos resíduos e da resina utilizada (4).

CONCLUSÃO

Concluimos, a partir dos resultados obtidos, que os corpos de prova fabricados em moldes de silicone, sem compressão, apresentaram boa homogeneidade, o que tornou a confecção pelo método *Hand lay-up* eficaz. A incorporação de resíduos na matriz contribuiu para a melhoria da resistência à chama dos compósitos.

Também foi possível ser revelado a partir da análise mineralógica a presença de minerais como calcita, quartzo e cobre, cujas características podem ter influenciado positivamente os resultados obtidos na análise de flamabilidade.

Por fim, o ensaio de flamabilidade horizontal garantiu uma classificação HB para os materiais fabricados, conforme a norma ASTM D 635, confirmando suas características de retardamento de chama. A composição com RMC-20% apresentou bons resultados, desempenho que pode ser atribuído às fases mineralógicas do resíduo de cobre. Os valores de taxa de propagação de chamas foram inferiores ao máximo exigido pelo CONTRAN, destacando-se o resíduo de cobre, que apresentou uma taxa 81,57% menor do que o padrão nacional exigido.

REFERÊNCIAS

- (1) Brasil Mineral. **Graças a Salobo, produção de cobre aumenta quase 30% em 2023.** Tech Today, 29.01.2024. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/gracas-a-salobo-producao-de-cobre-aumenta-quase-30-em-2023> Acesso em: 10 de junho.
- (2) CALLISTER, JR. W.; RETHWISCH, D. **Ciência e tecnologia de materiais: Uma introdução.** 10a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- (3) **ASTM D 635** – “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.

(4) 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.

(5) SANTOS, A. J. G dos. **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. 178f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará. Belém. 2020.

(6) MORAIS, M. H. M de. **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.

(7) SOUSA, A. P. S de. **Influência dos resíduos do beneficiamento de caulim e cobre nas propriedades físicas, mecânica de impacto e flamabilidade dos compósitos de matriz poliéster isoftálica**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará. Belém. 2022.

(8) FARIAS, D. C. et al. **Determinação de propriedades físicas e mecânica de compósitos poliméricos incorporados com resíduo (lama vermelha) do beneficiamento da bauxita**. *Energia, Gestão e Inovação*, v. 3, p. 80-85, 2022.

ANALYSIS OF THE FIRE RESISTANCE OF COMPOSITES WITH COPPER RESIDUE

ABSTRACT

In 2022, Brazil produced 1.3 million tons of copper ore for export. Improper disposal of copper waste can lead to environmental contamination. This study proposes developing polymer matrix composites by reusing copper waste to mitigate these impacts. The initial process involved drying the material and performing granulometric and mineralogical analyses using X-ray diffraction (XRD). Composites were produced using polyester resin and different proportions of waste: 10%, 20%, and 30%. Horizontal flammability testing (ASTM D 635) revealed that the composites exhibited good flame resistance. The composite with 20% waste showed a 41% reduction compared to ASTM D 635 and an 81.57% reduction compared to CONTRAN 498. These results indicate that the composites are promising due to their fire resistance, contributing to waste reduction and promoting cleaner technologies.

Keywords: Flame resistance, Particulates, Flammability.