

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO FINO PROVENIENTE DA EXPLORAÇÃO DO ITABIRITO NA PRODUÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA

S.M.R. de Carvalho^{(1,2)*}, C.B. Freire⁽¹⁾, P.H.C.P. Tavares⁽¹⁾, F.S. Lameiras⁽¹⁾

1)Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Av. Presidente Antônio Carlos, 6.627, Belo Horizonte, MG, 31270-901. E-mail: stellamrc@gmail.com

(2)Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Presidente Antônio Carlos, 6.627, Belo Horizonte, MG, 31270-901

RESUMO

O beneficiamento do minério de ferro leva à geração de uma grande quantidade de resíduos, cuja disposição é problemática e causa sérios impactos ambientais. O aproveitamento desses resíduos na produção de novos materiais tem recebido bastante atenção das empresas e órgãos de pesquisa, porque podem proporcionar um maior aproveitamento das jazidas e a redução de passivos ambientais a serem dispostos nas barragens. A exploração do itabirito no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais gera uma quantidade diária da ordem de dezenas de milhares de toneladas de resíduos, nos quais predominam quartzo e óxido de ferro, com características físicas e químicas uniformes, favorecendo sua utilização na produção de diversos materiais. A madeira plástica, um compósito obtido a partir de plástico reciclado e fibras vegetais, é uma alternativa para a utilização dos resíduos finos gerados no processo de flotação do minério de ferro. Ela possui características semelhantes às da madeira, podendo ser serrada, usinada e pintada, além de apresentar vantagens sobre o MDF e o aglomerado, tais como maior resistência à umidade e não utilização de resinas a base de formaldeído para aglutinar as fibras. Porém, pode apresentar problemas relacionados à resistência a altas temperaturas e à propagação de chamas. A madeira plástica apresentada neste trabalho tem como proposta o reaproveitamento de poliestireno expandido (isopor®), da serragem proveniente de indústrias moveleiras e do óxido de ferro residual da mineração. A adição do óxido ao material tem o objetivo de melhorar suas propriedades de resistência à chama e à radiação UV, que compromete a resistência mecânica dos polímeros expostos ao sol. Foram realizados ensaios mecânicos de flexão e de resistência à chama da madeira plástica com três proporções de resíduo fino à base de óxido de ferro, avaliando-se os efeitos da adição deste resíduo nas propriedades antichama e mecânicas do compósito.

PALAVRAS-CHAVE: resíduos; itabirito; poliestireno, serragem, madeira plástica

1. INTRODUÇÃO

O compósito estudado se encaixa na categoria de madeira plástica e tem como objetivos substituir a madeira em alguns usos, além de reaproveitar três classes de resíduos: poliestireno expandido, pó de serra, proveniente de marcenarias e indústrias moveleiras, e resíduo fino de óxido de ferro, proveniente da mineração do itabirito.

1.1. Poliestireno Expandido

Os plásticos são um exemplo amplamente conhecido de material cujo uso crescente vem criando desafios com relação à poluição que geram depois de descartados. No Brasil, o consumo anual de plásticos foi de 27,94 kg per capita em 2009 (ABIPLAST, 2009), e o descarte desses materiais traz diversos problemas relacionados à sua disposição adequada – gastos com transporte e com controle das áreas de depósito, além de pressões sociais - principalmente nas grandes cidades. Para lidar com esse problema, além da redução do consumo, têm sido buscadas alternativas que diminuam o volume de resíduos por meio do reuso ou da reciclagem dos plásticos. Porém, apenas 16,5% em massa é mecanicamente reciclado atualmente. (LAREX)

O poliestireno expandido (EPS), ou isopor®, tem muitas aplicações nas áreas de artigos de consumo (caixas térmicas, pranchas, porta-gelo, etc.), na agricultura e na construção civil. Segundo a Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (Fox Reciclagem), foram produzidas 55 mil toneladas do material no Brasil em 2007 e outras 2 mil toneladas foram importadas junto com equipamentos eletrônicos e diferentes bens trazidos do exterior. Por ser um material de densidade muito baixa, a coleta do EPS para reciclagem só se torna economicamente viável com o desenvolvimento de usos desse material em produtos de maior valor agregado. (Fox Reciclagem)

1.2. Resíduo de Minério de Ferro

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de minério de ferro, sendo Minas Gerais o maior produtor. No Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais encontra-se em grande quantidade o itabirito, que é uma rocha constituída de camadas alternadas com predominância de quartzo e de óxido de ferro. Segundo o IBRAM, “Nas atividades de mineração, as principais fontes de degradação são: a deposição de resíduos ou rejeitos decorrentes do processo de beneficiamento e a deposição de materiais estéril, ou inerte, não aproveitável, proveniente do decapeamento superficial” (IBRAM, 1987).

A exploração do itabirito como minério de ferro para a indústria siderúrgica gera, entre outros, uma quantidade de resíduos (arenoso e lama) da ordem de milhares de toneladas diárias. Esses resíduos apresentam características físicas e químicas uniformes, que, associadas à grande disponibilidade, fazem deles possíveis matérias-primas para vários segmentos industriais. O desenvolvimento de processos alternativos, que permitam o uso desses resíduos em produtos já existentes, aliado à pesquisa de novos materiais que também os utilizem, tem sido muito incentivado porque podem oferecer alternativas menos agressivas ambiental e socialmente que a disposição do rejeito em barragens.

1.3. Madeira

Mais uma questão muito conhecida é a utilização de madeira de lei na fabricação de móveis e artigos decorativos. O setor moveleiro tem crescido no país. A conquista de novos mercados e lançamento de novos produtos levam as empresas desse setor a buscarem matérias-primas alternativas, bem como seguir a tendência geral de diminuir os resíduos gerados. (Ben F.,Muller C.J., Kliemann Neto F.J, 2004)

Uma classe de materiais ainda pouco explorada pela indústria moveleira são as madeiras plásticas. O conceito de madeira plástica é relativamente novo e tem se tornado mais conhecido à medida que alternativas para o uso da madeira se tornam necessárias. Madeira Plástica é um compósito obtido a partir de um termoplástico e fibras vegetais. Ela possui características semelhantes às da madeira, podendo ser serrada, usinada e pintada, além de apresentar vantagens sobre o MDF e o aglomerado, tais como maior resistência à umidade e não utilização de resinas a base de formaldeído para aglutinar as fibras. (Ben F.,Muller C.J., Kliemann Neto F.J, 2004) Estão sendo desenvolvidas, em todo o mundo, novas composições e técnicas de produção e processamento de madeira plástica, buscando aumentar sua aplicação. Atualmente, as principais aplicações desses materiais é a fabricação de decks e pallets. (Chaharmahali, Tajvidi e Najafi, 2011)

1.4. Retardantes de Chama

Embora apresente muitas vantagens, a madeira plástica tem alguns problemas inerentes à sua composição, que dificultam sua aplicação em determinados segmentos. Um desses problemas é a inflamabilidade, uma característica dos plásticos. Para contornar esse problema, podem ser adicionados ao compósito os chamados retardantes de chama, aditivos utilizadas para retardar a ignição, diminuir a velocidade de queima e/ou a formação de fumaça. Os retardantes de chama mais utilizados algum tempo atrás eram compostos halogenados que, embora eficientes, apresentam problemas sérios com relação à poluição e toxicidade. (Sant'Anna, 2004). Já são utilizados outros retardantes de chama, dentre os quais têm recebido especial atenção os aditivos minerais.

As cargas minerais mais utilizadas como antichama são o $(Al_2O_3 \cdot 3H_2O)$ e $Mg(OH)_2$, (Wilkie C.A, 2005). Porém há também a possibilidade de utilizarem-se óxidos de ferro. Estudos já mostraram que a goethita $(FeO(OH))$ atua como retardante de chama e supressor de fumaça na queima de materiais poliméricos. (Carty *et al*,1999) O estudo das propriedades de óxidos de ferro como retardantes de chama na produção de madeiras plásticas é de grande interesse, pois seu uso possibilitaria uma redução substancial do custo de produção desse tipo de compósito, já que os retardantes de chama correntemente utilizados podem representar uma grande parcela desse custo. Além disso, seria uma alternativa importante para a utilização de resíduos provenientes da indústria de mineração. Para esse estudo deve ser levada em conta a influência da adição desses resíduos sobre as diversas propriedades da madeira plástica, tais como cor, densidade e resistência à flexão.

O objetivo desse trabalho é avaliar a influência da adição do resíduo fino da mineração do itabirito nas propriedades de cor, densidade, resistência à flexão e tempo de queima da madeira plástica.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Confecção de Corpos-de-Prova

Para a confecção dos corpos de prova, imergiu-se inicialmente o EPS em solvente 90:10 (90 % de acetona e 10 % de álcool etílico). Após alguns minutos obteve-se uma espécie de pasta de poliestireno “swelled” em acetona.

Preparou-se uma mistura de resina de poliéster insaturado, catalisador (epóxido de metil cetona), promotor de adesão (viniltrimetoxisilano) e cobalto 6%, na seguinte proporção:

- 4,5 g de resina
- 0,09 g de catalisador
- 0,45 g de promotor de adesão
- 1 gota de cobalto 6%

A mistura de resina foi adicionada ao pó de madeira de granulometria $\leq 0,83$ mm, na proporção de 4,5 g de resina (aproximadamente 5,05 g de mistura) para cada 20,0 mL de pó de madeira. Homogeneizou-se manualmente a madeira e a mistura de resina. Adicionou-se, então, poliestireno “swelled” em acetona, na proporção volumétrica de 1:1 em relação ao pó de madeira, e misturou-se manualmente. Nas composições em que se utilizou também o resíduo de minério, o mesmo foi misturado ao pó de madeira antes da adição da resina.

Obteve-se uma massa avermelhada e facilmente moldável. Os corpos-de-prova utilizados no ensaio de flexão foram moldados em uma matriz metálica de dimensões 4 x 10 x 80 mm, com placas de teflon isolando o material, e podem ser vistos na Figura 1. A cura desses corpos-de-prova foi feita fora da matriz, devido à grande dificuldade de retirá-los da matriz após a cura. Os corpos-de-prova para o ensaio de chama foram confeccionados em uma matriz semelhante à anterior, porém de dimensões 7 x 70 x 180 mm com a cura foi feita na matriz. Todos os corpos-de-prova foram deixados por 24h ao ar livre e temperatura ambiente, com posterior cura de 1h30 a 150°C.

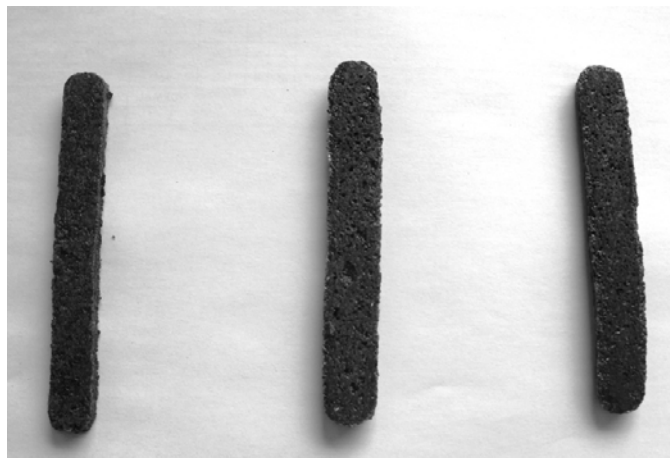


Figura 1: Corpos de prova confeccionados para o teste de flexão. Da esquerda para a direita, as madeiras plásticas de composição 1, 2 e 3.

Foram avaliadas três composições do compósito de madeira plástica, relacionadas na Tabela I.

Tabela I: Proporções das composições de madeira plástica estudadas

Composição	Proporção em volume Madeira:Poliestireno	Proporção em massa Madeira:Minério
1	1:1	1:0
2	1:1	2:1
3	1:1	1:1

2.2. Teste de Flexão

As propriedades de flexão foram avaliadas de acordo com a norma ASTM D 790M – 92, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials [Metric]. Usou-se o Método de Teste I (3-Point Loading), e o Procedimento A descritos na norma. Os demais parâmetros do teste estão relacionados nas Tabela II e III:

Tabela II: Parâmetros do teste de flexão

Distância entre suportes (L)	48 mm
Razão L/d	16
Velocidade	1,7 mm/min

Tabela III: Largura e profundidade dos corpos de prova

Corpo-de-prova	Largura (b) (mm)	Profundidade (d) (mm)	Corpo-de-prova	Largura (b) (mm)	Profundidade (d) (mm)
1.1	10,57	4,75	3.1	10,27	4,95
1.2	10,42	4,40	3.3	10,15	5,40
1.3	10,38	4,70	3.4	10,27	5,55
1.4	10,20	4,55	3.5	10,12	5,00
1.5	9,07	5,00	3.7	10,62	5,00
2.1	10,33	4,90	4.1	10,00	5,20
2.2	11,32	5,45	4.2	9,77	5,10
2.3	11,33	5,40	4.4	10,43	4,80
2.4	10,80	5,25	4.5	9,80	5,35
2.5	11,58	5,25	4.6	10,03	4,90

2.3. Teste de Inflamabilidade

Como o objetivo era avaliar o impacto da adição do resíduo de minério de ferro à madeira plástica sobre as propriedades de queima do material, realizou-se um teste comparativo de inflamabilidade. O teste foi baseado na norma ASTM D 3801 – 87, Standard Test Method for Measuring the Comparative Extinguishing Characteristics of Solid Plastics in a Vertical Position.

Foram utilizados corpos-de-prova de dimensões 7 x 13 x 127 mm, sendo que os cinco exemplares de cada composição foram obtidos a partir de um único corpo de prova maior, previamente cortado. Esse procedimento, embora restrinja um pouco o teste, permite que se tenha uma melhor noção da repetibilidade das medidas.

Devido a limitações técnicas, não se adotou as recomendações de acondicionamento das amostras, tendo as mesmas sido deixadas à temperatura e umidade ambientes desde o fim da cura até o momento do teste.

2.4. Medição da Densidade

Para medir a densidade de pequenas amostras das diferentes composições de madeira plástica, utilizou-se um picnômetro de vidro, de volume 27,14 cm³. Mediu-se a massa do picnômetro vazio, do picnômetro cheio de água destilada, de cada amostra seca e do picnômetro cheio de água com cada uma das amostras dentro. Mediu-se ainda a temperatura da água utilizada e consultou-se sua densidade em uma tabela (Green e Perry, 2008). A partir desses dados, calculou-se a densidade das amostras através das equações 1,2 e 3.

$$D_{am} = M_{am} / V_{am} \quad (1)$$

$$V_{agi} = (M_{P+ag} - M_P) / D_{ag} \quad (2)$$

$$V_{am} = V_{agi} - (M_{P+ag+am} - M_P) / D_{ag} \quad (3)$$

Onde:

D_{am} : Densidade da amostra

M_{am} : Massa da amostra

V_{am} : Volume da amostra

V_{agi} : Volume de água quando há somente água no picnômetro

M_{P+ag} : Massa do picnômetro cheio de água

M_P : Massa do picnômetro

$M_{P+ag+am}$: Massa do picnômetro com água e amostra

D_{ag} : Densidade da água à temperatura de trabalho

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1. Teste de Flexão

Tabela IV: Resultados do teste de flexão

Composição	Observações do módulo de elasticidade (MPa)					Média	Soma de quadrados
	1	2	3	4	5		
1	1148,3	1220,03	1193,07	1152,26	1443,28	1231,388	59660,349
2	1239,91	1007,72	891,67	1097,02	938,65	1034,994	76405,598
3	1547,05	1607,63	1247,87	1379,3	1258,75	1408,12	107927,837

Os resultados obtidos para os corpos de prova de composição 1, 2 e 3 estão apresentados na Tabela IV. A média geral, MédiaGeral, é a média das médias (1224,834). A soma quadrática do erro, SS_{erro} , é dada pela soma das somas de quadrado (243993,784). A soma quadrática das composições, SS_{comp} , é dada pela soma dos quadrados das diferença entre cada média e a média geral multiplicada pelo número de observações (nesse caso, 5). Assim, $SS_{comp} = 348379,692$. A média quadrática do erro, MS_{erro} , é a soma quadrática do erro, SS_{erro} , dividido pelo número de graus de liberdade para o erro (12). Assim, $MS_{erro} = 20332,82$. A média quadrática das composições, MS_{comp} , é dada pela soma quadrática das composições, SS_{comp} , dividida pelo número de graus de liberdade das composições (2). Assim, $MS_{comp} = 174189,85$. O F_0 é dado pela razão entre a média quadrática das composições e a média quadrática do erro, ou seja, $F_0 = MS_{comp}/MS_{erro} = 8,57$. O F crítico com 95 % de confiabilidade é dado por $F_{2,12;0,95} = 3,89$. Como $F_0 > 3,89$, pode-se concluir que para pelo menos uma das composições, o módulo de elasticidade é diferente.

Para saber qual das composições produziu o módulo de elasticidade diferente, utilizou-se o teste de Duncan. Para isso, considerou-se que o desvio padrão de cada média é dado pela raiz quadrada da média quadrática do erro dividido pelo número de medidas (5), ou seja o desvio padrão das médias, S , é igual a 63,77. Fazendo as diferenças entre as médias, temos que $(1408,12 - 1034,994) = 373,13 > R_{0,05}(3,12) \times S = 3,23 \times 63,77 = 205,98$, $(1408,12 - 1231,388) = 176,73 < R_{0,05}(2,12) \times 63,77 = 196,89$ e $(1231,388 - 1034,994) = 196,89 > R_{0,05}(2,12) \times 63,77 = 196,41$. $R_{0,05}(p,f)$ é a faixa de significância tabelada para o teste de Duncan, onde p é a ordem do maior valor da comparação de

médias e f é o grau de liberdade do desvio padrão. Assim, conclui-se que somente a composição 2 tem um módulo de elasticidade menor que aquele das outras composições. A composição 2 é aquela onde a razão madeira:resíduo é igual a 2, a composição 1 não tem resíduo e a composição 3 tem uma razão igual a 1. Esse fato pode indicar que há interação entre a madeira e o resíduo.

3.2. Teste de Inflamabilidade

De acordo com a norma tomada como base (ASTM D 3801-87), deveriam ser medidos os tempos de queima após a primeira e após a segunda exposição do corpo-de-prova à chama, assim como o tempo de brilho após a extinção da chama. Porém, diferente do esperado, o material queimou até o fim após a primeira exposição de 10 s à chama, impossibilitando que se seguisse com os demais procedimentos indicados pela norma. Optou-se então por medir o tempo que cada corpo-de-prova demora para queimar até o fim, após ser submetido por 10 segundos à chama conforme descrito na norma. Os resultados obtidos estão relacionados na Tabela V.

Tabela V: Resultados do teste de chama

Corpo de prova	Tempo de queima (s)	Média (s)	Desvio padrão(s)
1.1	233	235,5	5,69
1.2	238		
1.3	242		
1.4	229		
1.5	-		
2.1	406	324,2	58,36
2.2	327		
2.3	323		
2.4	324		
2.5	241		
3.1	330	306,2	44,18
3.2	243		
3.3	336		
3.4	277		
3.5	345		

O comportamento do material não é previsto pela norma, o que dificulta a análise dos resultados obtidos a partir desse teste. O que se tornou evidente é que, mesmo que os resíduos de minério usados possam melhorar as propriedades de resistência à chama de certos materiais, essa melhora não foi significativa no caso da madeira plástica em estudo. Além disso observou-se que a queima do material gera grande quantidade de fumaça escura e partículas (fuligem). Para estudos futuros, é interessante que sejam exploradas cargas com propriedades de supressão de fumaça, além dos compostos anti-chama.

3.3. Densidade

Os valores de densidade obtidos para cada composição estão relacionados na tabela VI.

Tabela VI: Resultados da medição de densidade

Composição	1	2	3
Densidade (g/cm ³)	0,8902	0,9413	1,084

Como esperado, a adição do resíduo de minério leva a um aumento da densidade do compósito. Isso se deve ao fato de que a granulometria do resíduo é menor que a da madeira, o que favorece o empacotamento, e sua densidade é significativamente maior. Comparando-se os valores de densidade do compósito com a densidade de diversas madeiras com 13% de umidade, pode-se dizer que as três composições apresentam densidades compatíveis com a aplicação como substituinte da madeira. A densidade da composição 1 se aproxima da densidade do Jatobá (921 kg/m³), por exemplo, a da composição 2 se aproxima da Muiracatira (945 kg/m³), e a da composição 3, da Sucupira (1101 kg/m³) e do Ipê (1103 kg/m³). (ABP, 2011)

4. CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados pode-se concluir que a adição de resíduo de minério à composição da madeira plástica em estudo leva a diferenças em sua propriedade de resistência à flexão e em sua densidade. Uma adição desse resíduo na proporção mássica 1:2 em relação ao pó de madeira levou a uma diminuição do módulo de flexão, e uma adição na proporção 1:1 não causou alterações significativas em relação ao módulo de flexão do material sem adição de resíduo. Com relação à densidade, quanto maior a proporção de resíduo adicionada, maior foi o valor de densidade encontrado. Através do teste de chama realizado não se pode concluir a respeito das propriedades antichama do resíduo de minério usado, pois a inflamabilidade do compósito superou em muito o previsto pela norma.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPLAST. O Perfil da Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico, 2009.
- ABP. <http://www.abptrade.com.br/madeiras.htm>. (consultado em 20/04/2011)
- ASTM. "Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials: ASTM D 790." 1992
- ASTM. "Standard Test Method for Measuring the Comparative Extinguishing Characteristics of Solid Plastics in a Vertical Position ASTM D 3801." 1987
- Ben F., Muller C.J., Kliemann Neto F.J., Custos ambientais na indústria moveleira do estado do Rio Grande do Sul. Anais do XI Congresso Brasileiro de Custos, p.01-14, Porto Seguro, Brasil, 2004
- Carty P., White S. Price D., Lu L. Smoke suppression in plasticized chlorinated poly(vinyl) chloride (CPVC). Polymer Degradation Stability, p. 465-468, 1999
- Chaharmahali, M., Tajvidi, M. E Najafi, S.K., Mechanical properties of Wood plastic composite panels made from waste fiberboard and particleboard. Materials & Design, p.4062-4068, 2011
- Fox Reciclagem. http://www.foxreciclagem.com.br/reciclagem_isopor.php, consultado em (04/04/2011).
- Green, D. E, Perry, R.H. Perry's chemical engineer handbook. 8ª edição, The McGraw-Hill Companies, 2008.
- LAREX, <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/jtenorio/larex/trabalhos/Combustao%20de%20Plasticos.pdf>, consultado em (04/04/2011)
- Sant'Anna, J. P. [Retardantes à chama - Legislação omissa inibe a propagação desses aditivos](#). Revista Plástico Moderno, p. 1-4, 2004.
- Wilkie C.A. An introduction to the use of fillers and nanocomposites in fire retardancy. In.: Fire retardancy of polymers and applications of mineral fillers. Le Bras M., Wilkie C.A., Bourbigot S (editors), The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Cambridge, p.3-15, 2005.