

# ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO DE PLÁSTICO RECICLADO E RESÍDUO DE MDF

## STUDY AND CHARACTERIZATION OF THE COMPOSITE RECYCLED PLASTIC AND MDF WASTE

Patrícia Siqueira Alves<sup>I</sup> 

Danieli Becker<sup>II</sup> 

Anelise de Jesus<sup>III</sup> 

Flávio Kieckow<sup>IV</sup> 

<sup>I</sup> Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, URI, Santo Ângelo, RS, Brasil. Doutora em Ciência dos Materiais. Docente da URI. E-mail: patricias@san.uri.br

<sup>II</sup> Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, URI, Santo Ângelo, RS, Brasil. Acadêmica do Curso de Engenharia Química. E-mail: danieli.becker@hotmail.com

<sup>III</sup> Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, URI, Santo Ângelo, RS, Brasil. Graduada em Engenharia Mecânica. E-mail: anelisejesus@aluno.santoangelo.uri.br

<sup>IV</sup> Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, URI, Santo Ângelo, RS, Brasil. Doutor em Ciência dos Materiais. Docente do PPG em Ensino Científico e Tecnológico. E-mail: fkieckow@san.uri.br

**Resumo:** O uso da madeira maciça está cada vez mais restrito e oneroso. Novas tecnologias de produção de MDF pela indústria moveleira têm estimulado a fabricação e o consumo de móveis planejados. Conseqüentemente, a quantidade de resíduo desse material tem aumentado e é preocupante. Uma alternativa é o reaproveitamento do mesmo para desenvolver novos produtos de materiais compósitos de modo a agregar valor ao resíduo, proteger o ambiente e favorecer a economia circular na cadeia produtiva de móveis. Este trabalho tem como objetivo, produzir e caracterizar um material compósito a partir do resíduo de MDF e PE reciclado. O MDF foi caracterizado por análise granulométrica e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Também, foram estudadas as condições ideais de processamento do compósito. Os compósitos plástico-MDF foram confeccionados e caracterizados em composições de 25 a 60% MDF. Para o MDF observou-se que, a maioria das partículas apresentavam diâmetro de 363,5 e 256  $\mu\text{m}$ , bem como, a presença de umidade, de resina ureia formaldeído, de madeira macia e madeira dura. As melhores condições de processamento do compósito obtidas foram: temperatura de 190 °C, pressão de 9 t, tempo de 5 min e a massa de 10 g de material (por chapa confeccionada). Os melhores resultados dos ensaios de resistência mecânica e de absorção de água foram encontrados para a composição de 30% de pó de MDF. Os resultados dos ensaios indicaram que ocorreu uma boa aderência entre a matriz polimérica e o reforço (pó de MDF).

**Palavras-chave:** MDF. Plástico reciclado. Compósito.

DOI: <https://doi.org/10.31512/vivencias.v18i37.679>

Submissão: 20-10-2021

Aceite: 8-12-2021



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.

**Abstract:** The use of solid wood is increasingly restricted and costly. New MDF production technologies by the furniture industry have stimulated the manufacture and consumption of planned furniture. Consequently, the amount of waste from this material has increased and is worrying. An alternative is the reuse the same to develop new products of composite materials in order to add value to the waste, protect the environment and favor the circular economy in the furniture production chain. This work aims to produce and characterize a composite material from recycled MDF and PE waste. MDF was characterized by particle size analysis and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. Also, the ideal conditions for processing the composite were studied. Plastic-MDF composites were manufactured and characterized in compositions from 25 to 60% MDF. For MDF it was observed that most particles had a diameter of 363.5 and 256  $\mu\text{m}$ , as well as the presence of moisture, urea formaldehyde resin, soft wood and hard wood. The best composite processing conditions obtained were: temperature of 190  $^{\circ}\text{C}$ , pressure of 9 t, time of 5 min and mass of 10 g of material (per manufactured plate). The best results of the mechanical strength and water absorption tests were found for the 30% MDF powder composition. The test results indicated that there was a good adhesion between the polymer matrix and the reinforcement (MDF powder).

**Keywords:** MDF. Recycled plastic. Composite.

## Introdução

O desmatamento tem aumentado continuamente no Brasil e no mundo, contanto, a demanda por madeira também se eleva. Com isso, há uma redução das madeiras de alta qualidade e grande diâmetro. Tais fatores, combinados com as preocupações ambientais e as mudanças nas práticas de gestão florestal, tornam o custo da madeira maciça cada vez mais alto e seu uso mais restrito (FEARNSIDE, 2006; MAGNONI JÚNIOR, 2016).

Para solucionar tal problema, foram criados com auxílio da tecnologia, uma gama de novos produtos derivados da madeira, com diferentes formas e combinações de materiais, buscando o melhor desempenho, otimização do uso da matéria-prima e redução dos custos de processamento. Dentre os diversos materiais e aplicações da madeira, conta-se com madeira roliça, serrada, beneficiada, lâminas, painéis, compensados, MDF (*Medium Density Fiberboard* ou chapa de densidade média), MDP (*Medium Density Particleboard* ou chapa de partículas de média densidade) e OSB (*Oriented Strand Board* ou painéis de partículas orientadas) (MAGNONI JÚNIOR, 2016).

O MDF é uma chapa fabricada com fibras celulósicas misturadas com resinas sintéticas, e que prensadas a quente por um processo a seco, resultam em painéis com densidades de 500 a 800  $\text{kg m}^{-3}$ , amplamente utilizados na indústria de móveis. Esses painéis apresentam vantagens

como, a reciclagem e renovação da matéria-prima, imobilização do carbono em sua composição e menor demanda de energia para produção em relação a outros materiais, como o alumínio, plástico e o aço. Outras vantagens são a alta relação entre resistência mecânica e massa específica, boa trabalhabilidade, homogeneidade, ausência de defeitos (desvios de grã, nós, medula), agregação de valor a materiais provenientes de desbastes ou resíduos do processamento, chance de controle das propriedades pela manipulação da matéria-prima, do processo e do ambiente de uso (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008).

No Brasil, florestas plantadas de eucalipto e de pinus são a principal fonte de madeira para fabricação de painéis de MDF (ELEOTÉRIO; TOMAZELLO FILHO; BORTOLETTO JÚNIOR, 2000). Na fabricação e processamento do MDF são gerados resíduos como: retalhos e pó de MDF, que não devem seguir para aterros, pois são tóxicos, devido à tinta e a resina empregada na confecção das chapas (CASSILHA *et al.*, 2004; SCHLOTEFELDT, 2015). Outro material gerado como resíduo em indústrias de móveis é o plástico bolha. Este é empregado na embalagem das chapas de MDF e de outros materiais, para proteção durante a fase de transporte e também enquanto estas permanecem em estoque (SCHLOTEFELDT, 2015).

O plástico bolha, nada mais é que, um polímero, geralmente, o polietileno (PE). Este pode ser de baixa densidade, alta densidade e ultra-alto peso molecular. O polietileno de baixa densidade possui uma densidade de  $0,92 \text{ g cm}^{-3}$  e resistência a tração na ruptura de até 21 MPa sendo aplicado em filmes para embalagens, isolamento de fios, garrafas, tubos, objetos domésticos, como é o caso do plástico bolha. Possui uma faixa de fusão de 98 a 115 °C e de processamento de 149 a 232 °C (ASKELAND, 2015).

Atualmente, as empresas são obrigadas a seguir a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, que descreve os fundamentos do gerenciamento de resíduos sólidos por meio do Plano de Gerenciamento de Resíduos que dispõe as obrigações das empresas e do poder público, quanto ao destino apropriado para cada espécie de resíduo. Neste, estão especificadas as técnicas correlacionadas às fases do controle de resíduos e toda a definição da empresa em torno da formação e descarte dos subprodutos (BRASIL, 2017).

Em meio a isso, buscam-se alternativas para a destino correto dos resíduos, pensando na sustentabilidade e utilização de recursos, com foco em materiais que agreguem valor aos resíduos industriais. Uma solução pode ser a fabricação de materiais compósitos, que consistem na combinação de dois ou mais materiais distintos, que são unidos para resultar em uma combinação de propriedades. Tais materiais, podem ser selecionados para resultar em propriedades como, rigidez, resistência mecânica, densidade, desempenho em altas temperaturas, resistência a corrosão, dureza ou condutividade (ASKELAND, 2015).

Os compósitos já se encontram espalhados em diversos produtos da aeronáutica, de indústrias espaciais e defesa, nos transportes, em artigos desportivos, componentes elétricos e eletrônicos, e na construção civil (MOURA, 2011). Esses materiais são formados por uma fase descontínua e outra contínua. A fase descontínua comumente é o reforço, como por exemplo fibras de vidro, de aramida, de carbono, fibras naturais e resíduos, como o pó de MDF. A fase

contínua é denominada de matriz, na qual se enquadram os polímeros e as resinas (MARINUCCI, 2011).

Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo produzir um compósito utilizando o resíduo de MDF e plástico bolha (PE) da embalagem, para geração de filmes e placas que pudessem ser usados na própria indústria, como, por exemplo, no revestimento de móveis (lâminas para decoração).

## Metodologia

Os materiais utilizados para a desenvolvimento da pesquisa foram o resíduo de pó de MDF do processo de fabricação de móveis e o resíduo de plástico bolha, ambos advindos de uma empresa da região de Santo Ângelo/RS.

A metodologia está dividida em três etapas: (a) caracterização do pó de MDF, por meio de análise granulométrica e Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR); (b) definição das condições de processamento do PE e do compósito, com posterior formação de placas com diversas composições; e, (c) caracterização por meio de ensaio de tração, massa específica, absorção de água e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

### *Caracterização do MDF*

Para a realização da análise granulométrica, equipamento de marca Bertel, utilizou-se 54 g de resíduo de MDF, que foi previamente seco, em estufa, marca SP Labor, a 90 °C, durante 1 hora, para eliminação de umidade. Após, empregaram-se 13 peneiras (com malhas de 4 a 200 *mesh*), marca Bertel, e um agitador de peneiras para a realização da análise. O peneiramento foi realizado durante 10 minutos, em potência máxima.

Na análise de FTIR, foi empregado o equipamento de marca Shimadzu IRTracer-100, realizando a varredura entre as bandas de 4000 e 500  $\text{cm}^{-1}$ .

### *Condições de processamento e formação do compósito*

Foram estudadas as condições de processamento, temperatura e pressão, primeiramente do PE e na sequência do compósito plástico-MDF. As amostras foram processadas em uma prensa hidráulica com aquecimento de marca SP Labor.

Para o PE, inicialmente, cortaram-se cinco retângulos de 20 x 15 cm, que foram colocados na prensa e testados quanto a fusão em função da temperatura e pressão, sendo que o tempo para a fusão foi de 5 minutos, o mesmo usado por Ávila (2019). O teste foi iniciado com 125 °C, pois conforme Doak *et al.* (1986) o ponto de fusão do PE está em torno dos 130 °C. E o valor de pressão inicial foi colocado arbitrariamente.

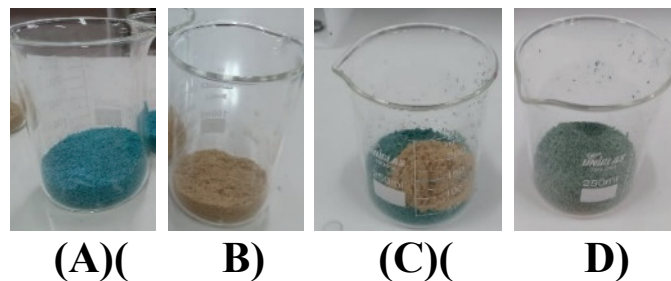
Antes dos testes para a definição das condições de processamento do compósito, foram desenvolvidas as preparações dos materiais usados na formação do material. O MDF foi peneirado, para retirada de partículas mais grosseiras, em peneira de 28 *mesh*, resultando no

material da Figura 1 (B). O PE foi triturado em moinho de facas, do tipo Willey, marca De Leo, com tamanho médio de 2 mm, que corresponde a tela de saída do equipamento, material que pode ser visualizado na Figura 1 (A).

As primeiras condições de processamento que foram utilizadas, tinha o PE como referência. Estabeleceu-se que a massa total das placas seria de 10 g. Para os testes iniciais empregou-se uma porção de 40% MDF, sendo esta uma composição intermediária quanto aos demais testes a serem realizados.

O preparo do compósito deu-se com a pesagem das respectivas massas de PE (Figura 1 (A)) e MDF (Figura 1 (B)), com a adição dos materiais em um mesmo béquer (Figura 1 (C)) seguido de mistura com auxílio de uma espátula (Figura 1 (D)).

Figura 1. Preparo da mistura para confecção da placa de compósito com resíduo de MDF e PE reciclado: (A) PE moído, (B) MDF, (C) PE + MDF e (D) a mistura de PE + MDF



A seguir, espalhou-se, uniformemente, a mistura sobre um filme de poliamida (lâmina de retroprojeter), e colocou-se a mesma folha na parte superior. Então, o material foi alocado na prensa previamente aquecida. A temperatura utilizada no primeiro teste foi de 170 °C, considerando um valor médio entre a temperatura de processamento encontrada para o PE (145 °C) e a temperatura de início da degradação do MDF, que, conforme Artiaga (2014) e Kreutz (2019), é de 200 °C. Também se realizou o teste com o material “branco” ou de referência, com a matriz, ou seja, o plástico bolha reciclado.

Com os testes iniciais do compósito, foi possível definir as condições de processamento. Sendo que a partir destes resultados, foi possível prosseguir a confecção dos compósitos, seguindo a metodologia já descrita nos testes iniciais, de acordo com as composições da Tabela 1.

Tabela 1. Composições a serem confeccionadas do compósito plástico-MDF

Amostra	MDF (%)	PE (%)
1	25	75
2	30	70
3	35	65
4	40	60
5	50	50
6	60	40
BRANCO	0	100

### Caracterização do compósito

Para a realização do ensaio de tração, utilizou-se como referência a norma ASTM D638 – tipo IV – método de teste padrão para propriedades de tração de plásticos reforçados ou não. Para tanto, cortaram-se as amostras dos compósitos, para atendimento a norma de forma adaptada. O ensaio de tração foi realizado em máquina universal de ensaios de marca Emic DL 30000 N, possuindo célula de carga 2 kN e velocidade de 5 mm/min.

A massa específica é determinada pela razão entre a massa do material e o volume ocupado por ele. Segundo Cremasco (2014), as definições distintas para a massa específica decorrem de como o volume da partícula é considerado: se o volume ocupado pelos espaços vazios (poros) for descontado, tem-se a massa específica real, caso não, é a massa específica aparente (*bulk*). No primeiro caso pode-se recorrer à técnica de picnometria, também denominada como método de Arquimedes, o qual consiste na imersão da amostra de partículas em um recipiente preenchido por um líquido (geralmente água); o volume de líquido deslocado corresponde ao volume ocupado pela amostra em tal recipiente.

Para a definição da massa específica dos compósitos formados e do PEBD puro, inicialmente, foi realizada a calibração do picnômetro. Os testes foram realizados em triplicata, primeiro aferiu-se a massa do picnômetro mais água, e após usando a massa específica da água a 26 °C, que conforme Perry (1997) é de 0,996783, definiu-se o volume médio do picnômetro. Para a definição da massa específica dos compósitos formados e do PE puro, utilizou-se um picnômetro, marca Diogolab, previamente calibrado. As Equações 1-4 apresentam as fórmulas que foram utilizadas para a determinação da massa específica dos materiais.

O Cálculo da massa de água deslocada, foi calculado pela Equação 1

$$m_{\text{água deslocada}} = m_T - m_{PA} \quad (1)$$

sendo:

$$m_{\text{água deslocada}} = \text{massa de água deslocada [kg];}$$

$$m_T = \text{massa total (picnômetro+ água + amostra) [kg]}$$

$$m_{PA} = \text{massa do picnômetro + amostra [kg]}$$

O volume de água deslocado é igual ao volume que a amostra ocupa, sendo calculado pela Equação 2. O volume da amostra foi calculado pela equação 3.

$$V_{\text{água deslocado}} = m_{\text{água deslocada}} / \rho_{\text{água}} \quad (2)$$

$$V_{\text{volume da amostra}} = V_p - V_{\text{água deslocado}} \quad (3)$$

Sendo:  $\rho_{\text{água}}$  = massa específica da água (dado tabelado de acordo com a temperatura);

$$V_p = \text{volume do picnômetro}$$

Após calculou-se a massa específica real através da Equação 3, considerando que o  $V_{amostra}$  é o volume excluindo o volume dos poros e vazios

$$\rho_{PR} = mp/\text{volume excluindo o volume dos poros e vazios} \quad (4)$$

Sendo:

$mp$  = massa da amostra [kg]

$\rho_{PR}$  = massa específica real [kg/m<sup>3</sup>]

Para o teste de absorção de água empregou-se como base a norma ASTM D570: método de teste padrão para absorção de água. Ensaios foram realizados em 24, 48 e 72 horas de imersão para observar se existe alguma influência nos resultados, do tempo de exposição na água.

Após a realização do ensaio de absorção de água com a imersão em temperatura ambiente, também, foi realizado o ensaio de tração para verificação da influência da água na resistência a tração do compósito plástico-MDF. Utilizou-se a mesma norma e equipamento do ensaio de tração.

Para análise da microestrutura (morfologia, fratura, poros), empregou-se um microscópio eletrônica de varredura (MEV), equipamento da marca JEOL, JSM-IT100, e recorreu-se a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), para a análise química das amostras.

## Resultados e discussões

### *Caracterização do MDF*

A análise granulométrica do resíduo de MDF apresentou os resultados que estão registrados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados obtidos na análise granulométrica do resíduo de MDF

Peneira (mesh)	$m_p^{\prime}$ (g)	$m_{p+am}^{\prime\prime}$ (g)	$m_{am}^{\prime\prime\prime}$ (g)	D(-) <sup>*</sup> (µm)	D(+) <sup>**</sup> (µm)	D <sub>p</sub> i <sup>***</sup> (µm)	AGD <sup>+</sup>	AGAR <sup>++</sup>	AGAP <sup>+++</sup>	
+4	405	405	0	-	4750	-	0	0	1	
-4	+6	371	371	0	4750	3350	4050	0	0	1
-6	+8	364	364	0	3350	2360	2855	0	0	1
-8	+10	375	375	0	2360	1700	2030	0	0	1
-10	+14	386	386	0	1700	1180	1440	0	0	1
-14	+20	413	415	2	1180	850	1015	0,0370	0,0370	0,963
-20	+28	360	364	4	850	600	725	0,0741	0,1111	0,889
-28	+35	356	361	5	600	425	512,5	0,0926	0,2037	0,796
-35	+48	379	389	10	425	300	362,5	0,1852	0,3889	0,611
-48	+65	348	362	14	300	212	256	0,2593	0,6481	0,352
-65	+100	345	351	6	212	150	181	0,1111	0,7593	0,241
-100	+150	342	349	7	150	106	128	0,1296	0,8889	0,111

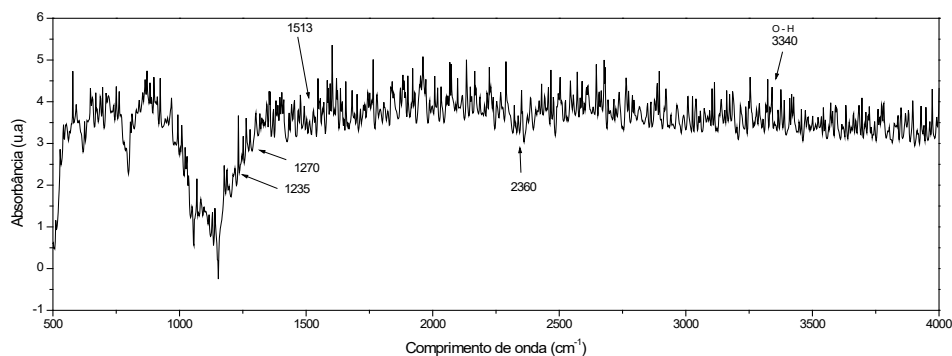
-150	+200	339	343	4	106	75	90,5	0,0741	0,9630	0,037
-200	Fundo	323	325	2	75	-	-	0,0370	1	0
Soma	-	-	-	54	-	-	-	1	-	-

‘Massa da peneira; “Massa da amostra mais a peneira; ”Massa da amostra; \*Abertura passante (o diâmetro que passou na peneira); \*\*Abertura retida (o diâmetro que ficou retido); \*\*\*Diâmetro médio de uma fração de partículas; †Quantidade de amostra em um determinado diâmetro Dpi; ††Quantidade de massa que ficou retida até um diâmetro Dpi; †††Quantidade de massa passante por um diâmetro Dpi.

As informações da Tabela 2, mostram que as partículas do resíduo de MDF não possuem diâmetros maiores que 1180  $\mu\text{m}$ . Além disso, verifica-se que as maiores retenções de partículas foram de 18,52% na peneira de 48 *mesh*, e 25,93% em 65 *mesh*, com diâmetros médios de partícula de 363,5 e 256  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Também, pode-se observar que 11,11% do material ficou retido em 20 *mesh*, 79,6% das partículas foram passantes a partir da peneira de 28 *mesh*, e, somente, 24,1% foi passante em 100 *mesh*. Dessa forma, pela peneira de 28 *mesh* ter como passante a maior parte do resíduo, esta vai ser usada na preparação do MDF, para a separação, apenas, de partículas mais grosseiras do material, sendo o material peneirado empregado na realização dos procedimentos experimentais de produção do compósito.

Para a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2. Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier do MDF



A partir do gráfico da Figura 2, pode-se observar que as bandas de absorvância obtidas são características ao resíduo de MDF. Conforme Artiaga (2014) e Kreutz (2019) os comprimentos de onda próximos de 3340  $\text{cm}^{-1}$  indicam a presença do estiramento O-H, o que demonstra a existência de umidade adsorvida na celulose, bem como da resina ureia formaldeído. Além disso, pode-se perceber, segundo Artiaga (2014), que o comprimento de onda de 1513  $\text{cm}^{-1}$  faz referência a uma amida secundária (-CO-NH-) que é causada da modificação da ureia pura (-CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>), que é um componente da resina ureia formaldeído.

De acordo com Artiaga (2014), é possível notar que a região de 2360  $\text{cm}^{-1}$  se atribui ao estiramento do grupo metil e metileno e a região de 1270  $\text{cm}^{-1}$  se refere ao estiramento C-O na lignina e C-O nos grupos metoxi do anel aromático de guaiacil. Vale ressaltar que, as ligninas da madeira macia são compostas principalmente guaiacil. Já as ligninas da madeira dura são constituídas de unidades de guaiacil e siringil, com comprimento de onda na região de 1235

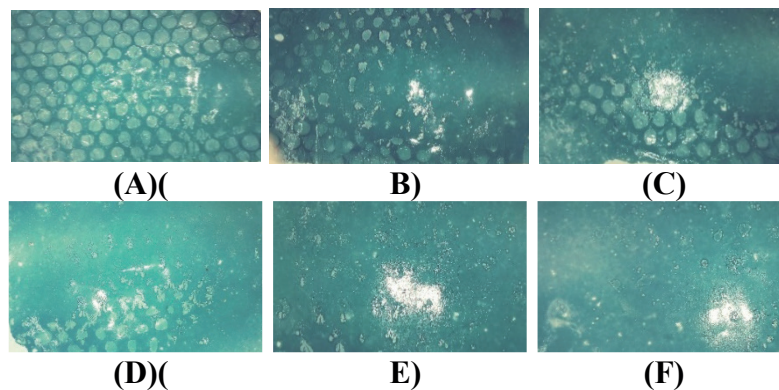


cm<sup>-1</sup>. Tal resultado, comprova a existência de madeira macia (pinus) no MDF investigado, bem como de madeira dura (eucalipto).

### *Condições de processamento e formação do compósito*

Quanto a avaliação das condições de processamento do PE, os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3. Resultados dos testes de condições de processamento do PE reciclado: (A) 125 °C e 3 t, (B) 130 °C e 6 t, (C) 130 °C e 9 t, (D) 135 °C e 9 t, (E) 140 °C e 9 t, e (F) 145 °C e 9 t

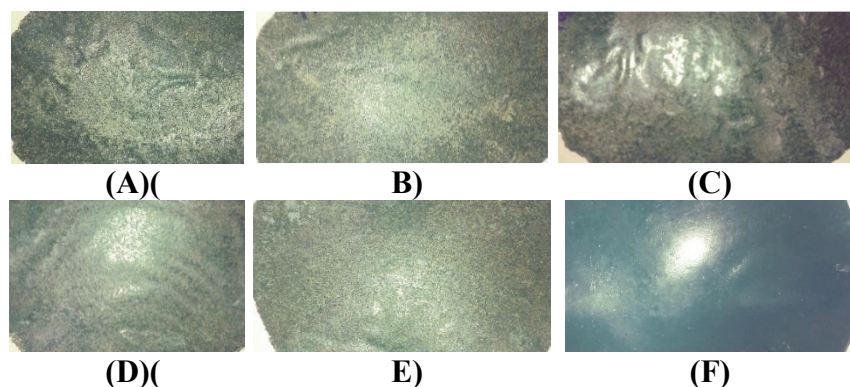


A partir da Figura 3 (A), pode-se observar que inicialmente realizou-se o teste com 125 °C e pressão de 3 t, sendo que nessas condições não se obteve a fusão total do plástico. Então, efetuou-se o teste da Figura 3 (B) com 130 °C e 6 t, resultando numa maior fusão, porém, ainda, parcial. O mesmo se verificou nos testes com 130 °C e 9 t (Figura 3 (C)), 135 °C e 9 t (Figura 3 (D)), 140 °C e 9 t (Figura 3 (E)). Contudo, foi com 145 °C e 9 t que se pode atingir a fusão completa do plástico bolha (Figura 3 (F)).

A diferença encontrada entre a fusão experimental de 145 °C e o teórico de 130 °C (BOAK *et al.*, 1986), se deve principalmente a realização do procedimento na prensa hidráulica com aplicação de pressão e aquecimento. Mas o valor encontrado de 145 °C está de acordo com a temperatura de processamento do PE, que conforme Askeland (2015) é de 149 a 232 °C.

As condições de processamento do compósito plástico-MDF obtidas estão apresentadas na Figura 4.

Figura 4. Resultados obtidos nos testes iniciais de processamento: (A) a 170 °C, (B) a 175 °C, (C) a 180 °C, (D) a 185 °C, (E) a 190 °C e (F) o branco a 190 °C



Pode-se perceber que com 170 °C o material apresentava muitas imperfeições, ou seja, não se demonstrava muito liso, pois tinha regiões com curvas em sua superfície (Figura 4 (A)). O mesmo foi constatado nas temperaturas de 175, 180 e 185 °C, das Figuras 4 (B), (C) e (D), respectivamente. Contudo, na Figura 4 (E), em que se empregou 190 °C, verifica-se uma menor quantidade de imperfeições, fazendo com que a placa seja mais uniforme (lisa) e por isso foi essa a temperatura definida como ótima na produção dos compósitos. Ainda, verificou-se na Figura 4 (F) que quando realizado o teste branco, na temperatura de 190 °C, houve uma completa fusão do material, sem sinais de degradação ou queima.

Com os testes iniciais do compósito, foi possível definir a temperatura de processamento de 190 °C, a pressão de 9 t, o tempo de processamento de 5 min. A partir destas condições, se prosseguiu a confecção dos compósitos, para posterior análise de propriedades dos mesmos.

### *Caracterização do compósito*

Após a confecção dos compósitos em composições que variaram de 25 a 60% de MDF, pode-se realizar a caracterização dos mesmos. Iniciou-se com o ensaio de tração, sendo que os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 3, na qual pode-se perceber que a amostra do compósito que apresentou a melhor resistência mecânica (Limite de resistência) foi o que continha 30% MDF e 70% PE, sendo o valor de tração média de 6,33 ± 0,58 MPa. Valor e composição que não coincidem com o encontrado por Àvila (2019), que realizou um estudo semelhante, entretanto empregando MDF peneirado na malha de 100 *mesh*, e que obteve como melhor resultado 40% de MDF com resistência a 2,94 MPa. Em comparação com Àvila (2019) verifica-se que com o aumento do tamanho das partículas empregadas, obteve-se uma diminuição da melhor concentração de MDF, mas também demonstra que o material fabricado neste trabalho possuiu maior resistência mecânica.

Tabela 3. Resultados obtidos no teste de tração dos compósitos produzidos

<b>MDF (%)</b>	<b>PE (%)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
<b>25</b>	75	6,09 ± 0,57
<b>30</b>	70	6,33 ± 0,58
<b>35</b>	65	6,08 ± 0,57
<b>40</b>	60	5,13 ± 0,39
<b>50</b>	50	5,06 ± 0,19
<b>60</b>	40	5,34 ± 0,32
<b>0</b>	100	9,60 ± 0,76

Além disso, pode-se perceber que quando a percentagem de MDF adicionado é maior que 30% ou inferior a este, o limite de resistência diminui. Mas também, pode-se constatar que a resistência do compósito (6,33 ± 0,58) é inferior ao do PE puro (9,60 ± 0,76), ou seja, a amostra branca. Resultado que coincide com Coutinho, Mello e Maria (2003), o qual afirma que o polietileno puro tem resistência a tração entre 6,9 e 16 MPa.

Após a realização de todos os ensaios de tração, e a definição do compósito com 30% de MDF como a melhor composição, devido a sua resistência mecânica ser maior, todos os demais testes realizados posteriormente (absorção de água e MEV), foram realizados somente para esta composição de MDF. Exceto o teste de massa específica, o qual foi realizado para todas as composições.

Os valores encontrados nos testes para determinação de massa específica dos compósitos e do PE puro, podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores encontrados para a massa específica dos compósitos e do PE.

MDF (%)	PEBD (%)	Massa Específica (g cm <sup>-3</sup> )
25	75	1,55 ± 1,45
30	70	1,12 ± 0,30
35	65	0,72 ± 0,07
40	60	0,97 ± 0,13
50	50	0,73 ± 0,13
60	40	0,89 ± 0,02
0	100	0,74 ± 0,13

A partir da Tabela 4, pode-se perceber que as massas específicas encontradas são semelhantes, com faixas muito próximas. Além disso, observa-se que o compósito formado possui massa específica próxima a matriz empregada (0,74 g cm<sup>-3</sup> segundo os experimentos e 0,92 g cm<sup>-3</sup> de acordo com Askeland (2015)) e ao reforço (0,5 a 0,8 g cm<sup>-3</sup> conforme MATTOS; GONÇALVES E CHAGAS, 2008).

Quanto ao teste de absorção de água, foram utilizados tempos de permanência na água de 24, 48 e 72 h. A Tabela 5 mostra os resultados encontrados experimentalmente.

Tabela 5. Resultados no teste de absorção de água dos biofilmes com 30% MDF

Tempo (h)	MDF (%)	PE (%)	Água Absorvida (%)
24	30	70	4,12 ± 0,72
	0	100	0,28 ± 0,39
48	30	70	5,15 ± 1,21
	0	100	0,11 ± 0,07
72	30	70	5,01 ± 0,84
	0	100	0,09 ± 0,06

Observa-se que conforme aumenta o tempo de exposição do compósito com a água, também se eleva a quantidade de água absorvida pelo material. **Ávila** (2019) em estudo semelhante, encontrou valores de 5% e 8% para amostras com 25 e 35% de MDF.

Ainda, verificou-se que embora tenha ocorrido um aumento na absorção de água com o tempo, esse aumento é mínimo e tende a se estabilizar a partir de 48h.

Também, pode-se perceber que o PE possui absorção de água bem próxima a zero, sendo que essa absorção diminui com o passar do tempo. Contudo, os valores encontrados são muito semelhantes ao se avaliar as faixas encontradas, no desvio padrão, e por isso visualiza-se que a influência do tempo na absorção de água é pequena. Além disso, os valores de absorção de água encontrados estão de acordo com Coutinho, Mello e Maria (2003) que afirma que o PE possui uma baixa capacidade de absorção de água devido sua característica hidrofóbica.

Ainda, analisou-se a influência da absorção de água na resistência mecânica do material. Para tanto, efetuou-se o ensaio de tração após o teste de absorção de água, sendo que os resultados obtidos estão relatados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados do ensaio de tração em amostras com 30% MDF, após absorção de água.

Tempo (h)	MDF (%)	PE (%)	Tensão (MPa)
24	30	70	6,39 ± 0,94
	0	100	11,52 ± 0,79
48	30	70	6,66 ± 0,36
	0	100	10,33 ± 0,93
72	30	70	6,80 ± 0,47
	0	100	10,43 ± 1,64

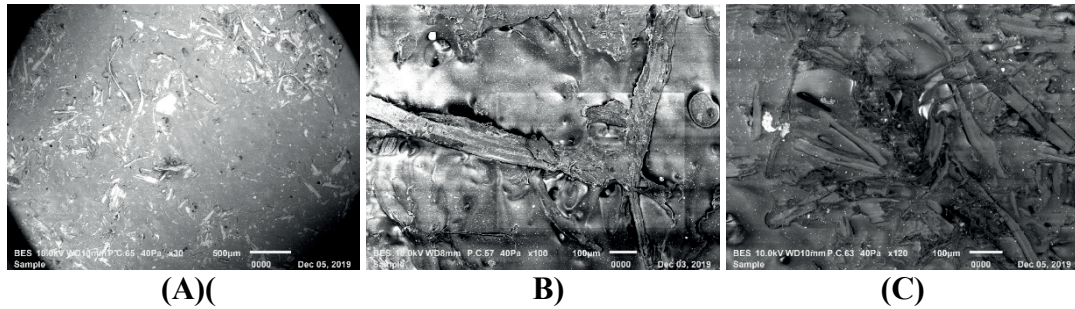
Os resultados da Tabela 6 mostram que o material composto tende a aumentar a resistência mecânica a tração com a absorção de água, enquanto que o PE tende a diminuir sua resistência a tração na medida em que absorve água, mesmo que em quantidades mínimas. As diferenças são pequenas porque ocorrem intersecções quando se analisa os desvios padrões. Àvila (2019) em estudo semelhante, com estudo de pó de MDF em uma peneira de Mesh 100 (abertura de 150 µm), escolhida neste processo por ser o menor tamanho de partícula passante, visualizou também uma queda na resistência a tração, contudo, a mesma não foi significativa.

Com isso, constata-se que os desvios e os resultados encontrados para cada amostra, podem ter sofrido alguma interferência da água e a não homogeneidade das placas confeccionadas, das quais foram retirados os corpos de prova, pode ter influenciado nos resultados. A falta de homogeneidade do compósito é causada pela mistura dos materiais no processo de prensagem, que é manual, e pelo espalhamento do material no filme de poliamida, que é manual e não fica uniforme na hora da prensagem.

Outro fato observado a partir da comparação entre a Tabela 3 e a Tabela 6, é que a tensão de tração do polietileno de baixa densidade puro após ensaio de absorção de água, em todos os tempos (24, 48 e 72 h), são maiores que a resistência a ruptura do material antes do ensaio (9,60 MPa ± 0,76). Entretanto, tais valores possuem faixas de desvio muito próximas, que evidenciam que a influência da água na resistência a tração do PE é mínima. Sendo o mesmo observado também para o compósito com 30% de MDF.

A análise da microestrutura pelo MEV possibilita mais informações que estão correlacionadas com os demais resultados das propriedades físicas e mecânicas até o momento. Os resultados são apresentados na Figura 5.

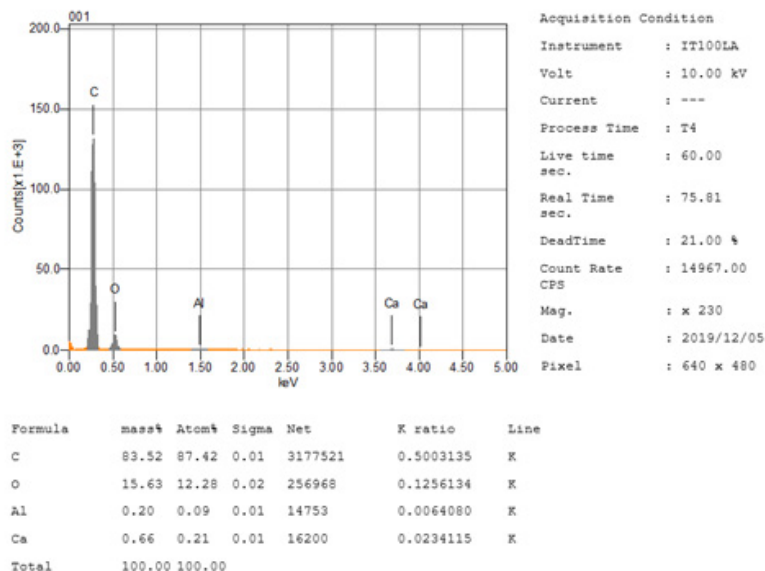
Figura 5. Microestrutura obtida no MEV para o compósito com 30% MDF: (A) aumento na imagem de 30 vezes; (B) 100 vezes e (C) 120 vezes



A partir da Figura 5 (A), pode-se observar que partículas de MDF menores aparecem bem dispersas na matriz, já as partículas maiores se apresentam aglomeradas em algumas regiões. Contudo estas estão bem aderidas ao PE (matriz) como pode ser visualizado na Figura 5 (B) e (C). Também, constata-se a presença de vazios na estrutura do compósito, o que se deve ao mesmo ter sido confeccionado por prensagem. As imagens confirmam a não homogeneidade da mistura e na distribuição das partículas. Contudo, as imagens mostram que existe uma boa aderência entre a matriz (PE) e o reforço (MDF), apesar do compósito não apresentar uma dispersão uniforme das partículas. Observa-se também, que nas imagens em maior ampliação as partículas de fibras estão unidas de forma a proporcionar uma boa resistência a tração do material, que é atribuído a presença de resinas no pó do MDF, sem compatibilizante.

Efetuiu-se a análise química por EDS nessas amostras em análise no MEV. Tal procedimento analisa qualitativa e semiquantitativamente, a composição química da amostra, seja está mineral ou orgânica (RODRIGUES *et al.*, 2017). Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6. Composição química fornecida por EDS do compósito com 30% MDF



Com os dados da Figura 6, pode-se verificar que o compósito plástico-MDF com 30% MDF apresentou em sua composição mássica: 83,52% de carbono (C), 15,63% de oxigênio (O), 0,2% de alumínio (Al) e 0,66% de cálcio (Ca). O carbono presente em grande quantidade, se deve ao PE, conforme Valim *et al.* (2015), e também ao MDF segundo já visto na análise se FTIR no item 2.1. O oxigênio é elemento constituinte da madeira e resinas, que formam o MDF (item 2.1). Quanto ao alumínio e cálcio, estes se encontram em baixa quantidade e muito provavelmente são constituintes de tintas e revestimentos de MDF, que fazem parte do resíduo do MDF.

## Conclusão

Com base nos testes realizados para caracterização do MDF, constatou-se na análise granulométrica que as partículas deste material não possuem diâmetros maiores que 1180  $\mu\text{m}$ . A maioria das partículas tem diâmetro de 363,5 e 256  $\mu\text{m}$ . Na análise de FTIR, percebeu-se a presença de umidade, da resina ureia formaldeído e ligninas da madeira macia e dura.

Para o PE, obteve-se as condições de formação de filme com 145 °C, 9 t e 5 min. Quanto ao compósito, definiram-se as condições de processamento em 190 °C, 9 t, 5 min e 10 g.

Após a formação dos compósitos, observou-se no ensaio de tração, que com quantidades maiores ou menores que 30% MDF, ocorre a diminuição da tensão suportada. Sendo o compósito com 30% de MDF, aquele que apresentou a maior resistência a tração.

Em relação a massa específica, constatou-se que em todas as composições os materiais formados possuem massa específica muito próxima entre si, e também próxima a massa específica da matriz e reforço empregados.

Na absorção de água, nota-se o aumento proporcional, mínimo, da absorção de água do compósito 30% de MDF com o tempo máximo de imersão de 72 h. Também, percebe-se que o PE possui absorção de água bem próxima a zero. E, que após imersão em água, a resistência mecânica teve um aumento, não significativo, tanto para o compósito, quanto para o PE.

No MEV, observou-se uma boa aderência entre a matriz e o reforço para partículas pequenas e aglomeração para partículas maiores, provavelmente pela utilização da prensa e não um equipamento de melhor dispersão das fibras. A não utilização de compatibilizante também pode ter interferido neste empacotamento de material celulósico. Na análise por EDS, observa-se que o compósito 30% MDF apresenta carbono (83,52%) e oxigênio (15,63%), como componentes principais.

Todos esses resultados das análises do compósito PE-MDF, obtido a partir do plástico bolha e do pó de MDF, indicaram favoravelmente para o aproveitamento desses dois resíduos da indústria moveleira para criar um novo produto, com a composição especificada nesta pesquisa – 70% (matriz), 30% (pó de MDF), respectivamente. A resistência mecânica das amostras apresentou resultados em torno de 65% do PE puro, sem acrescentar nenhum tipo de aditivo ao compósito; sendo possíveis melhorias necessárias ao processo, mostrando-se viável tecnicamente. Um produto desse material composto vem ao encontro da economia circular, fechando o ciclo

da cadeia produtiva da indústria moveleira, gerando valor aos resíduos e evitando um impacto ambiental negativo.

## Referências

- ARTIAGA, K. C. M. **Desenvolvimento e aplicação do compósito plástico-madeira (Poliuretano/resíduo de MDF) na indústria de base de calçados**. 2014. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2014.
- ASKELAND, D. R; WRIGHT, W. J.; BHATTACHARYA, D. K. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2015.
- ASTM: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics – ASTM D638, 2010.
- ASTM: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics – ASTM D570, 2010
- ÁVILA, G. D. **Avaliação da utilização de resíduos oriundos de indústria moveleira como matéria-prima para produção de compósito plástico-madeira**. 2019. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, 2019.
- BRASIL. **Lei nº 12.305** de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos. 3. ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2017.
- COUTINHO F.M.B; MELLO I.L; MARIA L.C.S. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v 13, n. 1, p. 1-13, 2003.
- CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2014.
- DOAK, K. W.; MARK, H. M.; BIKALES, N. M.; OVERBERG, C. G.; MENGES, G. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. New York. v. 6, 1986.
- CASSILHA, A. C. *et al.*. Indústria moveleira e resíduos sólidos: considerações para o equilíbrio ambiental. **Revista Educação & Tecnologia**, v. 8, p. 209-228, 2004.
- ELEOTÉRIO, J. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 2, p. 75-90, 2000.
- FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

KREUTZ, J. C. **Propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de poliestireno e MDF**. 2019. 46 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo – PR, 2019.

MAGNONI JÚNIOR, L. **Programa Educativo e Social JC na Escola: Ciência Alimentando o Brasil**. São Paulo: Centro Paulo Souza, 2016.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Artliber, 2011.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial: Produtos florestais**, n. 27, p. 121-156, 2008.

MOURA, M. F. S. F. de; MORAIS, A. B. de; MAGALHÃES, A. G. de. **Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico**. Porto: Publindústria, 2011.

PERRY, Robert H. **Perry's chemical engineers' handbook**. New York: McGraw-Hill Book Co, 1997.

RODRIGUES, A. da C.; FURTADO, A. C. S.; MAGALHAES, M. M.; SOUZA, F. I. B. de. Análise química por espectroscopia de raio-X por dispersão energia (EDS): adaptação aplicada à raízes de dendezeiro (*Eleais guineensis* Jacq.). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL, 21., 2017, Belém. **Anais...** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1076249/analise-quimica-por-espectroscopia-de-raio-x-por-dispersao-energia-eds-adaptacao-aplicada-a-raizes-de-dendezeiro-eleais-guineensis-jacq>. Acesso em: 12 jan. 2020.

SCHLOTEFELDT, J. de O. **Sistema de gestão ambiental em uma indústria de móveis de madeira**. 2015. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Contábeis) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2015.

VALIM, F. C. F. *et al.* Estudo das propriedades morfológicas, térmicas e mecânicas do compósito particulado de alumínio e polietileno de baixa densidade reciclados. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, p. 852-865, 2015.