

*“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”*

## ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE HIDROXILAS E TEOR DE UMIDADE DE POLIÓIS HÍBRIDOS A BASE DE NANOFIBRILAS DE CELULOSE OXIPROPILADA OU TEREFTALATO DE BIS-HIDROXIETILA NA DENSIDADE E PROPRIEDADE MORFOLÓGICAS DE ESPUMAS DE POLIURETANO

Isabella Fabricio dos S.S Mascarini<sup>1</sup> (IC), Mercês Coelho da Silva (PQ)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** BHET. Glicólise. PET. Reciclagem química.

### Introdução

O poli (tereftalato de etileno) (PET) é um polímero de engenharia de uso geral que apresenta uma excelente combinação de rigidez e tenacidade, alta resistência ao calor, estabilidade química e dimensional, além de boa capacidade de isolamento térmico. (Wiebeck e Harada, 2005). Essas propriedades fazem com que seja amplamente utilizado em embalagens e em outros setores industriais. Entretanto, seu descarte inadequado gera sérios impactos ambientais, já que o material pode levar séculos para se decompor. Nesse contexto, a reciclagem surge como alternativa essencial para reduzir os resíduos e promover a economia circular.

Dentre as rotas existentes, a reciclagem química por despolimerização tem adquirido grande destaque, pois obtém a recuperação dos monômeros originais do PET. Contudo, a viabilidade desse processo enfrenta alguns desafios técnicos significativos. Isso se deve ao fato de que a despolimerização demanda um controle rigoroso das condições reacionais, envolvendo, em especial, a manutenção de altas temperaturas e pressões, bem como a seleção criteriosa de catalisadores que aumentem o rendimento sem acarretar custos excessivos ao processo. Dessa maneira, a complexidade de melhoria e otimização dessas etapas fazem com que haja ainda certas limitações para o desenvolvimento, o que se justifica pela contínua pesquisa na área.

Nesse estudo o PET foi reciclado por glicólise, um processo em que o polímero reage com etilenoglicol na presença de catalisador, resultando no bis(hidroxietyl) tereftalato (BHET) (Yang et al., 2024). Esse processo permite a utilização do BHET como polioliol alternativo na síntese de novo PET ou de outros polímeros como os poliuretanos.

O objetivo final desse projeto é a aplicação dos produtos de despolimerização do PET em conjunto com nanocelulose oxipropilada como um polioliol híbrido para a elaboração de espumas de poliuretano, mas nesse trabalho, serão apresentados apenas os resultados referentes às caracterizações dos produtos obtidos a partir da glicólise do PET, visto que, os resultados decorrentes do produto final serão apresentados em uma patente.

### Metodologia

O processo de obtenção do bis(hidroxietyl) tereftalato (BHET) foi realizado por meio da reação de glicólise do PET pós-consumo. O mecanismo da glicólise envolve a despolimerização do polímero pelo etilenoglicol (EG), em reação catalisada pelo óxido de zinco (ZnO), que atua facilitando a transesterificação e promovendo a quebra das ligações éster do PET, resultando na formação de monômeros e oligômeros de BHET. (Kawkumpa et al, 2019). A reação foi conduzida em um reator de alta pressão ilustrado na Figura 1, no qual foram adicionados 4,0 g de PET, 20,0 g de EG e 0,04 g (1% m/m) de nanopartículas de ZnO, mantendo a razão PET:EG em 1:5. O reator foi fechado, desaerado com argônio e pressurizado até 15 PSI. Em seguida, o sistema foi aquecido a 200 °C sob agitação constante de 115 rpm, utilizando diferentes tempos de reação (30, 45, 60, 75 e 150 minutos).

**Figura 1: Reator**



Fonte: o autor

Ao término da reação, o produto obtido foi filtrado em peneira adequada. O sólido retido foi lavado com água destilada e seco inicialmente à temperatura ambiente por 24 horas e, posteriormente, em estufa a vácuo a 65 °C como mostrado na Figura 2 o processo por etapas.

**Figura 2: Processo por etapa**



Fonte: elaborado pelo autor

A técnica de espectroscopia FTIR foi utilizada para acompanhar a evolução estrutural do PET durante a glicólise, confirmando a formação de compostos hidroxilados e a ocorrência da reação. Já a análise termogravimétrica (TGA) caracterizou o BHET obtido, permitindo avaliar sua estabilidade térmica, pureza e presença de impurezas, com base na comparação com dados da literatura, validando assim os procedimentos de síntese e purificação.

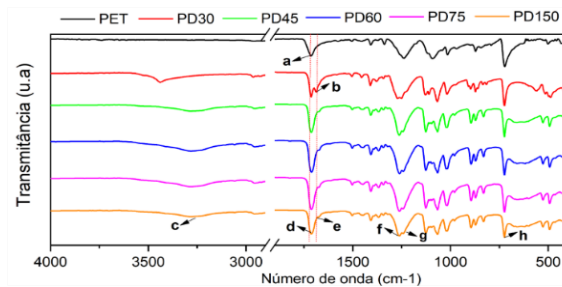
## Resultados e discussão

O processo de glicólise do PET foi acompanhado por diferentes técnicas de caracterização. A análise por FTIR confirmou a formação progressiva do monômero BHET, evidenciada pelo surgimento da banda larga em  $3440\text{ cm}^{-1}$ , correspondente ao grupo O–H, ausente no PET original. Também foram identificadas bandas em  $2960$  e  $2880\text{ cm}^{-1}$  (C–H), além de picos em  $1715\text{ cm}^{-1}$  (C=O) e  $725\text{ cm}^{-1}$  (anel aromático), confirmando a conversão do polímero. (Yang et al, 2024).

No espectro de FTIR, a banda **a** em torno de  $3100\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao estiramento C–H aromático, enquanto a banda **b**, próxima de  $1715\text{--}1720\text{ cm}^{-1}$ , corresponde ao estiramento da carbonila (C=O) característica do grupo éster presente no PET. A banda **c** ( $2960\text{--}2870\text{ cm}^{-1}$ ) está relacionada ao estiramento C–H alifático (–CH<sub>2</sub>–), e a banda **d** ( $1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ ) ao estiramento C=C do anel aromático. Já a banda **e**, em torno de  $1410\text{--}1380\text{ cm}^{-1}$ , refere-se à deformação angular de C–H (–CH<sub>2</sub>–), enquanto a banda **f** ( $1250\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ ) é associada ao estiramento C–O–C do grupo éster. A banda **g** ( $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ ) corresponde às vibrações de C–O e C–C do esqueleto polimérico, e por fim, a banda **h** ( $725\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ ) está relacionada à deformação fora do plano de C–H aromático.

As amostras analisadas foram identificadas pelos códigos PD30, PD45, PD60, PD75 E PD150 indicam o tempo de despolimerização do PET (em minutos), permitindo relacionar as alterações observadas no espectro com a evolução ao longo do tempo conforme ilustrado na Figura 3.

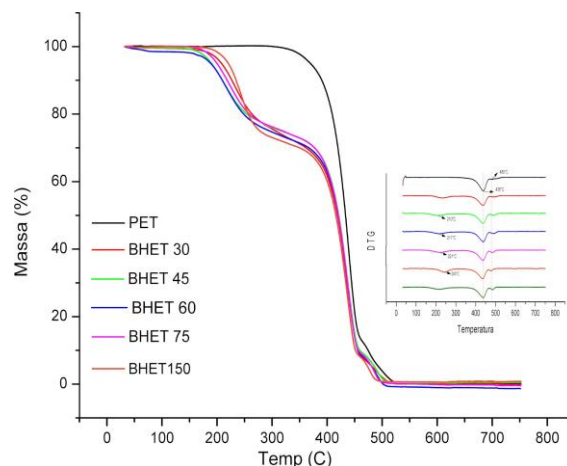
**Figura 3: FTIR**



Fonte: elaborado pelo autor

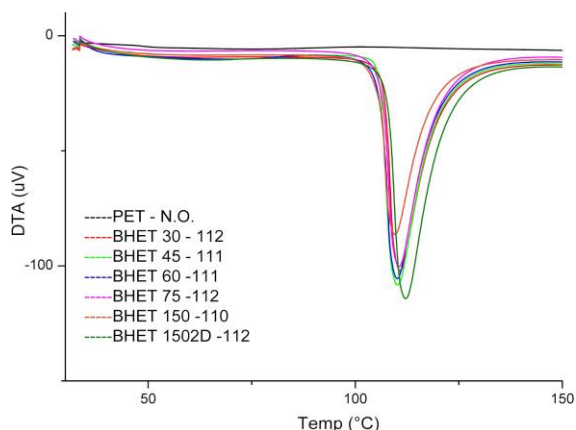
A análise termogravimétrica (TGA/DTG) mostrou na Figura 4 que o PET apresenta uma única etapa de degradação principal em torno de  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , enquanto os produtos da glicólise se decompõem entre  $300\text{--}330\text{ }^{\circ}\text{C}$ , indicando a quebra das cadeias poliméricas. (Mohammadi; Bouldo; Enayati, 2024). Algumas amostras apresentaram dois picos de degradação, sugerindo a presença de oligômeros. Esses resultados reforçam a eficácia da glicólise na obtenção de monômeros de menor massa molar e muito semelhantes aos encontrados por Yang et al., 2024.

**Figura 4: TGA/DTG**



Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados de DTA indicaram picos endotérmicos entre  $110\text{--}112\text{ }^{\circ}\text{C}$  para todas as amostras, compatíveis com a faixa de fusão do BHET. (Mohammadi; Bouldo; Enayati, 2024). As variações de intensidade e largura dos picos sugerem diferenças na pureza e cristalização conforme o tempo de reação. Amostras com menor tempo (30 min) apresentaram picos mais intensos e estreitos, indicando alta pureza, enquanto tempos mais longos (150 min) mostraram deslocamentos e menor intensidade, associados à presença de impurezas ou oligômeros, como evidenciado na Figura 5.

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”****Figura 5: DTA**

Fonte: elaborado pelo autor

A conversão do PET atingiu valores próximos de 100% já nos primeiros 60 minutos de reação, confirmando alta eficiência do processo. Os rendimentos de produção variaram ao longo do tempo, com 92,01% em 30 minutos, 87,40% em 45 minutos e estabilizando em 99,90% após 150 minutos. Observa-se que o aumento do teor de hidroxilas, associado à formação progressiva do monômero de BHET, teve influência direta no rendimento do processo, uma vez que possibilitou maior equilíbrio entre a conversão completa e estabilidade do produto final. Esses resultados reforçam os objetivos do estudo, evidenciando a correlação entre a disponibilidade de grupos -OH e eficiência da despolimerização.

### Conclusões

É notório que a glicólise, permite a reciclagem química do PET, transformando-os em monômeros ou oligômeros iniciais, e faz com que esse tipo de produto possa ser utilizado futuramente na produção de novos materiais plásticos. Além disso, a redução de resíduos é outro ponto importante, pois ela contribui para a diminuição de plásticos descartados, auxiliando assim no menor risco de impacto ambiental e promovendo uma melhoria na economia circular. Dessa forma, a glicólise é um método muito promissor para a sustentabilidade do PET, pois promove a sua reciclagem e minimiza danos e diminui os resíduos plásticos.

### Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo apoio institucional à realização desta pesquisa. À infraestrutura do LIMCOP, aos projetos APQ 00038-22 e APQ 02290-23 da FAPEMIG, ao projeto Relan PVDI452-2023 e 307169/2022-7 do CNPq.

Este trabalho também contou com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), ao qual manifesto meus agradecimentos pelo financiamento e incentivo à pesquisa científica.

### Referências

KAWKUMPA, Supaluck; SAISEMA, Thanakorn; SEOOB, Ornpavee; TRAKANKIT, Chuleekorn; ATORNGTIJAWAT, Pornpen; SAKULSAKNIMITR, Wissawat. **Synthesis of polyurethane from glycolysis product of PET using ZnO as catalyst**. RMUTSB Academic Journal, v. 7, n. 1, p. 29-39, 2019.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. **Plásticos de engenharia: tecnologia e aplicações**. São Paulo: Artliber, 2005. p. 349.

MOHAMMADI, Somayeh; BOULDO, Martin G.; ENAYATI, Mojtaba. FeCl<sub>3</sub>-Doped Cobalt Ferrite as an Efficient Magnetic Catalyst for PET Glycolysis Depolymerization. Journal of Polymers and the Environment, [s. l.], 01 jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-024-03341-2>. Acesso em: 21 ago. 2025.

YANG, Taishun et al. **Catalytic depolymerization of poly(ethylene terephthalate) plastic into value-added monomers using metal-modified mesoporous silica**. Fuel, v. 383, p. 133858, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133858>. Acesso em: 20 ago. 2025.