

FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS COM RESÍDUOS DE MINÉRIO DE COBRE: AVALIAÇÃO MECÂNICA DE TRAÇÃO

Silva, I.A.¹; Souza, J.M.¹; Gomes, L.V.¹; Estumano, D.C.¹; Costa D.S.²; Rodrigues, E.C.²; 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 Sudeste do Pará. ³Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua, FEMat, UFPA.

E-mail para contato: iandraaraujo28@gmail.com

RESUMO

Este estudo explora a reutilização de resíduo de minério de cobre (RMC) na fabricação de compósitos de matriz polimérica, com o objetivo de produzir materiais sustentáveis e reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos industriais. Os resíduos de cobre, obtidos do processo de beneficiamento mineral, foram combinados com resina poliéster, acelerador de cobalto e iniciador para formar compósitos contendo 10%, 20%, e 30% de resíduo em massa. A produção dos compósitos foi realizada manualmente, sem compressão, e suas propriedades mecânicas de tração foram avaliadas. O ensaio de tração, com resultado de 29,813 MPa, mostrou que o resíduo atuou como carga, resultando em propriedades inferiores às da matriz. Os resultados indicam que o RMC pode ser integrado ao compósito, contribuindo para a melhoria de suas propriedades mecânicas, representando uma solução sustentável para o descarte de resíduos e agregando valor ao produto final, além de reduzir o impacto ambiental.

Palavras Chave: Ambiental, Resíduo, Propriedade Mecânica.

INTRODUÇÃO

A geração massiva de resíduos sólidos é uma grande preocupação ambiental, com muitos resíduos industriais ainda sendo descartados de forma inadequada, o que impacta negativamente o meio ambiente e a saúde pública (1).

Em particular, a gestão de resíduos da indústria de cobre tem atraído atenção devido ao processo de flotação utilizado em sua produção, o qual gera grandes quantidades de resíduos. No Brasil, o cobre é de grande importância econômica, mas seu beneficiamento pode causar sérias questões ambientais e sociais (2).

Nesse contexto, a produção de materiais compósitos com matriz polimérica emerge como uma alternativa promissora para a utilização desses resíduos. Os compósitos, resultantes da combinação de diferentes materiais, apresentam propriedades superiores em comparação com materiais isolados (3).

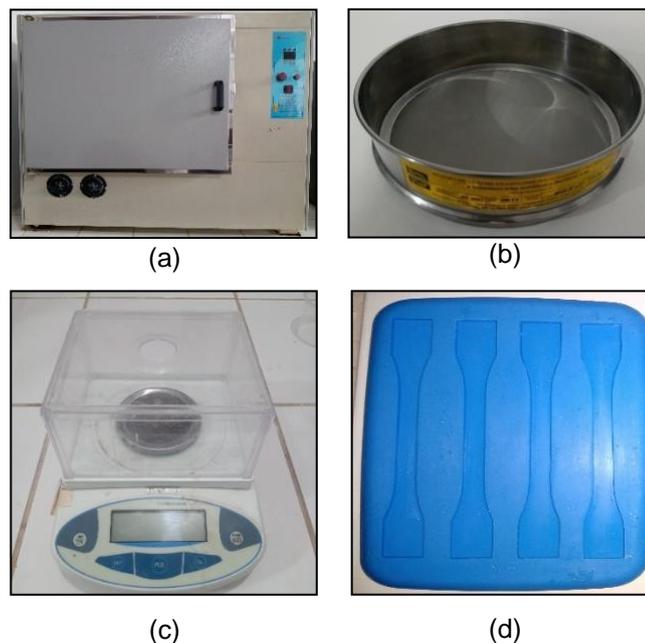
Levando em conta os problemas associados aos resíduos e os critérios de sustentabilidade, este estudo tem como foco a produção de compósitos de matriz polimérica incorporando resíduo de cobre. O objetivo é avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos, explorando suas possíveis aplicações.

MATERIAIS E MÉTODOS

Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados para o presente trabalho foram fornecidos pelo Laboratório de Catálise e Biocatálise da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como mostrado na Figura 1. Os equipamentos em ordem de uso: estufa, peneiras de 100 *mesh* da série *Tyler*, balança analítica e moldes de silicone.

Figura 1 - Equipamentos Utilizados: (a) Estufa; (b) Peneira; (c) Balança Analítica; (d) Molde de Silicone.



Fonte: Autor, 2024.

Materiais Utilizados

Matriz Polimérica

A resina de poliéster cristal foi utilizada como matriz polimérica. Como acelerador utilizou-se o cobalto (CAT-MET) na proporção de 1,5% (v/v) para o sistema catalítico, e o BUTANOX M-50 (MEK-P) foi empregado como iniciador de cura na proporção de 1% (v/v).

Resíduo de minério de cobre

A empresa VALE S.A forneceu o resíduo de minério de cobre (RMC), resultante do processo de flotação do beneficiamento do cobre na mina de Sossego, localizada na Região de Canaã do Carajás no Estado do Pará. Como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Resíduo de Cobre.



Fonte: Autor,2024.

Procedimentos Experimentais

Preparação do Resíduo

O resíduo de cobre foi para a estufa por 2 horas a 100 °C, para retirada da umidade. Antes da fabricação dos compósitos, as principais etapas do processamento do resíduo, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processamento do resíduo.



Fonte: Autor,2024.

Determinação da Granulometria

O resíduo foi colocado na estufa por duas horas a 100 °C para remover a umidade. Em seguida, a granulometria foi classificada em peneiras de 100 *Mesh* (0,150 mm). Após isso, alíquotas foram separadas para calcular a massa específica aparente do resíduo e realizar análises de Difração de Raio X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Determinação da Massa Específica Aparente

O método do picnômetro foi usado para calcular a massa específica aparente (MEA) dos resíduos. Primeiramente pesou-se a massa de um picnômetro vazio (M_1),

a massa de um picnômetro com resíduo (M_2), a massa de um picnômetro com resíduo e água destilada (M_3) e a massa do picnômetro com água destilada (M_4). Assim, a Equação 1 foi usada para calcular a massa específica aparente. Para então determinar a massa dos componentes da mistura necessários para produzir os compósitos.

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

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

Caracterização Morfológica por MEV

A caracterização morfológica dos resíduos foi conduzida com um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de bancada, modelo TM3000 da marca HITACHI, visando analisar como a morfologia dos resíduos impacta as propriedades dos compósitos. A análise foi realizada com ampliações de 100 e 250 vezes, no Laboratório de Microscopia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, na Universidade Federal do Pará.

Caracterização Mineralógica por DRX

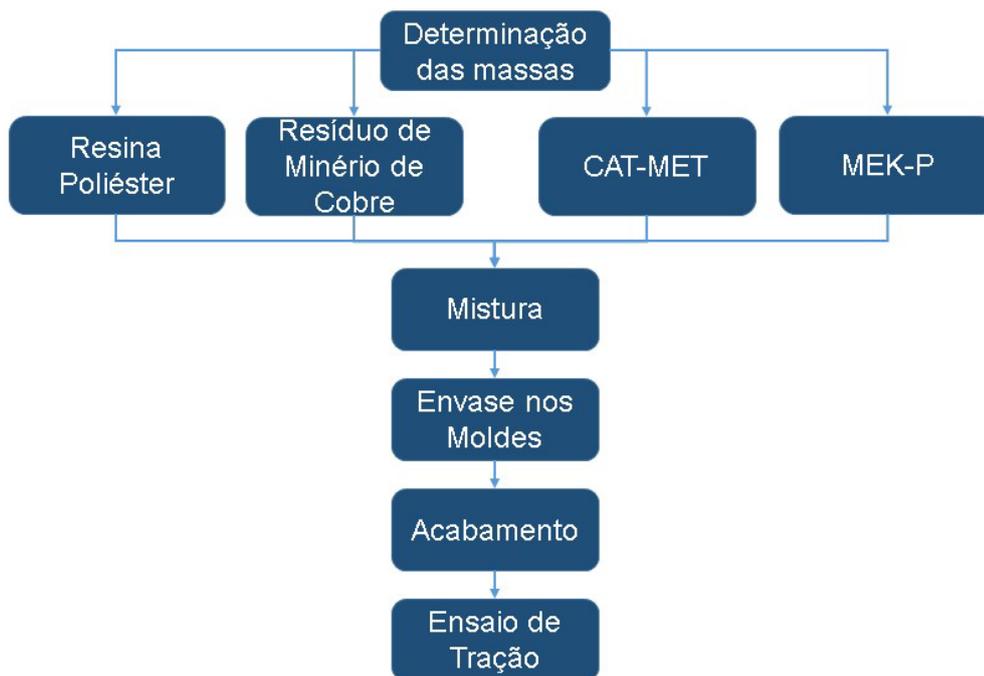
O Laboratório de Caracterização Mineral do Instituto de Geologia realizou a caracterização mineralógica do resíduo de minério de cobre. Foi usado um difratômetro de raios X, modelo EMPYREAN da PANalytical, com goniômetro θ - θ , tubo de raios X cerâmico e anodo de cobre ($K\alpha_1 = 1,789010 \text{ \AA}$), com foco fino longo e filtro $K\beta$ de Fe. O detector de área utilizado foi um PIXEL3D 2x2 de área com uma abertura (*active length*) de $3,3473^\circ 2\theta$ e 255 canais. Para determinar as fases cristalinas presentes no material.

As condições de análise foram as seguintes: varredura de 5° a $75^\circ 2\theta$; voltagem de 40 kV e corrente de 35 mA; tamanho de passo de $0,02^\circ 2\theta$ e 30s o tempo/passos; fenda divergente de $1/4^\circ$ e antiespalhamento de $1/2^\circ$; máscara de 10 mm. O software X'Pert Data Collector e o X'Pert HighScore da PANalytical foram usados para coletar e tratar os dados.

Fabricação dos Compósitos

Os compósitos foram fabricados manualmente, usando moldes de silicone sem compressão. Esse processo foi executado na Usina de Materiais (USIMAT) da Universidade Federal do Pará, com proporções de resíduo de minério de cobre de 10%, 20% e 30% em massa. O fluxograma do processo de produção de compósitos é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma da produção dos compósitos.

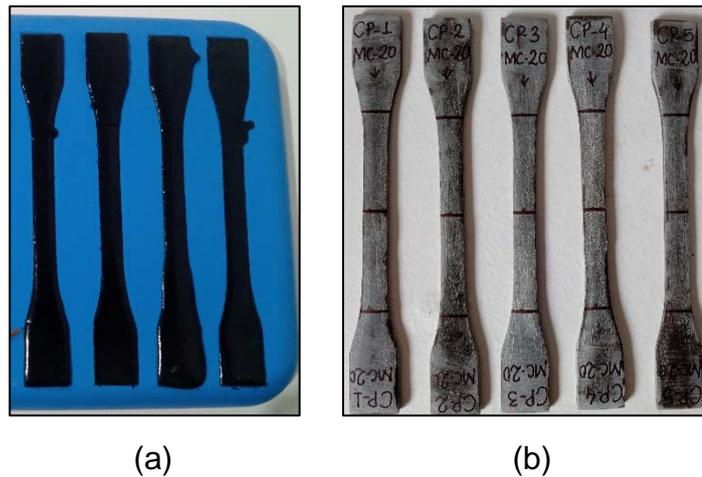


Fonte: Autor, 2024.

Primeiramente, o resíduo de cobre foi colocado em uma estufa a 100 °C por 20 minutos para remover a umidade. Em seguida, as massas dos materiais utilizados foram determinadas de acordo com cada proporção e ensaio.

Em seguida, a mistura foi preparada na seguinte ordem: resina, resíduo, CAT-M (1,5% v/v) e MEK-P (1% v/v). Cada ingrediente foi misturado até que a mistura estivesse completamente homogênea. Depois disso, a mistura foi envasada nos moldes de silicone. Após o tempo de 24 horas necessário para o processo de cura, os compósitos foram removidos do molde de silicone. Posteriormente ao processo de cura, os acabamentos superficiais foram feitos com lixas nos corpos de prova de acordo com as diretrizes das normas ASTM D 638 para ensaios de tração, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – (a) Mistura envasada no molde; (b) Corpos de prova.



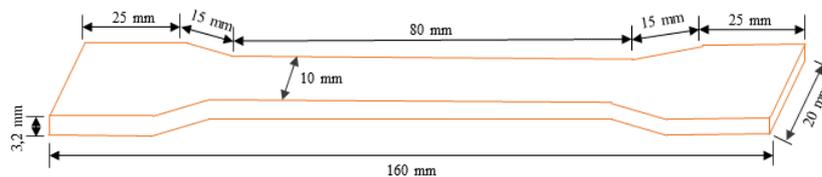
Fonte: Autor, 2024.

Caracterização dos Compósitos

Ensaio Mecânico de Tração

O ensaio de tração foi conduzido no Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM) da Universidade Federal do Pará e foi realizado de acordo com a norma ASTM D 638. Para cada proporção do resíduo, foram fabricados cinco corpos de prova para o ensaio, com as dimensões mostradas na Figura 6.

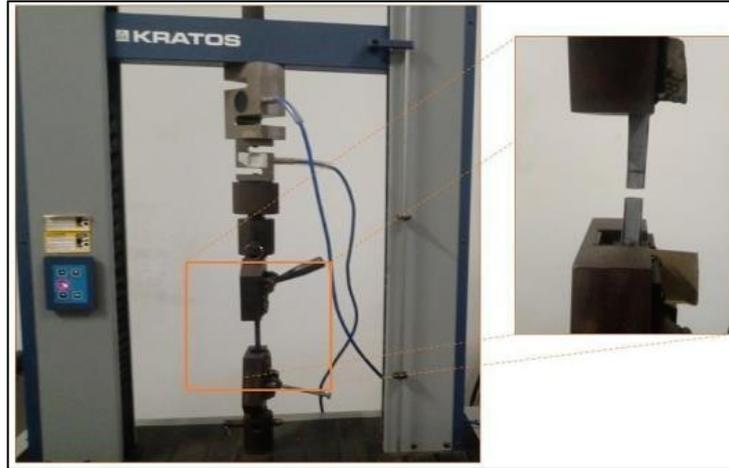
Figura 6 – Dimensões CP ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2024.

Para efetuar os ensaios, foi usada uma máquina modelo KE 2000 MP da marca KRATOS, mostrada na Figura 7, configurada com uma célula de carga de 5KN a 5mm/min.

Figura 7 – Equipamento utilizado no ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2024.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do Resíduo

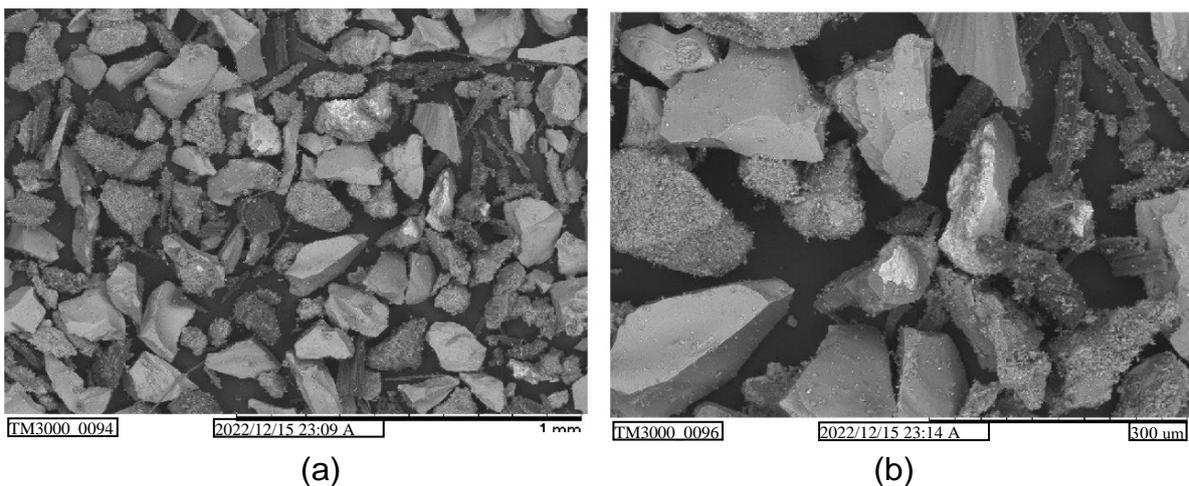
Massa Específica Aparente

A massa específica do resíduo de minério de cobre (RMC) foi determinada por meio da equação 1. O valor estimado do resíduo de cobre foi de $2,848 \text{ g/cm}^3$, valor de acordo com a literatura pesquisada (4).

Caracterização Morfológica por MEV

A Figura 8, apresenta as micrografias da análise do resíduo de cobre.

Figura 8 – MEV resíduo de cobre: (a) 100X; (b) 250X.



Fonte: Autor, 2023.

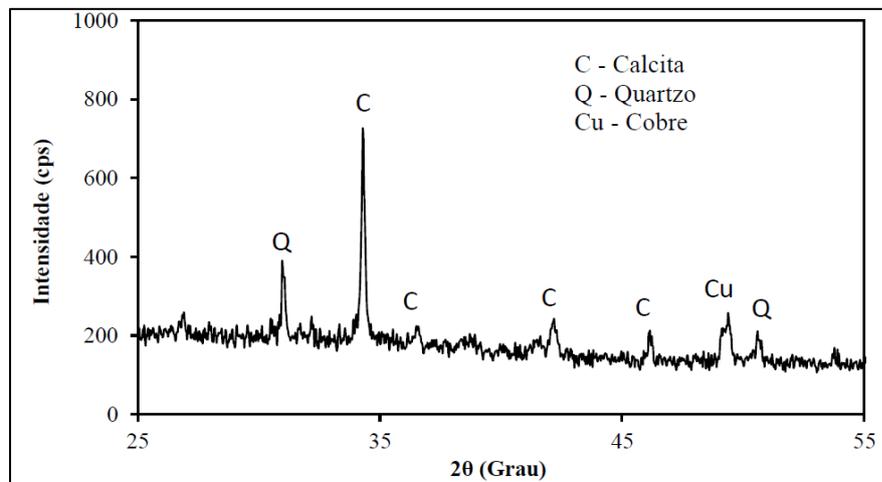
Foi possível analisar através das imagens que o resíduo de minério de cobre, contém partículas menores juntas a partículas maiores. O agrupamento das partículas

de diferentes tamanhos favorece a concentração de bolhas, aumentando a porosidade no material compósito (5). Essa concentração de partículas pode afetar o desempenho do material perante o ensaio mecânico de tração (6).

Caracterização Mineralógica por DRX

A análise de DRX foi utilizada para determinar as composições mineralógicas do resíduo de minério de cobre. O difratograma do resíduo está representado na Figura 9.

Figura 9 – DRX resíduo de cobre.



Fonte: Autor, 2024.

De acordo com suas fichas PDF, os elementos mineralógicos mais relevantes do RMC podem ser vistos na Figura 12. Os principais picos correspondem ao quartzo (Q) – PDF 98-001-2466, calcita (C) – PDF 98-003-4956 e cobre (Cu) – PDF 98-007-2623. As análises de trabalhos de Moraes (2019) (7) e Santos (2020) (8), podem confirmar a presença desses minerais.

Caracterização dos Compósitos

Ensaio Mecânico de Tração

O Limite de Resistência à Tração (LRT), o alongamento e o Módulo de Elasticidade (ME) dos compósitos produzidos foram analisados usando os dados do ensaio de tração. Os resultados estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados obtidos pelo ensaio de tração.

Resíduo/ Proporção	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	40,135±3,224	6,698±0,130	0,468±0,058
RMC - 10%	29,813±1,731	5,934±1,288	0,370±0,057
RMC - 20%	24,394±3,361	4,946±0,370	0,367±0,109
RMC - 30%	16,917±1,173	4,408±0,780	0,260±0,043

Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 1 mostra que os compósitos com RMC mostraram resistência à tração consistente e próxima entre si. O compósito com RMC de 10% se destaca por apresentar valor semelhante à matriz plena (MP). É importante observar que, embora esses valores não sejam considerados um reforço substancial, devido à sedimentação do resíduo de cobre na matriz como resultado de sua alta massa específica, o material compósito fabricado ainda pode ser uma alternativa sustentável e de baixo custo de fabricação (4).

CONCLUSÃO

Os resultados indicaram que os corpos de prova feitos em moldes de silicone, sem compressão, apresentaram homogeneidade adequada, demonstrando que o processo de confecção manual é satisfatório. Além disso, a incorporação do resíduo na matriz contribuiu para otimizar as propriedades mecânicas.

A análise morfológica e mineralógica dos resíduos destacou características que possivelmente influenciaram o desempenho das propriedades mecânicas dos compósitos fabricados, incluindo o tamanho das partículas e a presença de minerais como calcita, quartzo e cobre.

No ensaio de tração, a morfologia do resíduo limitou a interação ideal entre a matriz e o reforço, levando à formação de poros que impactaram a resistência à tração dos compósitos. No entanto, a composição com RMC-10% se destacou por alcançar 29,813 MPa, demonstrando que, embora ainda não tenha funcionado como um reforço eficaz, mostrou-se adequada como carga de enchimento, contribuindo para a melhoria geral da estrutura do material.

REFERÊNCIAS

- (1) O que é resíduo industrial e quais são suas classificações? **Tera**, 2021. Disponível em: < <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/o-que-e-residuo-industrial-e-quais-sao-suas-classificacoes>>. Acesso em: 02 de junho de 2023.
- (2) IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Relatório Anual de Atividade** – de janeiro a dezembro de 2021. Brasília, 2021.
- (3) CALLISTER, JR. W.; RETHWISCH, D. **Ciência e tecnologia de materiais: Uma introdução**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
- (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*, *musacae*)**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Pará, Belém, 2017. 150 f.
- (5) MENDES, B. H. A. **Estudo da influência da incorporação de resíduo de beneficiamento de caulim nas propriedades de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de bambu (*bambusa vulgaris*)**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
- (6) CUNHA, E. J. de S. **Influência do uso de resíduos do processo Bayer nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de base polimérica reforçados com fibra de curauá (*ananas locidus*. Mill)**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais, Belém, 2015. 152 f.
- (7) 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.
- (8) 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.

CONSTRUCTION OF COMPOSITES WITH COBER MINERY WASTS: TRACTION MECHANICAL EVALUATION

ABSTRACT

This study explores the reuse of copper mining waste (RMC) in the production of polymer matrix composites, aiming to create sustainable materials and reduce the environmental impacts caused by the improper disposal of industrial waste. Copper residues, obtained from the mineral beneficiation process, were combined with polyester resin, cobalt accelerator, and initiator to form composites containing 10%, 20%, and 30% waste by mass. The composites were manually produced without compression, and their tensile properties were evaluated. The tensile test, with a result of 29.813 MPa, showed that the waste acted as a filler, resulting in properties inferior to the pure matrix. The results indicate that RMC can be integrated into the composite, contributing to the improvement of its mechanical properties, representing a sustainable solution for waste disposal, adding value to the final product, and reducing environmental impact.

Keywords: Environmental, Waste, Mechanical Property.