

DIMENSIONAMENTO DAS TRANSFERÊNCIAS ENERGÉTICAS ENVOLVIDAS EM PROCESSO DE RECICLAGEM POR MICRO-ONDAS PARA COMPÓSITO DE RESINA DE POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

Felipe Haddad Arsenian ¹; Guilherme Wolf Lebrão ²

¹ Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo *O uso de compósitos foi difundido amplamente no cenário fabril contemporâneo dada sua elevada estabilidade e ampla gama de propriedades físico-químicas e aplicações. Neste contexto, compósitos de poliéster ortoftálico reforçados com fibra de vidro têm se destacado como opção viável no meio dos materiais de uso estrutural, por expressiva resistência e baixo custo de produção. Desta forma, encontrar métodos eficientes e sustentáveis para a reciclagem deste tipo de material torna-se necessário devido a grande quantidade de aplicações existentes. Para tal, desenvolveu-se um processo de pirólise da resina por intermédio do uso de micro-ondas, que resulta na degradação do poliéster ortoftálico, obtendo fibras de vidro livres de resina, além de subprodutos com aplicações diretas em demais ramos industriais, tais como estireno (C₈H₈) e benzeno (C₆H₆). Após a determinação da viabilidade do processo realizaram-se levantamentos acerca do consumo energético necessários à sua efetivação. Por meio experimental determinou-se a energia consumida no processo de degradação da estrutura do poliéster ortoftálico para o dimensionamento das transferências energéticas envolvidas na rota de reciclagem. O valor de 264 kJ/mol foi obtido após degradação praticamente completa da resina em 270 s de exposição com o uso de um magnetron de 2500 MHz e um suporte de carbetto de silício em equipamento montado no Laboratório de Micro-ondas do IMT.*

Introdução

Com os avanços tecnológicos e científicos contemporâneos, tem-se maior exigência de desempenho e a busca por materiais melhores e eficientes tem se tornado cada vez mais importante, sendo valorizados, no mercado, os materiais que não só apresentem um valor de aquisição economicamente favorável como possam ser aplicados em diversos setores com exigências especiais (KRAUKLIS *et al.*, 2021). Nesse cenário, os polímeros se destacam como algumas das principais matérias-primas empregadas no contexto industrial, dada sua elevada estabilidade e facilidade de obtenção. Segundo relatório da associação europeia de plásticos (*Plastic Europe*), a produção global de polímeros alcançou a marca de 322 milhões de toneladas em 2015 (*PLASTIC EUROPE*, 2016), comprovando a difusão dessa matéria-prima no cenário de manufaturas.

O emprego dos polímeros no meio industrial pode se dar na forma de materiais compósitos, grupo originário da mistura de dois ou mais materiais com propriedades físicas e/ou químicas consideravelmente diferentes, os quais, quando unidos, produzem um material com atributos únicos em relação aos compostos separados (KRAUKLIS *et al.*, 2021). Dentre os compósitos, as resinas de poliéster reforçadas com fibra de vidro têm se destacado no ramo dos materiais estruturais ao possuírem elevada resistência, baixo custo de produção e baixa massa

específica (SANTOS et al., 2011), principalmente quando comparadas com os demais materiais empregados neste meio.

Contudo, a crescente difusão dos materiais compósitos no contexto industrial tem afetado negativamente os ecossistemas. Segundo relatórios de 2016 da Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO), mais de 10% de materiais compósitos foram indevidamente descartados como compostagem. Ademais, perdas econômicas também são notáveis, na medida em que cerca de 10% do valor da produção de resinas de poliéster é perdidos ao longo do processo de fabricação, somando-se ainda gastos com o transporte desses restos industriais para sítios de descarte, os quais ainda não são a forma ideal de lidar com eles.

Desse modo, ressalta-se a importância da determinação de um método de reciclagem eficiente para os poliésteres ortoftálicos reforçados com fibra de vidro, objetivo que é dificultado pela presença de ligações cruzadas características de polímeros termo-fixos, as quais impedem sua remodelagem (PICKERING, 2005). Atualmente, as formas mais comuns de reciclagem de compósitos são a reciclagem mecânica, térmica e química (OLIVEUX *et al.*, 2015).

O método mais estudado para reciclagem térmica é a pirólise, seja na ausência ou presença de oxigênio (OLIVEUX; DANDY; LEEKE, 2015). OLIVEUX *et al* apontam que este método tem, como produtos da degradação da matriz polimérica, gases; produtos sólidos (fibras do compósito) e óleo aromático, cuja formação é explicada pelos mecanismos envolvidos na degradação do polímero ao longo do aquecimento contínuo (DAI *et al.*, 2022). Todavia, este procedimento de reciclagem apresenta pontos negativos que devem ser levados em consideração em sua aplicação. Primeiramente a técnica de pirólise é difícil de ser executada em matrizes plásticas, por conta de sua baixa condutividade térmica, superfície aderente e temperaturas de fusão (DAI *et al.*, 2022). Ademais, após o processo de pirólise em compósitos, as fibras retornadas perdem suas propriedades físico-químicas como consequência da própria reciclagem térmica, devendo ser submetidas a um pós-tratamento em fornos de até 450 °C almejando sua reutilização, etapa que prejudica a viabilidade energética do procedimento.

Tendo em consideração a pirólise como um processo viável de reciclagem, foi avaliada a possibilidade de uma rota alternativa desse procedimento para reutilização dos compósitos, sendo estudada a degradação térmica da resina por meio da incidência de micro-ondas em uma amostra do composto. Esse método promove a ruptura das ligações cruzadas estruturais do polímero, tendo como consequência sua degradação. Nesse cenário, tem-se como retorno uma fibra de vidro livre de resina, a qual pode ser reutilizada em processos industriais, além de originar, como resultado da degradação do poliéster, demais compostos valorizados industrialmente. Procedimentos equivalentes de reciclagem são encontrados na literatura (GE *et al.*, 2020), (AKESSON *et al.*, 2012); todavia, a falta de informações do seu balanço energético inviabilizam o emprego no âmbito industrial. Dessa forma, o presente projeto almeja promover um balanço do consumo energético do processo de reciclagem descrito, de modo verificar sua viabilidade em comparação com o método de reciclagem por pirólise térmica atualmente difundido.

Material e Métodos

No procedimento experimental, primeiramente, produziu-se um compósito de poliéster ortoftálico reforçado, com base na resina poliéster ortoftálica Arazyn 26108 T-10 em 100 ppp (Figura 1) ; para a fibra de vidro empregou-se a fibra Tipo E, Fibertex, 3K tecido, com tela 1 por 1 e 200 g/ m²; empregou-se ainda, como catalisador o composto Butanox a 2 % em massa.

A mistura entre a resina e o catalisador se deu em um béquer de vidro de alumínio boro silicato (massa de 9,10 g), a qual foi, posteriormente, aplicada na fibra de vidro com uma espátula de madeira, de modo a revestir a fibra. O conjunto foi deixado em repouso por 24 horas até cura total do polímero e estruturação completa do compósito. Foram empregados 25,15 g de fibra de vidro para 50,25 g de poliéster e 3,0 g de butanox, obtendo-se uma amostra final de 32,1 % de fibra de vidro, 64,1 % de resina e 3,8 % de catalisador (Figura 1). Ademais, produziu-se uma parte do polímero livre da fibra, a partir de 25,15 g da resina e 1,5 g do catalisador.

Figura 1 – Estrutura da resina do poliéster ortoftálico empregada.

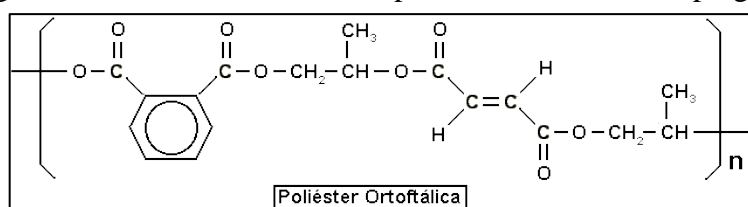


Figura 2 – Compósito do poliéster ortoftálico reforçado produzido para os fins experimentais.



Em seguida, foi testada a reciclagem do compósito em 5 frações da amostra produzida. As análises foram feitas em um reator de micro-ondas (Figura 3), com medições auxiliares realizadas com auxílio de termômetros eletrônicos, balanças analíticas e sensores de micro-ondas. Amostras de massas equivalentes foram submetidas às micro-ondas emitidas por um reator de 1000 W ao longo de diferentes períodos, visando determinar o intervalo de incidência ideal para a reciclagem. As amostras foram cortadas em parcelas próximas a 1 grama, empregando-se uma serra de corte e submetidas à exposição de micro-ondas por tempos fixados em 30, 60, 120 e 240 segundos, de acordo com as medidas realizadas por ABOELKHEIR *et al*

2021. Diante da permanência visível da fração do poliéster após 240 s de emissão, medidas adicionais foram feitas ao longo de 270 e 300 segundos. Durante todas as medições, o reator funcionou com 60% de sua potência, almejando absorção de cerca de 450 W por parte dos corpos de prova (ABOELKHEIR *et al.*, 2021). Sensores localizados na fonte de emissão e após as amostras permitiram determinar a quantidade de micro-ondas utilizadas na absorção das micro-ondas pelo compósito. Tendo em vista que polímeros, no geral, não são bons absorventes de micro-ondas, são agregados aos polímeros materiais absorventes para que o calor seja transferido às amostras por condução. (UNDRI *et al.*, 2014). Dessa forma, uma placa de carbeto de silício foi utilizada para concentrar as micro-ondas emitidas e transmitir a energia para as amostras analisadas, visando atingir a temperatura necessária a sua decomposição.

O reator utilizado consistiu em um sistema de micro-ondas de 2500 MHz (Figura 3). Considerando ROSSATO e IVO (2016), o equipamento foi composto por um gerador de micro-ondas alimentado por uma fonte de alta tensão. O gerador, ao ser conectado a um guia de ondas, focou a incidência das ondas nos corpos de prova, enquanto que um acoplador direcional foi empregado na determinação da potência irradiada; exibida no *power meter*. A fim de garantir a proteção do magnetron (dispositivo que produz a radiação eletromagnética) da potência refletida utilizou-se um circulador. Tal potência refletida foi mensurada por outro acoplador direcional e, posteriormente, absorvida pela água que circula na carga de dissipação. Para controlar a redução da potência efetiva enviada à cavidade cilíndrica foi empregado casador de impedância seguido por curto móvel.

Figura 3 – Reator de micro-ondas empregado nas análises experimentais



Determinado o tempo mínimo para reciclagem praticamente completa do polímero como 270 segundos, duas amostras adicionais foram expostas às micro-ondas neste tempo, para mensuração da energia mínima a ser absorvida pelo compósito estudado no procedimento de reciclagem. Nesta etapa, a chapa de carbeto foi pré-aquecida aproximadamente em 130 °C, favorecendo a obtenção de dados na análise, posto que as micro-ondas não seriam perdidas para o aquecimento da chapa e o carbeto teria uma taxa de absorção com menos variações ao longo da análise. Como resultados, a diferença de massa entre a amostra inicial do compósito e a fibra livre da resina foram consideradas, visando estimar a massa do poliéster degradado pela incidência das micro-ondas. Outra consideração importante foi o valor de potência efetivamente absorvida pela amostra, com base nos sensores previamente citados.

Como próxima etapa, foi feita uma análise espectroscópica do compósito a fim de por em melhor perspectiva a estrutura molecular diante da polimerização do poliéster ortoftálico. Para tal empregou-se uma espectrometria infravermelha com transformada de Fourier (FT-IR), baseando-se no experimento de MATTOS *et al.* (2004). Primeiramente, uma espectroscopia infravermelha foi feita com uma amostra de referência. O teste foi realizado com o espectrômetro Nicolet iS10 da marca *Charis Technologies*. A amostra padrão foi confeccionada com as mesmas especificações que o compósito empregado nas reciclagens de micro-ondas, produzida com a resina Arazyn 26108 T-10 em 100 ppp. Todavia, nesta amostra de teste, não foi utilizada a fibra, para determinar a faixa de absorção do infravermelho do poliéster. Em seguida, duas amostras do compósito parcialmente reciclado foram analisadas no espectrômetro, sendo os diagramas comparados com a amostra polimérica independente.

Para avaliar diferenças na estrutura do material após o procedimento de reciclagem, duas amostras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo uma das amostras a fibra recoberta de resina de poliéster e outra a fibra reciclada por pirólise assistida por micro-ondas. Para que as verificações fossem realizadas, as alíquotas foram previamente revestidas com ouro-paládio por meio do equipamento de CVD da Quorum-SC7620, fixadas em corrente de 12 mA, pressão na câmara de vácuo de 2 a 4 Pa e tempo de exposição por 135 s no modo *Sputter*. As análises no MEV foram feitas com ampliação de até 5000 vezes; velocidade de varredura de 7; energia de até 7000 eV e BC de 30 pA.

Resultados e Discussão

Para avaliação dos procedimentos práticos, foi traçada curva correlacionando a degradação do polímero presente na amostra com o tempo de incidência das micro-ondas (Figura 4). A partir da consideração desta, bem como das amostras recicladas, foi possível correlacionar o tempo de exposição ideal por grama da amostra estudada como 270 segundos; tendo-se uma taxa de absorção média de, aproximadamente, 450 W (Tabela 1). Ressalta-se que o tempo de 300 segundos não apresentou melhorias significativas em relação aos 270 segundos de exposição. Tendo em vista que o objetivo desta etapa do procedimento foi determinar o tempo ideal mínimo para a reciclagem, o período de 270 s foi considerado o mais eficiente energeticamente dentre os estudados.

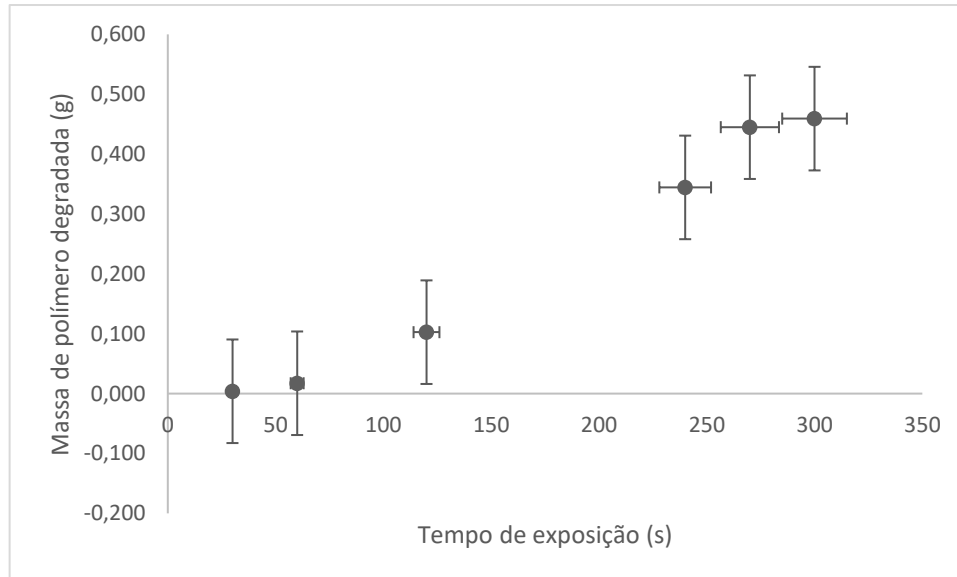
Tabela 1 – Dados obtidos diante da emissão de micro-ondas em amostras de massas equivalentes.

Amostra	mi (g)	mf (g)	Δm^1 (g)	t (s)
1	0,90	0,895	0,004	30
2	1,06	1,046	0,017	60

3	1,04	0,935	0,103	120
4	1,03	0,683	0,344	240
5	1,10	0,655	0,445	270
6	1,14	0,685	0,459	300

Nota 1: Δm equivale, no procedimento estudado, a massa de poliéster degradada.

Figura 4 – Eficiência do tempo de incidência de micro-ondas em relação a degradação do polímero



Em seguida, avaliaram-se os testes realizados com base no período de exposição ideal. Foi empregada a equação descrita por ABOELKHEIR M. G. *et al.* (2021) para calcular a energia específica empregada na reciclagem com o uso do reator (Figura 5), na qual E equivale à energia específica (kJ/g); ΔP a potência emitida, absorvida pela amostra (W), t como tempo de exposição para irradiação (s) e Δm como massa de poliéster da amostra (g). Com base nos dados obtidos (Tabela 2), foi calculada média de 264 kJ/g necessários à reciclagem do poliéster ortoftálico estudado. Esses resultados são 8,8 vezes maiores do que os de 30 kJ/g previstos em um contexto de pirólise térmica (ABDALLAH *et al.*, 2021). Todavia, deve-se levar em consideração a velocidade do processo: em uma pirólise inassistida são necessários cerca de 9000 s para que a reciclagem seja feita (GIORGINI *et al.*, 2016) tempo 33 vezes maior do que os 270 s empregados na reciclagem assistida por micro-ondas.

Figura 5 - Equação para cálculo da energia específica empregada na reciclagem com o uso do reator.

$$E_{prática} = \frac{\Delta P * t}{\Delta m}$$

Tabela 2 – Dados para amostras expostas as micro-ondas pelo período de maior rendimento energético.

Amostra	mi (g)	mf (g)	Δm (g)	t (s)	P _{emitida} (W)	P _{recebida} (W)	ΔP (W)
1	1,04	0,553	0,487	270	478	42,7	435,3
2	0,994	0,586	0,408	270	479	44,9	434,1

Figura 6 – Comparação entre estrutura do poliéster ortoftálico antes (esquerda) e após (direita) procedimento de reciclagem frente exposição à micro-ondas por 270 s, onde só restou a fibra.

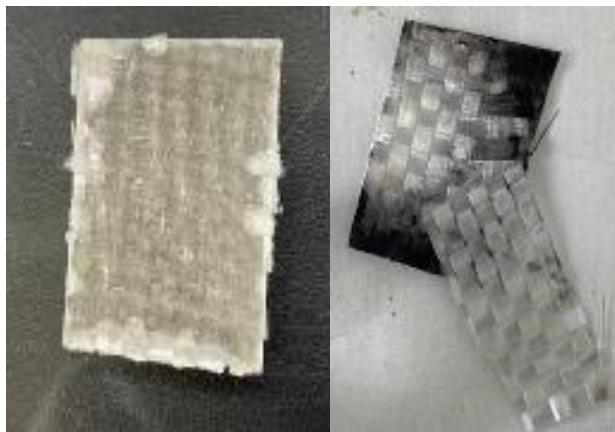
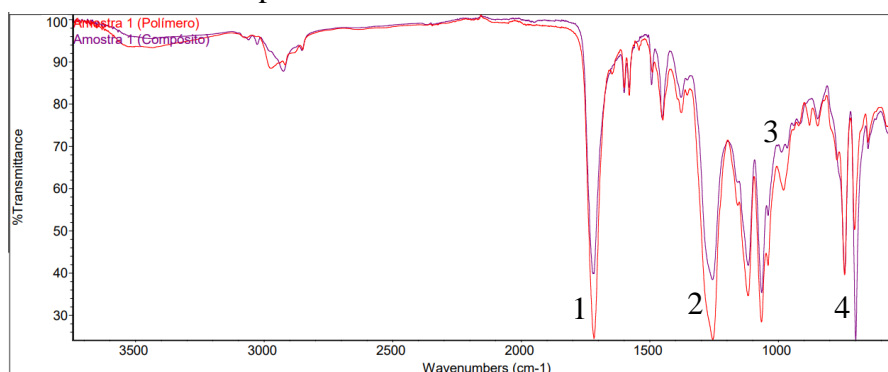


Tabela 3 – Dados da energia prática empregada no procedimento de reciclagem

Amostra	Δm (g)	t (s)	ΔP (W)	E _{prática} (kJ/g)
1	0,487	270	435	241
2	0,408	270	434	287

Para a análise da validade dos resultados obtidos deve-se discutir como ocorre a degradação do poliéster frente absorção das micro-ondas (Figura 5). Feita emissão das ondas na estrutura do compósito, ocorre a quebra das ligações cruzadas entre as diferentes moléculas polimerizadas, posteriormente tem-se o rompimento da ligação entre os dois carbonos (C=C) presentes na estrutura do poliéster ortoftálico e, após maior aquecimento, rompimento das ligações C-O (BAUTISTA *et al.*, 2017). Nesse cenário tem-se a degradação da matriz polimérica com emissão de estruturas moleculares mais simples em fase gasosa, tais como estireno (C₈H₈) e o benzeno (C₆H₆), as quais foram avaliadas com base em cromatografia e espectrometria de massa (VIEIRA *et al.*, 2018). Tendo-se como base o monômero do poliéster empregado (Figura 1) tais sub-produtos podem ser interpretados, possivelmente, como parcelas originárias da matriz polimérica estudada. Tal interpretação é ratificada por IKENAGA K. *et al.* (2016) ; o qual, em um procedimento similar para reciclagem de politeraftalato de etileno (PET) com o uso de incidência de ondas eletromagnéticas, foi obtido como produto das etapas de reciclagem ácido tereftálico (TPA) que pode ser empregado como base para produção de PET. Sendo assim, estuda-se a espectroscopia FT-IR para que se possa determinar, experimentalmente, quais foram as ligações rompidas pela degradação (Figura 7).

Figura 7 – Gráfico obtido por espectroscopia FT-IR de comparação da transmitância pelo comprimento de onda (cm^{-1}) entre o poliéster-ortoftálico virgem e o compósito parcialmente reciclado.



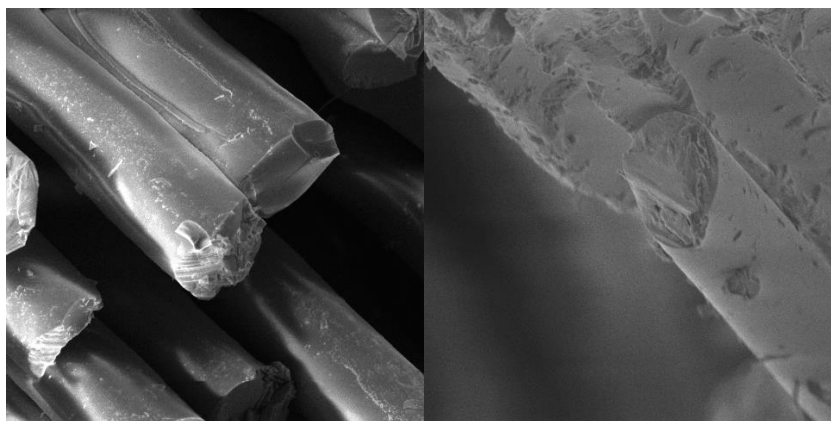
Nota: A linha vermelha se refere ao polímero e a roxa ao compósito

Tendo-se como referência as espectroscopias feitas interpretam-se os resultados obtidos (Figura 7). Em (1) tem-se a faixa de Grupos C=O do éster ($1735\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$), a qual, ao ter sofrido expressiva redução após a reciclagem, indicou rompimento das ligações C=O, desconsideradas nos estudos de BAUTISTA *et al* (2017), o que mensura o potencial de degradação pelas micro-ondas maior do que o previamente considerado. As regiões (2) e (3) representando as faixas de grupos C-O do éster ($1250\text{-}1310\text{ cm}^{-1}$) e grupos C=C em orientação *trans* ($980\text{-}960\text{ cm}^{-1}$) sofreram diminuição, dado seu previsto rompimento como consequência da pirólise. Em (4) obteve-se a faixa referente às ligações C-H ($730\text{-}770\text{ cm}^{-1}$) formadas após a degradação da amostra.

Levando em consideração a energia teórica necessária para degradação de 1 mol de mero do poliéster, foram consideradas as energias necessárias para rompimento das ligações estruturais C=C (614 kJ/mol), C-O (358 kJ/mol) e C=O (799 kJ/mol) comprovadas na espectroscopia. Sendo um mol do mero do polímero estudado de massa equivalente a 346,3 g/mol, pode-se inferir a necessidade de empregar, no mínimo, 15,14 kJ/g de mero presente na estrutura para degradação completa do material estudado.

Considerando as imagens obtidas pelo MEV (Figura 7) foi verificada a perda de recobrimento estrutural da fibra após a reciclagem, a qual pode acarretar em alterações nas propriedades físico-químicas do composto. A permanência de parte da resina, mesmo após a incidência de micro-ondas, a qual é evidenciada pelos pontos esbranquiçados, pode indicar tanto a necessidade de exposições maiores que 270 s ou uso de um material auxiliar para absorção das micro-ondas que permita condução da energia de forma mais efetiva e homogênea do que a chapa de carbetto de silício empregada. Nota-se ainda, no material não reciclado, uma estrutura porosa revestindo as fitas que compõe a fibra de vidro. Tal estrutura é atribuída a própria resina, fixada na superfície da fibra e que é degradada após o procedimento de reciclagem.

Figura 8 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica da fibra reciclada com 270 segundos de exposição às micro-ondas (à esquerda) e não reciclada (à direita).



Nota: Ampliação de 5000 vezes e velocidade de varredura de 7.

Conclusão

Portanto, pode-se concluir o sucesso do experimento, sendo possível verificar a pirólise assistida por micro-ondas como um procedimento viável e calcular a energia necessária para reciclagem de compósito de poliéster ortoftálico reforçado com fibra de vidro como sendo de 264 kJ/g de amostra.

O procedimento de reciclagem, mesmo que possuindo um maior consumo energético que a metodologia de pirólise comumente utilizada na indústria, acaba se mostrando com uma velocidade 33 vezes maior, evidenciando um benefício da assistência por micro-ondas.

Foi possível ainda estimar, com auxílio de espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier, a energia mínima necessária para degradação de 1 mol de mero do poliéster ortoftálico como sendo de 15,14 kJ/mol, a partir do rompimento de ligações C=C, C-O e C=O após aplicação das ondas eletromagnéticas.

Ademais, verificou-se a presença de parte da resina após o procedimento de reciclagem e perdas de revestimentos estruturais previamente presentes na superfície da fibra.

Sendo assim, futuros trabalhos são necessários visando otimização do método e maiores conhecimentos das modificações das propriedades físico-químicas dos compósitos após a reciclagem assistida por micro-ondas.

Referências Bibliográficas

- ABDALLAH, R et al. A Critical Review on Recycling Composite Waste Using Pyrolysis for Sustainable Development. **Energies**, [s. l.], ano 2021, p. 1-25, 13 set. 2021.
- ABOELKHEIR, Mostafa G. *et al.* Thermo-oxidative degradation of vulcanized SBR: A comparison between ultraviolet (UV) and microwave as recovery techniques. **The Polymer Society**, [s. l.], ano 2021, 23 mar. 2021.
- ABREU JUNIOR HMB, NUNES RCR, VISCONTE LLY (2010). Misturas NR/SBR: Influência da Composição e do Modo de Preparação Sobre Propriedades Mecânicas e Reométricas 20:1–5.
- AKESSON, D et al. Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [S. l.], ano 2012, v. 31, n. 17, p. 1136-1142, 21 ago. 2012.
- BAUTISTA, YOLANDA et al. Thermal Degradation Mechanism of a Thermostable Polyester Stabilized with an Open-Cage Oligomeric Silsesquioxane. **Materials**, [s. l.], ano 2018, v. 11, ed. 22, p. 1-13, 24 dez. 2017.
- CARRUTH, GORTON, EHRlich, EUGENE. "Bond Energies." Volume Library. Ed. Carruth, Gorton. Vol 1. Tennessee: Southwestern, 2002.
- DAI, LEILEI et al. Pyrolysis technology for plastic waste recycling: A state-of-the-art review. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S. l.], ano 2022, v. 93, p. 1-31, 5 ago. 2022.
- GE, SHENGBO et al. Vacuum pyrolysis incorporating microwave heating and base mixture modification: An integrated approach to transform biowaste into eco-friendly bioenergy products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], ano 2020, v. 127, p. 1-10, 20 abr. 2020.
- GIORGINI, LORIS et al. Pyrolysis of Fiberglass/Polyester Composites: Recovery and Characterization of Obtained Products. **FME Transactions**, [s. l.], p. 405-414, 4 out. 2016.
- IKENAGA, KAZUTOSHI; INOUE, TAKAHIRO; KUSAKABE, KATSUKI. Hydrolysis of PET by Combining Direct Microwave Heating with High Pressure. **Procedia Engineering**, [s. l.], ano 2016, v. 148, p. 314-318, 12 jul. 2016.
- KRAUKLIS, ANDREY E.; KARL, CHRISTIAN W.; GAGANI, ABEDIN I.; JØRGENSEN, JENS K. Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. **Journal of Composites Science**, Switzerland, ano 2021, v. 5, n. 1, p. 1-33, 15 jan. 2021.
- MATTOS, ELIZABETH C.; DUTRA, RITA C. L.; DINIZ, MILTON F; LHA, KOHUN. Avaliação do Uso de Técnicas FT-IR para Caracterização de Cobertura Polimérica de Material Energético. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Brasil, ano 2004, v. 14, n. 2, p. 63-68, 15 mar. 2004.
- OLIVEUX, G.; DANDY, L.O.; LEEKE, G.A. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Prog. Mater. Sci.* 2015, 72, 61–99.
- PICKERING, S.J. Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. *Composites: Part A*, [S. l.], n. 37, p. 1206-1215, 13 maio 2005.
- PLASTICSEUROPE, 2016. *Plastics - the Facts 2016*, an analysis of European plastics production, demand and waste data (retrieved on January 15th, 2017).
- ROSSATO, FERNANDA BORDINI; IVO, VITOR SOUZA. **Reciclagem química de polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV) por meio de pirólise assistida por micro-ondas**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo, 2016.
- SANTOS, GUILHERME MOREIRA et al. ANÁLISE DA PROPRIEDADE MECÂNICA DE TRAÇÃO EM PERFIS ESTRUTURAIS PULTRUDADOS EM FIBRA DE VIDRO E RESINA TERMOFIXA. **XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba**, [s. l.], 25 out. 2011.
- UNDRI, A. et al. **Microwave-assisted pyrolysis of corn-derived plastic bags**. Firenze, Maio 2014.
- VIEIRA, W. Z.; LEBRÃO, G. W. (2018). Caracterização Dos Subprodutos da Reciclagem de Resina Poliéster com Fibra de Vidro.