



International Conference for
Academia and Industry Co-operation

20/11/2023 – 24/11/2023

São Luís - Maranhão - Brasil



International Meeting in Materials
Science and Engineering of Maranhão

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM RESÍDUO DE LAMA VERMELHA EM ENSAIOS DE FLAMABILIDADE E FLEXÃO

PERFORMANCE EVALUATION OF POLYMER COMPOSITES WITH RED MUD RESIDUE IN FLAMMABILITY AND FLEXURAL TESTS

Manoel V. F. Monteiro^{1*}, Haianny B. S. Lima², Ana P. S. de Sousa², Bruno H. A.
Mendes², Emerson C. Rodrigues³, Diego C. Estumano², Deibson S. da Costa¹

1 - Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pará (UFPA). Ananindeua, PA, Brasil.

2 - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Química - PPGEQ, Universidade Federal de Pará (UFPA), Belém, PA, Brasil.

3 - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Pará (UFPA). Belém, PA, Brasil.
manoelviniciuz@gmail.com

RESUMO

O acúmulo progressivo de resíduos ao longo do tempo pode resultar em um potencial risco de poluição ambiental, gerando notáveis consequências para o meio ambiente, uma vez que a deposição direta desses resíduos no solo pode conter substâncias poluentes, notadamente metais pesados. Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa foi promover o desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos que incorporam resíduo de lama vermelha. A produção do compósito seguiu o método de fabricação manual hand lay-up, utilizando molde de silicone, e incorporando um percentual de massa de 40% do resíduo industrial previamente beneficiado. Como matriz, utilizou-se a resina poliéster isoftálica insaturada, com acelerador de cobalto na proporção de 1,5% v/v e iniciador butanox M-50 na proporção 1% v/v. Para as análises foram utilizadas as normas ASTM D 635 para o ensaio de flamabilidade (flamabilidade horizontal) e a ASTM D 790 para o ensaio mecânico de resistência à flexão. No ensaio de flamabilidade, observou-se um satisfatório desempenho, uma vez que a chama extinguiu-se quando o resíduo foi adicionado à matriz, classificando-se como sem ignição (SI). Quanto ao ensaio de flexão, os compósitos demonstram um bom desempenho em comparação com a matriz plena. O desenvolvimento desses materiais, resulta na obtenção de propriedades destacáveis e promissoras, com aplicações em forros, revestimento interno de automóveis e outros tipos de aplicações desta natureza, ao mesmo tempo em que estimula a gestão responsável de resíduos e a mitigação do impacto ambiental.

Palavras-chave: *Materiais Compósitos, Resíduos, Lama Vermelha.*

ABSTRACT

The progressive accumulation of waste over time can result in a potential risk of environmental pollution, leading to significant consequences for the environment, as the direct deposition of these waste materials into the soil can contain pollutants, notably heavy metals. In this regard, the aim of this research was to promote the development and characterization of polymeric

composites incorporating red mud waste. The composite production followed the manual hand lay-up manufacturing method, using a silicone mold and incorporating a mass percentage of 40% of previously beneficiated industrial waste. As the matrix, unsaturated isophthalic polyester resin was used, with a 1.5% v/v cobalt accelerator and a 1% v/v butanox M-50 initiator. ASTM D 635 standards were used for the flammability test (horizontal flammability), and ASTM D 790 for the mechanical flexural strength test. In the flammability test, a satisfactory performance was observed, as the flame extinguished when the waste was added to the matrix, categorizing it as non-ignition (SI). Regarding the flexural test, the composites demonstrated good performance compared to the solid matrix. The development of these materials results in obtaining remarkable and promising properties, with applications in ceilings, interior car linings, and other similar applications, while also promoting responsible waste management and environmental impact mitigation.

Keywords: *Composite Materials, Waste, Red Mud.*

INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos é um aspecto essencial para alcançar um equilíbrio ambiental. Com isso, surge a necessidade de gerir de forma eficaz a produção, manuseio e a disposição final deste tipo de material para que o mesmo não venha causar um impasse econômico e/ou sustentável, assim sendo, com a implantação de uma Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, buscou-se estabelecer diretrizes norteadoras ao gerenciamento de resíduos sólidos, apresentando princípios e objetivos para o reaproveitamento dos resíduos sólidos gerados, bem como sua destinação ambientalmente adequada [1].

Um desses resíduos é a Lama Vermelha (LV), material proveniente do beneficiamento da bauxita por meio do processo Bayer. A Associação Brasileira de Alumínio - ABAL aponta que o alumínio não apresenta toxicidade para pessoas saudáveis, uma vez que apresenta baixa absorção no corpo humano [2], todavia, os rejeitos de seu processamento retêm níveis consideráveis de Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Sódio (Na), Titânio (Ti) e Sílica (SiO₂) que variam dependendo dos tipos ou origens da bauxita, podendo alcançar alcalinidade elevada [3]. O armazenamento desse material requer uma grande área para sua disposição, além de cuidados com a manutenção dessas áreas, o que acarreta um elevado custo às indústrias de refino da Bauxita. Dessa forma, uma alternativa para os problemas causados pela grande produção de lama vermelha é o desenvolvimento de tecnologias que visam a sua reutilização [4].

Muitos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases, sendo a fase matriz contínua que envolve a outra fase, chamada fase dispersa (reforço), logo, a matriz preenche os espaços vazios que se estabelecem entre os reforços, enquanto esse material reforço irá garantir as propriedades químicas e físicas do compósito [5], portanto, a importância dos compósitos para o campo da engenharia industrial se deve ao fato de que, ao combinar dois ou mais materiais diferentes, pode-se obter um material compósito cujas propriedades são superiores, ou até mesmo melhores, em alguns aspectos, às propriedades de cada um dos componentes, pertencendo a essa categoria uma enorme quantidade de materiais [6].

Ao se tratar de compósitos de matrizes poliméricas, devido a lama vermelha apresentar uma compatibilidade razoavelmente boa com resinas poliéster, o resíduo pode ser utilizado como potencial carga para produzir compósitos de matriz poliéster de baixo custo [7], assim sendo, este trabalho teve por objetivo principal estudar o comportamento dos compósitos de matriz polimérica com lama vermelha submetidos a ensaios de inflamabilidade e flexão, e por meio disso, apontar possível diminuição de impactos ambientais decorrentes da deposição final no meio ambiente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente trabalho, na fase matriz, foi utilizado o polímero termofixo (resina poliéster isoftálica insaturada). Utilizou-se também o acelerador de cobalto (CAT MET) na proporção 1,5% (v/v) e como iniciador de cura o butanox M-50 (MEK-P) utilizado na proporção 1% (v/v). Na fase dispersa foi utilizada a lama vermelha, obtida através de indústrias locais do estado do Pará (Hydro Alunorte) e submetida ao processo de beneficiamento, onde o resíduo foi submetido ao processo de secagem em estufa a uma temperatura de 100 °C por um período de 24 horas. Posteriormente foi desagregado em um moinho de bolas por aproximadamente 30 minutos. A lama vermelha passou então por uma classificação, utilizando uma peneira de 100 Mesh da série Tyler (0,147 mm), seguida por classificação a úmido utilizando uma peneira de 325 Mesh (0,044 mm). O material passante foi novamente seco e submetido a um processo de desagregação.

Fabricação dos corpos de prova

A fabricação dos Corpos de Prova (CPs), deu-se por meio de três passos: o primeiro consistiu no preparo da mistura para vazamento sobre o molde de silicone, determinando-se as massas da resina e do resíduo, para isso, utilizou-se uma estufa na temperatura de 105 °C para a retirada de umidade superficial do resíduo por 20 minutos seguida da homogeneização dos componentes do compósito durante 5 minutos; o segundo passo consistiu no vazamento da mistura, nesta etapa a mistura homogeneizada foi vazada no molde e esperou-se o ponto de gel; no terceiro passo aguardou-se 1 hora para retirada dos CPs do molde para armazenamento em local plano por 24 horas para polimerização completa, após isso aos CPs foram atribuídos acabamentos superficiais, através de lixas, e por fim foram realizadas as identificações finais. A Figura 1 (a) apresenta o molde de silicone com a mistura vazada e a Figura 1 (b) os corpos de prova com os acabamentos superficiais.

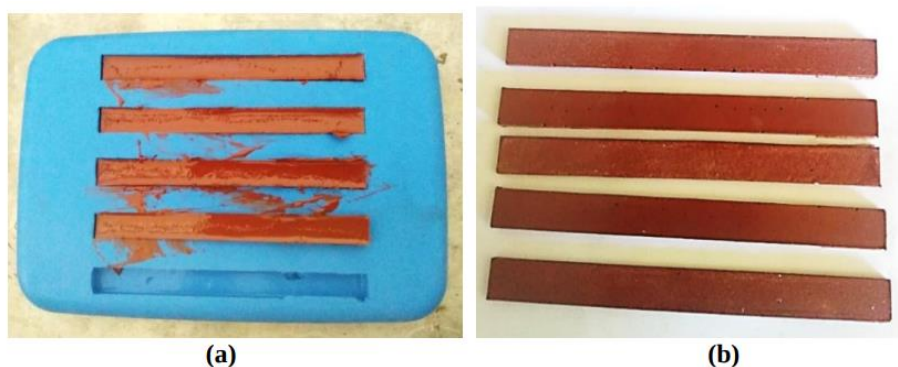


Fig. 1 - Mistura de LV depositada no molde de silicone (a) e Corpos de prova com o resíduo de LV (b).

Ensaio de flamabilidade

Adotou-se as normas IEC 60695-11 [8] e ASTM D 635 [9] para o ensaio de flamabilidade na posição horizontal. Utilizando-se o Bico de Bunsen a 45° direcionando por 30 segundos a chama ao corpo de prova. A taxa de propagação de chama foi calculada através da Equação (1), onde L é o comprimento útil do corpo de prova em milímetros (mm) e t é o tempo em segundos (s) que a chama leva para percorrer o comprimento útil.

$$Taxa = \frac{60L}{t} (mm/min) \quad (1)$$

Ensaio de flexão

Utilizou-se a norma ASTM D 790 [10] para o ensaio de flexão. Essa norma utiliza um sistema de carregamento de 3 (três) pontos aplicados a uma viga simplesmente suportada. As propriedades flexurais determinadas por esses métodos de teste são úteis para fins de controle de qualidade e especificação. A Tensão de Resistência à Flexão foi calculada através da Equação (2), onde P: Carga em um determinado ponto na curva carga-deflexão (N); L: Distância entre os apoios (mm); B: Largura do corpo de prova (mm) e h: Altura do corpo de prova (mm).

$$TRF = \frac{3PL}{2Bh^2} \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio de flamabilidade do compósito

A Tabela 1 apresenta as taxas de queima do compósito com resíduo de lama vermelha, obtida através do ensaio de flamabilidade que atendeu a norma ASTM D 635.

Tabela 1: Resultado do ensaio de flamabilidade.

Composição (%)	Taxa de Queima (mm/min)
Matriz Plena	27,3 ($\pm 0,54$)
40% LV	Sem Ignição (SI)

O compósito com 40% de LV apagou a chama antes que a mesma atingisse a linha de 75 mm, definida pela norma, sendo classificados como sem ignição (SI), tal fato podendo estar relacionado a composição química da lama vermelha, que dentre os componentes, apresenta elevada composição de óxidos de Alumínio (Al_2O_3) e óxidos de Ferro (Fe_2O_3), que, causam retardância à chama no material em que estão presentes [11]. Dessa forma, foi possível notar uma diminuição da taxa de propagação da chama com a incorporação do resíduo na matriz polimérica.

Ao comparar os resultados da taxa de propagação da chama em compósitos com os parâmetros estabelecidos na Resolução nº 498 de 2014 do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) [12] e na norma ASTM D 635, nota-se que tanto a matriz quanto no compósito com 40% de LV apresentaram desempenho satisfatório, uma vez que, a taxa de propagação apresentou valores inferiores aos limites máximos estabelecidos em cada norma.

Um resultado comparativo de compósitos poliméricos contendo porcentagem que variam entre 10 e 40% de diferentes resíduos estão apresentados na Tabela 2, onde nota-se que a inclusão de determinados resíduos resulta em uma melhora no desempenho de retardamento da combustão, um padrão vantajoso, uma vez que um maior tempo de queima do material está associado a uma menor velocidade de propagação da chama, acarretando em uma melhor implementação de medidas de segurança.

Tabela 2: Comparativo do ensaio de flamabilidade deste trabalho com outras literaturas.

Composição (%)	Taxa de Queima (mm/min)	Fonte
40% LV	Sem Ignição (SI)	Este trabalho
30% Cinza Volante	20,94	[13]
10% Resíduo de Caulim	23,85	[14]
20% RCD	14,66	[15]
30% Resíduo de Calcário	17,11	[16]
30% Resíduo de Minério de Ferro	0,61	[11]
40% Resíduo de Cobre	22,31	[17]
20% LV	13,02	[18]

Conforme ilustrado na Tabela 2, a incorporação de resíduo na matriz polimérica demonstra uma alta eficácia nos teste de flamabilidade, resultando em bons desempenhos na taxa de queima. A literatura [11] reforça a ideia de que a adição dos resíduos melhora significativamente o desempenho, visto que ao incorporar 30% do resíduo de minério de ferro, as chamas apresentaram, evidenciando um notável potencial de resistência à combustão. Com a diminuição das porcentagens testadas na matriz polimérica, observou-se, neste caso, que a taxa de queima diminui significativamente, entretanto, devido a composição química que varia de acordo com cada resíduo, pode-se haver ou não retardamento da chama.

Ensaio de flexão do compósito

A Tabela 3 apresenta a caracterização mecânica relacionada a resistência à flexão do compósito com resíduo de lama vermelha, atendendo a norma ASTM D 790.

Tabela 3: Resultados do ensaio de flexão.

Composição (%)	Resistência à Flexão (MPa)
Matriz Plena	25,81 ($\pm 5,15$)
40% LV	28,80 ($\pm 5,32$)

Com base nos resultados apresentados na Tabela 3 nota-se um pequeno ganho de resistência quando o resíduo é inserido na matriz. Levando-se em consideração o desvio padrão apresentado, observa-se que o compósito contendo resíduo de lama vermelha apresenta semelhança com a matriz plena. No entanto, é importante ressaltar que o compósito com o resíduo se destaca por sua eficácia, uma vez que reduz significativamente a proporção de resina utilizada, juntamente a presença dos particulados que, reduzem a mobilidade das cadeias poliméricas, proporcionam uma adesão interfacial entre a matriz e os reforços, aumentando a resistência de fletir do compósito [11]. Um resultado comparativo de compósitos poliméricos contendo diferentes porcentagem e resíduos estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4: Comparativo do ensaio de flexão deste trabalho com outros encontrados na literatura.

Composição (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Fonte
40% LV	28,80	Este trabalho
20% PF de Pó de Sabugo	18,70	[19]
20% PM de Pó de Sabugo	19,30	[19]
20% PG de Pó de Sabugo	25,30	[19]
5% Pó de Madeira	15,10	[20]
10% Pó de Madeira	10,20	[20]

De acordo com a Tabela 4 pode-se notar que a depender do particulado, a interação com a matriz proporcionou comportamentos distintos no ensaio de flexão. A resistência à flexão dos compósitos para as partículas pequenas (PF), partículas médias (PM) e partículas grandes (PG) de Pó de Sabugo demonstrou-se inferior em comparação com os compósitos de Lama Vermelha (LV), as possíveis explicações para tal comportamento envolvem alguns fatores, sendo o mais provável deles, má dispersão e compactação do resíduo na matriz. Nos compósitos produzidos com pó de madeira (5% e 10%) [20], nota-se que com o aumento do teor de particulado têm-se uma redução na resistência do material, podendo acarretar ainda em uma menor deformidade, propriedade importante para ser analisada quando se deseja maior flexibilidade.

CONCLUSÕES

Os compósitos de matriz polimérica com a incorporação do resíduo industrial de lama vermelha demonstraram boa resistência à chama e à flexão. Pelo teste de flamabilidade horizontal, os compósitos apresentaram excelente propriedade de retardância à chama. No teste mecânico de resistência à flexão, os compósitos de lama vermelha apresentaram um bom desempenho em relação a matriz plena, atingindo um valor de 28,80 MPa. Os compósitos produzidos são bons candidatos para aplicações que não necessitam de esforços mecânicos significativos, como forros, revestimento interno de automóveis e entre outras aplicações desta natureza, contribuindo assim para a redução de resíduos e a preservação do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 147, p. 03-07, 03 ago. 2010. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=03/08/2010&jornal=1&pagina=1&totalArquivos=84>. Acesso em 17 set. 2023.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. Sustentabilidade: Alumínio e Saúde. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://abal.org.br/sustentabilidade/aluminio-e-saude/absorcao-e-eliminacao/>. Acesso em 17 set. 2023.
- [3] ECYCLE. Ecycle: Impactos ambientais do Alumínio e suas propriedades. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/aluminio/>, Acesso em 23 set. 2023.
- [4] ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T.; NAVARRO, G. R. B. Caracterização da Lama Vermelha Brasileira (Resíduo do Refino da Bauxita) e Avaliação de suas Propriedades para Futuras Aplicações. In: 3º International Workshop | Advances in Cleaner Production, São Paulo, SP, 2011. Disponível em: <http://www.advancesincleanerproduction.net/downloads.asp>. Acesso em: 18 de setembro de 2023.
- [5] STEIN, R. T.; GEHLEN, R. Z. C.; ROJAS, F. C. Tecnologia dos Materiais. Porto alegre: Sagra, 2019.
- [6] CALLISTER, W. D.; RETHWISH D. G. Ciência e Engenharia de Materiais, uma introdução, 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- [7] FILHO, E. B. S.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. D. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. Revista Matéria, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.
- [8] IEC 60695-11 ed 2.0. Fire hazard testing. Part 11-10: Test flames – 50 W horizontal and vertical flame test methods.
- [9] ASTM D 635 – Standard Test Method for Rate of Burnin or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position, 2018.
- [10] ASTM D 790 – "Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2017.
- [11] ALMEIDA, L. R. Reaproveitamento do resíduo de minério de ferro em compósitos de matriz polimérica. Trabalho de Conclusão de Curso, 2020 (Engenharia de Materiais) - Campus Ananindeua, CANAN/UFPA, Pará.
- [12] Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução nº. 675 - "Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos e dá outras providências." Diário Oficial da União, Seção 1, página 13534.
- [13] FERREIRA, V. H. M. M. Cinzas volantes: uma alternativa para compósitos reforçados com partículas. Trabalho de Conclusão de Curso, 2020 (Engenharia de Materiais) - Campus Ananindeua, CANAN/UFPA, Pará.
- [14] TAVARES, J. F. S. Estudo da incorporação de resíduo industrial de caulim em compósitos de matriz polimérica. Trabalho de Conclusão de Curso, 2021 (Engenharia de Materiais) - Campus Ananindeua, CANAN/UFPA, Pará.
- [15] CARVALHO, P.R.C.; ALENCAR, K.C.; BARBOSA, K.S.L.; RODRIGUES, E.C.; COSTA, D.S. Utilização de resíduos da construção civil e demolição em compósitos poliméricos: características físicas, mecânica e de flamabilidade. In: 6º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, Belém, PA, 2019. Anais ISSN 2175-1870. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/issue/view/37/13>. Acesso em: 28 setembro de 2023.
- [16] SILVA, W. R. Influência da incorporação de resíduo de calcário em um compósito de matriz polimérica isoftálica: Obtenção e caracterização. Trabalho de Conclusão de Curso, 2023 (Engenharia de Materiais) - Campus Ananindeua, CANAN/UFPA, Pará.
- [17] 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. Trabalho de Conclusão de Curso, 2022 (Engenharia de Materiais) - Campus Ananindeua, CANAN/UFPA, Pará.

- [18] SANTOS, E. E. S. Estudo da influência da granulometria dos resíduos de lama vermelha nas propriedades dos compósitos de matriz poliéster. Trabalho de Conclusão de Curso, 2022 (Engenharia de Materiais) - Campus Ananindeua, CANAN/UFPA, Pará.
- [19] OLIVEIRA, M. L. Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de resíduos vegetal proveniente do sabugo de milho. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Rio Grande do Norte.
- [20] VITORIANO, J. O.; FELIPE, R. C. Avaliação das propriedades mecânicas da matriz polimérica com adição de pó de madeira. In: 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu, PR, 2009. Disponível em: <file:///home/chronos/u-97a0d12eb624acad6a13a0103c2010cf83137d3f/MyFiles/Downloads/518.pdf>. Acesso em: 28 setembro de 2023.