
Análise das propriedades de flexão e flamabilidade em compósitos poliméricos com incorporação do resíduo de lama vermelha

Analysis of bending and flamability properties in polymer composites with incorporation of red mud waste

Haianny Beatriz Saraiva LimaORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6771-7520>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: hamylima@gmail.com**Ana Paula Souza de Sousa**ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9908-0099>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: anaps.souz@gmail.com**Bruno Henrique Alves Mendes**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3770-0364>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: bruno_mendes15@hotmail.com**Denilson da Silva Costa**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4599-792x>

Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Brasil

E-mail: denilson@unifesspa.edu.br**Emerson Cardoso Rodrigues**ORCID: <https://orcid.org/000-0002-0303-4578>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: ecr@ufpa.br**Diego Cardoso Estumano**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4318-4455>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: dcestumano@ufpa.br**Deibson Silva da Costa**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2165-2628>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: deibsonsc@yahoo.com.br**Wassim Raja El Banna**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5085-4352>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: wassim@ufpa.br

RESUMO

Diante das crescentes preocupações com a sustentabilidade e a busca por alternativas ecoeficientes, esse estudo consiste em avaliar o efeito da lama vermelha nos compósitos poliméricos através dos ensaios de resistência a flexão (ASTM D790-17) e flamabilidade (IEC 60695-11-10 e ASTM D635-18). Para a fabricação dos corpos de prova, empregou-se o método de fabricação manual (*hand lay up*), utilizando uma proporção mássica de 40% de lama vermelha, juntamente com resina poliéster insaturada isoftálica, acelerador de cobalto (1,5% v/v) e iniciador (1% v/v). A partir das análises, constatou-se que a inclusão da lama vermelha resultou em uma redução da resistência a flexão em relação a matriz plena, entretanto, a taxa de propagação da chama foi significativamente melhor que as exigências normativas, destacando o potencial dos compósitos em atender requisitos regulatórios.

Palavras-chave: Resina poliéster; Gestão de resíduos; Resíduo de bauxita.

ABSTRACT

Faced with growing concerns about sustainability and the search for eco-efficient alternatives, this study consists of evaluating the effect of red mud on polymeric composites through flexural strength (ASTM D790-17) and flammability (IEC 60695-11-10 and ASTM D635-18). For the manufacture of the test specimens, the manual manufacturing method (*hand lay up*) was used, using a mass proportion of 40% of red mud, together with isophthalic unsaturated polyester resin, cobalt accelerator (1.5% v/v) and primer (1% v/v). From the analyses, it was verified that the inclusion of the red mud resulted in a reduction of the flexural strength in relation to the full matrix, however, the flame propagation rate was significantly better than the normative requirements, highlighting the potential of the compounds in meet regulatory requirements.

Keywords: Polyester resin; Waste Management; Bauxite residue.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente preocupação com a sustentabilidade e a busca por alternativas ecoeficientes têm impulsionado a investigação de materiais inovadores que possam substituir ou complementar os tradicionais. Nesse contexto, os compósitos vêm ganhando destaque como uma opção viável devido, segundo Callister Jr. e Rethwisch (2020), à sua capacidade de combinar propriedades de diferentes materiais, proporcionando soluções versáteis e adaptáveis.

A gestão sustentável de resíduos industriais é um grande desafio contemporâneo. A lama vermelha, também conhecida como resíduo de bauxita, é um subproduto do processo de refino da bauxita para obtenção de alumínio e deve ser armazenada adequadamente, visto que segundo Galastri (2010), é altamente nociva ao meio ambiente devido à sua composição química e característica tóxica.

No ano de 2020, a reserva mundial de lama vermelha superou a marca de 5 bilhões de toneladas (YANCUN QI, 2021). De acordo com Brown *et al.* (2017), no ano de 2015, a produção brasileira de bauxita, com aproximadamente 37 milhões de toneladas anuais, ocupou a terceira posição em escala mundial, ficando atrás da China que registrou cerca de 65 milhões de toneladas, e da Austrália, com 81 milhões de toneladas.

Frente a essa constatação, nota-se a necessidade de implementar abordagens responsáveis e sustentáveis para a gestão de resíduos. Desse modo, o presente trabalho se concentra na investigação das propriedades de flexão e flamabilidade de compósitos elaborados com a incorporação de resíduo de lama vermelha.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Utilizou-se o resíduo proveniente do processo Bayer conhecido como lama vermelha (LV) cedido pela Hydro Alunorte-Pará. Para o desenvolvimento do trabalho, foi empregada uma matriz composta por um polímero termofixo (resina poliéster insaturada isoftálica), acelerador de cobalto na proporção 1,5% (v/v) e iniciador MEK-P (Butanox M-50) utilizado na proporção 1% (v/v).

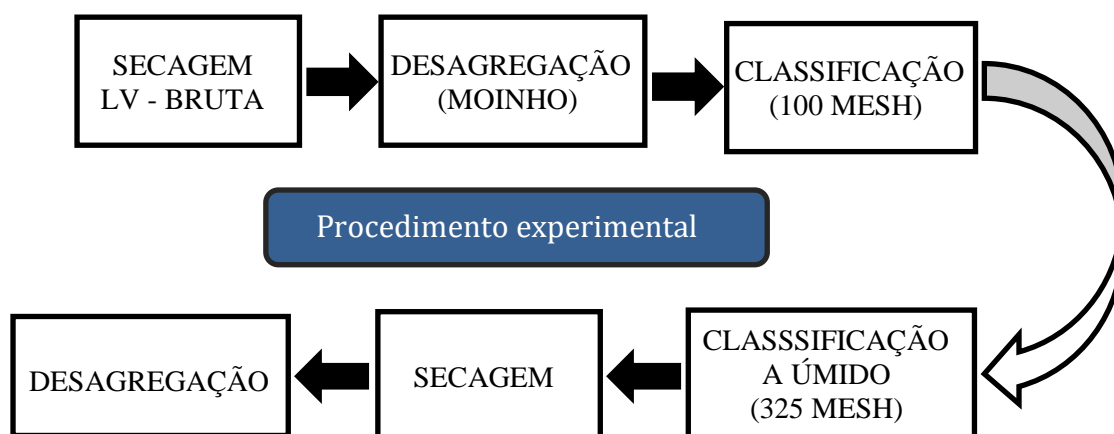
MÉTODOS

Para a produção dos corpos de prova, definiu-se a quantidade de 40% de lama vermelha a ser incorporada na matriz. O processo de fabricação adotado foi o método manual (*hand lay up*), no qual os compósitos foram confeccionados em moldes de silicone sem compressão. Após a etapa de cura, os corpos de prova foram submetidos às caracterizações específicas, a fim de avaliar seu desempenho.

PROCESSAMENTO DO RESÍDUO DE LAMA VERMELHA

O resíduo de lama vermelha (LV) bruta foi submetido a um processo de secagem em estufa a uma temperatura de 100 °C por 24 horas. Em seguida, desagregou-se em um moinho de bolas durante 30 minutos. A lama vermelha foi classificada usando uma peneira de 100 Mesh da série Tyler (0,147 mm) e, posteriormente, classificada a úmido em peneira de 325 Mesh (0,044 mm). Após esse processo, o material passante foi seco em estufa a 100 °C por mais 24 horas antes de passar por uma desagregação. A Figura 1 apresenta um fluxograma com as principais etapas do processo de beneficiamento e a Figura 2 (a) a lama vermelha bruta e (b) o resíduo após beneficiamento.

Figura 1 – Fluxograma das etapas de beneficiamento



Fonte: O autor (2023)

Figura 2 - (a) resíduo de lama vermelha bruta e (b) resíduo beneficiado



(a)

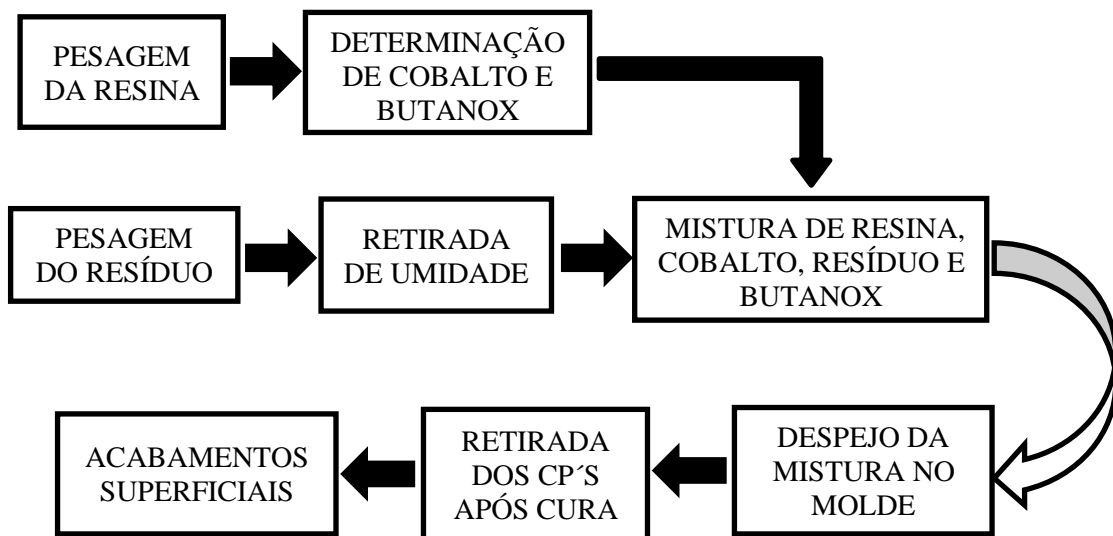
(b)

Fonte: O autor (2023)

FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Após o processamento completo do resíduo de LV, estabeleceu-se a massa a ser utilizada na fração de 40%. As proporções da matriz polimérica foram determinadas junto ao resíduo, o qual foi submetido a secagem em estufa a 100 °C por 20 minutos, para retirada superficial de umidade. A mistura manual de resina, cobalto, resíduo e iniciador se estendeu por cinco minutos. Em seguida, a mistura foi despejada em um molde de silicone e permaneceu por uma hora para a retirada dos corpos de prova (CP'S) que foram colocados em um recipiente plano por 24 horas para evitar possíveis deformações. A Figura 3 apresenta um fluxograma com o processo de fabricação dos compósitos.

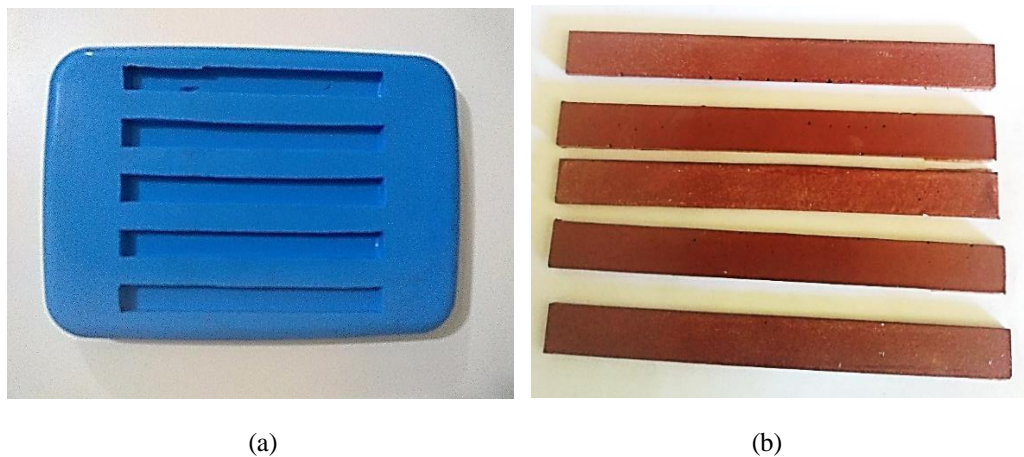
Figura 3 - Fluxograma da fabricação dos compósitos



Fonte: O autor (2023)

A Figura 4 (a) apresenta o molde de silicone utilizado para a confecção deste trabalho e (b) os corpos de prova com a inserção do resíduo de lama vermelha fabricados para os ensaios de flexão e flamabilidade.

Figura 4 - (a) Molde de silicone e (b) corpos de prova

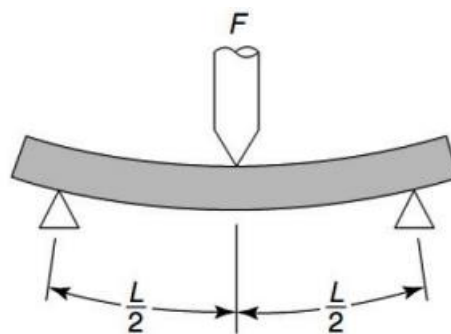


Fonte: O autor (2023)

Os corpos de prova foram submetidos a um lixamento superficial, para obter o acabamento adequado. Em seguida, foram identificados e, por fim, a espessura de cada corpo de prova foi medida utilizando um paquímetro digital.

Para a realização do ensaio de flexão, empregou-se a norma ASTM D790-17 que abrange a determinação das propriedades de flexão de plásticos reforçados e não reforçados, incluindo compósitos de alto módulo e materiais isolantes elétricos na forma de barras retangulares. A norma utiliza um sistema de carregamento de três pontos aplicados a uma viga simplesmente suportada. As propriedades de flexão determinadas por esses métodos de teste são especificamente úteis para fins de controle de qualidade e especificação (ASTM D790, 2017). A Figura 5 apresenta o esquema da realização do ensaio onde F: carga aplicada e L: distância entre os pontos de apoio.

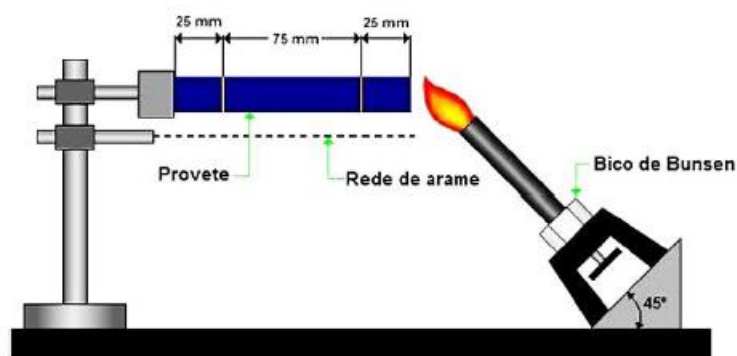
Figura 5 – Representação esquemática don ensaio de Flexão



Fonte: Callister Jr. e Rethwisch (2020)

O ensaio de flamabilidade foi conduzido de acordo com as normas IEC 60695-11-10 e ASTM D635-18. Os corpos de prova (CP'S) foram marcados em três regiões específicas. Para a ignição da chama, foi utilizado um suporte, uma garra e um bico de Bunsen a 45°. A Figura 6 ilustra o suporte com o corpo de prova utilizado durante o ensaio.

Figura 6 - Ensaio de flamabilidade



Fonte: Caetano (2019)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ENSAIO DE FLEXÃO

Os dados obtidos por meio dos resultados mecânicos dos compósitos contendo o resíduo de lama vermelha (LV), na fração mássica de 40%, juntamente com a matriz plena, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de flexão

Composição (%)	Tensão de Resistência a Flexão (MPa)
Matriz Plena	64,77 ± 5,35
40% LV	39,10 ± 6,52

Fonte: O autor (2023)

Com base nos resultados apresentados, nota-se que a inserção do resíduo de lama vermelha na matriz polimérica resultou em uma diminuição da resistência a flexão. Esse efeito demonstra um desempenho inferior quando comparado à matriz plena, o que indica que o resíduo, possivelmente, atuou como carga de enchimento no material. Ademais, segundo Ferreira (2020), a adição do resíduo à matriz aumenta a massa específica e a rigidez do compósito de forma gradual, o que implica na perda gradativa de flexibilidade do material.

Somado a isso, a redução da resistência a flexão com a adição de lama vermelha sugere que as partículas de resíduo podem não estar fornecendo um reforço mecânico eficaz. Isso se dá devido à natureza das partículas, à baixa dispersão do resíduo na matriz, além da presença de imperfeições como bolhas, porosidades e aglomerados no compósito (FARIAS *et al*, 2022; SANTOS *et al*, 2021). Nesse sentido, a presença de aglomerados, por exemplo, diminui a resistência mecânica por efeito de dificuldade de transferência de tensão da matriz para a carga, devido à falta de adesão nas regiões de aglomerado (BESSA, 2017).

Ademais, a distribuição uniforme das partículas de resíduo na matriz é fundamental para obter propriedades mecânicas consistentes, visto que uma boa distribuição melhora a trabalhabilidade, a homogeneização e compactação (EL BANNA, 2017).

Por outro lado, a redução da resistência também pode ser atribuída ao método de fabricação manual, onde pequenas diferenças na mistura dos materiais ou compactação podem levar a variações nos resultados (FARIAS, 2019). Arelado a isso, o uso de moldes de silicone sem compressão durante a cura pode causar a permanência de bolhas formadas durante o vazamento, o que interfere na transferência de tensão da matriz para a carga.

A Tabela 2 apresenta um comparativo dos resultados da tensão de resistência a flexão entre os compósitos contendo resíduos de lama vermelha, produzidos neste trabalho, e compósitos reforçados com outros resíduos encontrados na literatura.

Tabela 2 - Comparação dos resultados com outras literaturas

Composição (%)	Tensão de Resistência a Flexão (MPa)	Fonte
Matriz Plena	64,77 ± 5,35	Este trabalho
40% LV	39,10 ± 6,52	Este trabalho
20% Diatomita	33,3 ± 0,60	Santos (2007)
Areia + Diatomita	17,8 ± 0,30	Santos (2007)
15% Lama Vermelha	32,19 ± 0,62	Moraes (2019)
35% Cinza Volante	39,85 ± 2,14	Moraes (2019)
25% Pó de Mármore	32,00 ± 3,89	Costa (2017)

Fonte: O autor (2023)

Com uma fração mássica de 40% de lama vermelha, o compósito alcançou um bom resultado, atingindo 39,10 MPa de resistência a flexão. Isso ocorre devido à maior quantidade de resíduo presente na lama vermelha em comparação com o compósito contendo 35% de Cinza Volante. A maior quantidade de resíduo resulta em uma menor quantidade de resina utilizada, o que torna ainda mais viável a produção deste material.

Segundo Bessa (2017), as propriedades mecânicas de materiais compósitos são afetadas por diversos fatores, tais como a composição estrutural da matriz, a natureza do reforço, a eficiência da interface entre a carga e a matriz, a dispersão das cargas e a presença de defeitos estruturais no material, como porosidade, bolhas e aglomerados. No entanto, os resultados obtidos neste trabalho são satisfatórios quando comparados com os outros estudos, visto que apresentaram valores inferiores de resistência a flexão em compósitos com menor quantidade de resíduo.

ENSAIO DE FLAMABILIDADE

Os resultados referentes aos compósitos contendo resíduos de lama vermelha (LV) em conjunto com a matriz plena podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de flamabilidade

Composição (%)	Taxa (mm/min)
Matriz Plena	27,30
40% LV	SI

Fonte: O autor (2023)

Os corpos de prova apagaram a chama antes de atingir a linha de 75 mm exigida pela norma, recebendo assim a classificação de sem ignição (SI).

Segundo Chunwei (2019), a lama vermelha contém em sua composição química alguns óxidos, entre eles o óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro III (Fe_2O_3), dióxido de silício (SiO_2), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e óxido de sódio (Na_2O). Esses componentes representam 69,5% da massa total da lama vermelha. Para Khassin *et al.* (2010) e Temuujin *et al.* (2008), o óxido de magnésio é conhecido por ter propriedades retardantes de chama, isso ocorre devido a sua capacidade de liberar água quando aquecido. Ademais, o óxido de alumínio também é capaz de liberar água quando aquecido inibindo, assim, a propagação da chama.

Conforme Ribeiro *et al.* (2014), a inclusão de partículas inorgânicas com baixa flamabilidade pode contribuir para diminuir a quantidade de material combustível disponível para a propagação da chama. Esse fenômeno pode explicar a gradual diminuição na taxa de propagação da chama à medida que o teor de partículas aumenta.

A Tabela 4, apresenta um comparativo dos resultados de flamabilidade entre os compósitos contendo resíduos de lama vermelha obtidos neste estudo e compósitos reforçados com outros resíduos documentados na literatura.

Tabela 4 - Comparação dos resultados com outras literaturas

Composição	Taxa (mm/min)	Fonte
Matriz Plena	27,3	Este trabalho
40% LV	SI	Este trabalho
40% Cobre	22,31	Sousa (2022)
10% Caulim	17,12	Sousa (2022)
25% Mármore e Granito	14,50	Barbosa (2021)
20% RGCG	22,18	Santos (2018)
35% Cinza Volante	17,60	Moraes (2019)

*RGCG - Rejeito Gibbssítico-Caulínítico-Goethítico.

Fonte: O autor (2023)

Os resultados obtidos no ensaio de flamabilidade dos compósitos de lama vermelha demonstraram bom desempenho em relação a matriz plena e aos dados encontrados na literatura, isso se deve ao tipo de material utilizado, visto que o rejeito empregado dispõe de vários óxidos que atuam na retardância de chama, conferindo alta resistência à propagação da mesma.

Conforme Moraes (2019), a composição química, as fases mineralógicas e a morfologia dos resíduos estão diretamente relacionadas ao retardo de chama desses materiais. As morfologias das partículas, por exemplo, interferem no processo de difusão do oxigênio devido às diferentes interações físicas que ocorrem. Essa complexa interação, por sua vez, exerce influência na velocidade de propagação da chama. Além disso, a presença de água na composição química de alguns minerais é liberada à medida que as temperaturas de desidratação são alcançadas. Esse fenômeno pode ter desempenhado um papel na diminuição da propagação da chama durante o processo de combustão.

Ao comparar os resultados da taxa de propagação da chama dos compósitos com os critérios estabelecidos na Resolução N° 498 de 2014 do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) para o uso em revestimentos internos da indústria automobilística, nota-se que os compósitos demonstraram um desempenho satisfatório. Isso se deve ao fato de que os valores obtidos foram menores do que os requisitos definidos pela norma, que é de 100 mm/min.

Ademais, a norma ASTM D 635-18 estipula uma taxa de propagação de 40 mm/min, e, nesse contexto, tanto a matriz polimérica quanto os compósitos demonstraram

estar em conformidade, pois apresentaram uma taxa de propagação significativamente inferior à exigida por essa norma.

CONCLUSÃO

Este estudo investigou a viabilidade da incorporação de resíduo de lama vermelha em compósitos poliméricos, abordando suas propriedades de flexão e retardância de chama. Apesar da adição de lama vermelha ter diminuído a resistência a flexão dos compósitos, o material apresentou boa resistência quando comparado aos compósitos encontrados na literatura.

Os resultados foram satisfatórios nos ensaios de flamabilidade, destacando a capacidade dos compósitos em atender os requisitos regulatórios e contribuir para a qualidade dos materiais.

Embora desafios persistam, este estudo destaca a possibilidade de aproveitar resíduos industriais para estabelecer soluções mais sustentáveis e seguras, contribuindo para uma abordagem mais responsável na gestão de resíduos e no desenvolvimento de materiais.

REFERÊNCIAS

ASTM D 635-18 – Standard Test Method for Rate of Burnin or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position, 2018.

ASTM D 790-17 – "Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2017.

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.

BESSA, M. L. T. **Estudo da dispersão e adesão de micropartículas de diamante em formulação de compósitos epoxídicos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2017.

BROWN, T. J. *et al.* **World Mineral Production 2011 – 2015**. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, 2017.

CAETANO, M. Flamabilidade: Ensaios de resistência à chama. **CTB**, 2019. 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: 06 Set. 2023.

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

CHUNWEI S., *et al.* Chemical Composition Simplification of the Seydişehir (Konya, Turkey) Alumina Plant Waste. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. 2019.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). Resolução n° 498 - "Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos automotores nacionais e importados." 29 de julho de 2014.

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.

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 (Bacharel em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal do Pará, 2019.

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.

FERREIRA, V. H. M. M. **Cinzas volantes: uma alternativa para compósitos reforçados com partículas**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal do Pará, 2020.

GALASTRI, L. **Por que a lama tóxica da Hungria é vermelha?**. Hypescience. 2010.

IEC 60695-11-10 ed2.0 – **Fire hazard testing** – Part 11-10: Test flames – 50 Whorizontal and vertical flame test methods.

KHASSIN, A. *et al.* Effect of anionic admixtures on the copper–magnesium mixed oxide reduction. **Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis**, v. 101, 2010.

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.

QI YANCUN. The neutralization and recycling of red mud—a review. In: **Journal of physics: conference series**. Tayuan, IOP Publishing, 2021.

RIBEIRO, M. C. S. *et al.* Fire retardancy enhancement of unsaturated polyester polymer resin filled with nano and micro particulate oxide additives. **IOP Conf. Ser.; Mater. Sci. Eng.** 2014.

SANTOS, A. J. G. *et al.* Determinação de propriedades mecânicas de tração de compósitos híbridos reforçados utilizando fibras de bambu tratadas em solução NaOH e lama vermelha. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, n. 6, p. 2197-2204, 2021.

SANTOS, E. A. **Avaliação Mecânica e Microestrutural de Compósitos de Matriz de Poliéster Com a Adição de Cargas Minerai s e Resíduos Industriais**. (103 p. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.

SANTOS, L. G. S. **Comportamento do Rejeito Gibbssítico-Caulinítico-Goethítico como Retardante de Chamas em Compósitos de Matrizes de Poliéster Isoftálico**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Belém-PA, 2018.

SOUSA, 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**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2022.

TEMUJIN, J. *et al.* Water Content and Water Evolution from Reaction-Bonded Aluminum Oxide (RBAO) Powder Precursors. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 5, 2008.