ANÁLISE DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINÉRIOS DE FERRO EM MATERIAIS COMPÓSITOS: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E FLAMABILIDADE*

Lucas Rezende Almeida[1]
Gabriel da Cruz Oliveira[2]
Willian Rayol da Silva[3]
Bruno Henrique Alves Mendes[4]
Brenda Thayssa Figueira Daniel[5]
Denilson da Silva Costa[6]
Deibson Silva da Costa[7]

Resumo

Tendo em vista o impacto ambiental causado pela disposição dos resíduos industriais e visando sua aplicação em novos materiais, o presente trabalho apresenta os resultados do estudo e aproveitamento de resíduos de minério de ferro, como reforço para o Compósito de matriz polimérica de poliéster. As proporções em massa de resíduo de minério de ferro utilizadas variaram entre 10 %, 20 % e 30 % com granulometria de 100 mesh. O método de fabricação dos compósitos foi o *hand lay-up* em molde metálico com pressão de 25 kN. A matriz utilizada foi a resina poliéster isoftálica, acelerador a base de cobalto (1,5 %) e o iniciador MEK-P (Butanox M-50) a (1 %) volumes. Realizaram-se ensaios mecânicos de tração, físicos e térmicos, conforme as normas ASTM 3039, NBR 12766 e ASTM 635 respectivamente. A melhor tensão de resistência a tração foi obtida na composição de 10 %. As propriedades físicas porosidade aparente e massa específica aparente aumentaram e absorção de água diminuíram conforme elevou-se as composições. Os corpos de prova de flamabilidade apresentaram capacidade de retardo à chama quando comparados com as recomendações da norma, e as composições de 20 % e 30 % apagou a chama.

Palavras-chave: Compósitos; Resíduo; Minério de Ferro; Caracterização.

ANALYSIS OF REPRODUCTION OF IRON ORES RESIDUES IN COMPOSITE MATERIALS: DRAIN RESISTANCE AND FLAMMABILITY

Abstract

Due to the environmental impact caused by the disposal of industrial waste and its application in new materials, the present work presents the results of the study and exploitation of iron ore residues as reinforcement for the composite of polyester polymer matrix. The mass proportions of waste iron ore used varied between 10 %, 20 % and 30 % with granulometry of 100 mesh. The composite manufacturing method was the hand lay-up in metallic mold with pressure of 25 kN. The matrix used was isophthalic polyester resin, cobalt based accelerator (1.5 %) and primer MEK-P (Butanox M-50) at (1 %) volumes. Physical and thermal mechanical tensile tests were performed according to ASTM 3039, NBR 12766 and ASTM 635 respectively. The best tensile tensile strength was obtained in the composition of 10 %. The physical properties apparent porosity and apparent specific mass increased and water absorption decreased as the compositions rose. The flammability test specimens showed flame retardancy when compared to standard recommendations, and compositions of 20 % and 30 % erased the flame.

Keywords: Composites; Residue; Iron ore; Description.

[1] *Graduando em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua – PA, Brasil: lucasreezendee@gmail.com.*
[2] *Graduando em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua – PA, Brasil: gdco.cruz@gmail.com.*
[3] *Graduando em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua – PA, Brasil: rayolwillian@gmail.com.*
[4] *Mestre em Engenharia Química – PPGEQ/ITEC, Graduado em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém – PA, Brasil: bruno_mendes15@hotmail.com.*
[5] *Mestranda em Engenharia Mecânica – PPGEM, Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais –GPEMAT, Graduada em Bacharelado em Ciência e Tecnologia – Tecnologia Mineral, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua – PA, Brasil: brendadaniell@yahoo.com.br*
[6] *Engenheiro Químico, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de minas, Professor Adjunto I, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente da Universidade do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), Marabá – PA, Brasil: denilson@unifesspa.edu.br.*
[7] *Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia de Recursos Naturais, Professor Adjunto I, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua – PA, Brasil: deibsonsc@yahoo.com.br.*

1 INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais ocorre em uma velocidade acentuada, comprometendo o futuro da sociedade como um todo [1]. Na atividade de mineração é gerado um grande volume de resíduos sólidos e a disposição dos rejeitos constitui-se em um grande passivo ambiental no mundo todo, visto que os resíduos são cumulativos [2].

No brasil a atividade mineradora corresponde a 5% do PIB nacional [3], é uma grande fonte de renda e equilibra os índices de crescimento do país em grau significativo.

Como alternativa para o reaproveitamento do minério de ferro podemos destacar a incorporação desses resíduos em materiais compósitos, que por definição é "qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades" [4].

Dentre as subclassificações dos compósitos, estão os materiais compósitos com matriz polimérica que tem se destacado devido as suas propriedades mecânicas desejáveis. A matriz (fase contínua) tem a função de transmitir a tensão ao longo do agente de reforço (fase dispersa), que por sua vez pode ser orgânico ou inorgânico e se apresentar sob a forma de materiais particulados, fibrosos ou estruturais [5].

Tendo em vista o impacto ambiental causado pela disposição dos resíduos industriais e visando sua aplicação em novos materiais, foram produzidos compósitos de matriz polimérica de poliéster com resíduo de minério de ferro, o presente trabalho visa caracterizar os materiais compósitos para determinação de suas propriedades mecânicas, físicas e de flamabilidade e verificação de sua aplicabilidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a fabricação dos compósitos, foi utilizado a resina poliéster isoftálica insaturada de média reatividade, baixa viscosidade e amarelada, juntamente com acelerador de cobalto de cor azulada com a finalidade de diminuir o tempo de gel, foi utilizado também o iniciador MEK-P (Butanox M-50) para realizar o processo de

polimerização da resina e o desmoljet como agente desmoldante. Todos adquiridos na Empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass Ltda.

Os compósitos foram confeccionados na Usina de Materiais do Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará utilizando o resíduo de minério de ferro oriundo de empresas locais do sudeste do Pará, por método manual (*hand lay-up)* associado à compressão para confecção de placas. Fez-se a classificação de todo material particulado em peneiras de 100 mesh da série Tyler.

De acordo com as composições, realizou-se a determinação da mesma e em seguida a remoção da umidade em estufa durante 24 horas em temperatura aproximada de 100º C. Previamente à produção dos compósitos aplicou-se desmoldante no molde metálico, para facilitar a sua remoção após a prensagem.

Em seguida, determinou-se a massa da resina com as devidas proporções para cada porcentagem. Após a retirada do resíduo da estufa, foi feito o preparo da mistura.

A mistura ocorre na seguinte ordem: resina, catalisador metílico, resíduo e butanox. Adiciona-se na resina o catalisador, com o auxílio de um bastão de vidro faz-se a mistura até haver apenas uma fase homogênea no recipiente, incorpora-se o resíduo na mistura homogeneizando-o. Por último adiciona-se o butanox à mistura para iniciar o processo de cura.

A mistura é despejada de maneira homogênea no molde metálico, já posicionado e nivelado na prensa hidráulica de marca Marcon, assim que o material (mistura) atinge o ponto de gel, para que então a tampa do molde seja sobreposta e a prensagem iniciada a uma carga de 25 kN por vinte minutos. A Figura 1 apresenta o fluxograma da fabricação.

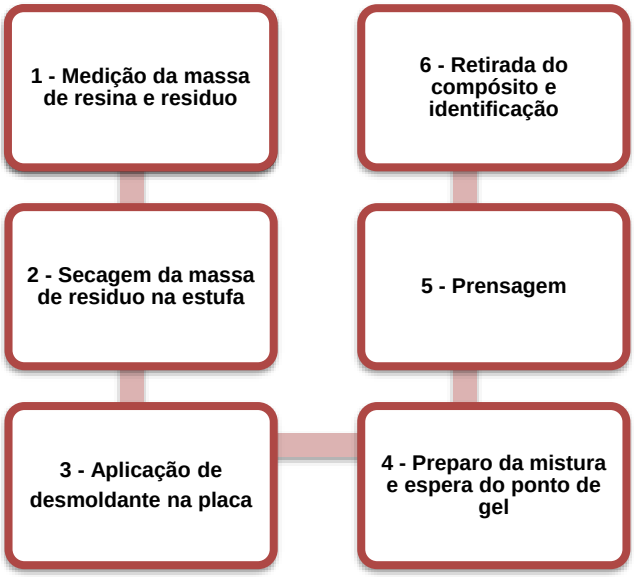

Figura 1. Fluxograma de confecção do material compósito.

Após a retirada do compósito do molde metálico, a mesma é disposta sob pesos padrões por cerca de 24h, decorrido o tempo necessário para o processo de cura total, realizou-se o corte das placas para o preparo dos corpos de prova, seguindo as recomendações das normas para os ensaios físicos NBR 12766/1992 [6], de tração ASTM D 3039 [7] e flamabilidade ASTM D 635 [8].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios Físicos

A Tabela 1 apresenta os resultados de absorção de água, porosidade aparente e massa especifica aparente realizados de acordo com a norma NBR 12766/1992 [6].

Tabela 1: Resultados dos ensaios físicos para compósitos com cinza

COMPOSIÇÃO	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	POROSIDADE APARENTE (%)	MASSA ESPECIFICA APARENTE (g/cm³)
Resina Plena	0,2815 ± 0,05	0,3447 ± 0,06	1,2243 ± 0,0007
10 %	0,3826 ± 0,08	0,6001 ± 0,14	1,5680 ± 0,0053
20 %	0,3228 ± 0,02	0,6068 ± 0,05	1,8795 ± 0,0109
30 %	0,2931 ± 0,04	0,6479 ± 0,09	2,2115 ± 0,0084

Analisando a Tabela 1 observa-se que conforme a proporção de resíduo de minério de ferro é elevada há um aumento na massa especifica aparente. Levando em consideração que a massa específica da resina de acordo com sua ficha técnica é de aproximadamente 1,157 g/cm^3, enquanto a do resíduo é 4,50 g/cm^3. Os resultados estão de acordo com o exposto pela regra da mistura [4], onde cada fase constituinte do material compósito contribui para as propriedades efetivas do mesmo. É importante ressaltar que as formulações realizadas através da regra das misturas possibilitam apenas estimativas aproximadas. O aumento do MEA dá-se devido ao aumento da proporção de resíduo de minério de ferro a qual possui massa específica maior em relação à matriz.

O aumento mais expressivo de massa especifica aparente ocorreu no compósito contendo 30 % de minério de ferro a qual foi aproximadamente 81 % superior ao material de referência (resina plena).

Observa-se também que há um aumento da porosidade aparente em função das partículas que pode ser associado a presença de falhas como bolhas, vazios e trincas. De acordo com a análise de variância (ANOVA) todas as frações de compósitos tiveram porosidade aparente e absorção de água com em média estatisticamente iguais com 95 % de confiança, tendo em vista que a probabilidade de significância (Valor-P) é de 0,05758.

Ao comparamos com El Banna [9] que analisa o resíduo de cobre observa-se que a massa específica aparente aumenta conforme o aumento de resíduo na matriz e a absorção de água diminui quando aumenta sua proporção evidenciando um comportamento parecido ao resíduo de minério de ferro.

3.2 Ensaio de Tração

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os resíduos de minério de ferro em suas respectivas composições em massa, fabricados de acordo com a norma ASTM D 3039 [7].

Tabela 2: Resultados obtidos com o ensaio de tração

COMPOSIÇÃO	TENSÃO DE RESISTÊNCIA (MPa)
Resina Plena	21,34 ± 7,06
Fe 10 %	29,06 ± 1,68
Fe 20 %	23,08 ± 0,41

Fe 30 %	22,04 ± 2,53

Nota-se que independente da proporção de resíduo utilizado, há um aumento das tensões de resistência a tração em relação a matriz plena. Isso pode ter ocorrido devido a fase dispersa, ou seja, de sua forma, tamanho, distribuição e orientação que ajuda a distribuir melhor as tensões que são exercidas no interior do material na medida que o mesmo é tracionado [4] [10].

A melhor tensão de resistência foi obtida na composição de 10 %, com 29,06 MPa, resultado este evidenciado pela análise de variância (ANOVA) no qual a probabilidade de significância (Valor-P) é de 0,02274 indicando que ao menos uma das frações é em média diferente das demais. Para determinar quais frações são estatisticamente diferentes, com um grau de confiança de 95 %, foi realizado o teste de Tukey conforme disposto na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados obtidos com o teste de Tukey's Pairwise

Composição de Ferro	**0 %**	**10 %**	**20 %**	**30 %**
0 %		**0,02727**	0,889	0,9913
10 %			0,1063	**0,04795**
20 %				0,9729
30 %				

A Tabela 3 comprova que a única fração significativamente diferente foi a de 10 % que apresentou um comportamento em média superior aos demais, provavelmente devido a uma boa homogeneização, acomodação, disposição e impregnação no sistema resíduo/matriz possibilitou compósitos com bom acabamento, poucos defeitos e porosidades.

Contudo, nas composições de 20 % e 30 % houve um decaimento da resistência, o que pode ser explicado devido ao aumento da porosidade do material que ocorre com o aumento da composição, resultado esse observado durante a análise dos ensaios físicos.

Rodrigues [11] ao analisar o resíduo de mármore e granito e Costa [12] ao estudar resíduos de lama vermelha, caulim e cinza volante constataram que todos os compósitos apresentaram resultados inferiores a matriz plena, tal fato pode ter ocorrido devido à dificuldade de impregnação e homogeneização entre o sistema matriz/resíduos [12]. Apesar da tendência de melhora nas propriedades mecânicas

do resíduo de minério de ferro pelo fato de obter valores superiores a resina plena, vale ressaltar que o mesmo ainda não atuou como reforço efetivo, mas desempenhou um papel de carga de enchimento.

3.3 Ensaio de Flamabilidade

A Tabela 4 exibe os dados coletados durante o ensaio de resistência à chama, realizados de acordo com a norma ASTM D 635 [8].

Tabela 4: Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal

COMPOSIÇÃO	TAXA (mm/min)
Resina Plena	22,60 ± 1,52
Fe 10 %	21,42 ± 0,96
Fe 20 %	3,91 ± 1,13
Fe 30 %	0,61 ± 0,14

As matrizes poliméricas geralmente apresentam baixa resistência a chama, não sendo indicadas a aplicações mais propensas à ocorrência de incêndios [13]. Contudo, a resina plena utilizada nos ensaios apresentou uma taxa de propagação adequada em relação ao exigido pela norma ASTM D 635 [8]. Nota-se também que a partir da inclusão de resíduos houve uma diminuição da taxa de queima. Dessa forma, apresentando maior rendimento no retardo de queima do material, pois quanto maior for o tempo de queima, dificulta a propagação da chama e facilita a extinção da mesma.

Vale enfatizar que nas amostras com incorporação de 20 % e 30 % de resíduo as chamas se apagaram, conferindo-o características de retardante de chama. O melhor resultado foi obtido na proporção de 30 % de resíduo de minério de ferro.

Pode-se afirmar que o material compósito fabricado neste trabalho independente da proporção usada, são classificados como HB. Visto que nas diretrizes da norma utilizada, é informado que taxas inferiores a 40 mm/min são classificadas como tal.

No âmbito nacional, a resolução CONTRAN 675 [14] exige que os revestimentos internos da indústria automobilística tenham uma velocidade de propagação de chama de 250 mm/min, enquanto que em outros países com pesquisas avançadas na área, esse valor é estabelecido em 80 mm/min [13].

O decréscimo da taxa de queima conforme há um aumento do percentual de resíduo é constatado no trabalho de Rodrigues [11] ao estudar o resíduo de mármore e granito sendo o menor para o compósito com 40 % de resíduo, valor este de aproximadamente 7,98 mm/min. El Banna [9] ao analisar o resíduo de cobre obteve taxa de queima de 14,51 mm/min. Comparando esses resultados com os valores obtidos com o resíduo de minério de ferro constatou- se uma redução 92 % e 96 % respectivamente

A Tabela 5 apresenta uma comparação entre a composição de 30 % e os padrões exigidos pelas normas e diretrizes, no qual é possível observar o desempenho obtido durante os ensaios.

Tabela 5: Comparação dos resultados obtidos com parâmetros exigidos

RESÍDUO / PROPORÇÃO	TAXA (mm/min)
CONTRAN 675	250,00
ASTM D 635	40,00
Fe 30 %	**0,61**

Comparando-se os resultados obtidos no trabalho com os exigidos pelas normas, nota-se que os materiais compósitos fabricados apresentaram excelentes resultados, pois apresentaram valores bem menores do que os exigidos. Em relação a norma do CONTRAN 675 [14], obteve-se uma redução de 99,75 % na taxa de propagação para o resíduo de minério de ferro. Para o valor estabelecido pela ASTM 635 [8], a redução foi de aproximadamente 98,47 %**.**

4 CONCLUSÃO

Os materiais fabricados submetidos ao ensaio de flamabilidade obtiveram classificação HB referindo à norma ASTM D 635 [8]. As composições obtiveram resultados satisfatórios, com valores de taxas de propagação bem menores do que o máximo exigido pela resolução da CONTRAN 675 [11] e as frações de 20 % e 30 % apagaram a chama.

Em relação aos ensaios de tração conforme aumentou a proporção de resíduo houve uma diminuição da resistência mecânica, obtendo a melhor tensão de resistência na composição de 10 %.

É importante ressaltar que o reaproveitamento de resíduos de minério de ferro contribui de maneira significativa na redução de impactos ambientais gerados pela

mineração. Além da vantagem ambiental o reaproveitamento do resíduo de minério de ferro mostrou vantagens técnica uma vez que pode agregar valor a um subproduto.

Pôde-se observar a relevância de destinação e reaproveitamento dos resíduos de minério de ferro, visto o expressivo volume de geração, escassez dos recursos na natureza, enorme demanda por espaços e degradação ambiental.

Agradecimentos

A Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Laboratório de Engenharia Química (LEQ).

REFERÊNCIAS

1 Portella M. O. Efeitos colaterais da mineração no meio ambiente. Revista brasileira de políticas públicas. Vol. 5, N° 3, Brasília. 2015.
2 Primi, Lilian. Rejeitos de mineração são “problema crônico”. 2015. [acesso em 26 jan. 2019]; Disponível em: http://www.carosamigos.com.br/index.php/cotidiano/5631-rejeitos-de-mineracao-sao-problema-cronico.
3 Lopes M. Mineração no Brasil atual e sua influência na economia nacional. 2014. [acesso em 17 fev. 2019]; Disponível em: https://tecnicoemineracao.com.br/mineracao-brasil-atual-e-sua-influencia-na-economia-nacional.
4 Callister W. Ciência e Engenharia de Materiais - uma introdução. 8 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
5 Akil M. F. et al. Kenaf fiber reinforced composites: a review. Materials and Design, Surrey, v. 32, n. 8-9, p. 4107-4121, 2011.
6 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR 12766 "Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente, absorção d’água aparente." 1992. 2p.
7 ASTM D 3039 "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2000.
8 ASTM D 635 "Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position" Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2010.
9 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 de doutorado, Universidade Federal do Pará, 2017.
10 Moraes M.H.; D.P. Queiroz, L.S. Nascimento, J.S. Souza, R.T. Fujiyama, D.S. Costa. Caracterização mecânica e resistência à chama de compósitos poliméricos com adição de resíduos de lama vermelha e caulim. Ln: 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu - PR, 2018.
11 Rodrigues D. N. Influência da adição de resíduo de mármore e granito em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de coco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2016.
12 Costa D. S. Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais. Tese de doutorado, Universidade Federal do Pará, 2016.

13 Ribeiro L. M. Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (palf). Holos, ano 29, vol 1, 2013.
14 Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução n°. 675 - "Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos e dá outras providências." Diário Oficial da União, Seção 1, página 13534, 09 de setembro de 1986.