



AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECANICO DO PET RECICLADO NA FORMA DE FILAMENTO PARA IMPRESSÃO 3D

**Beatriz Mesquita¹, Bruno Gregio¹, Letícia Marinho¹, Amanda Duarte¹, Claudia Facca²,
Viviane Tavares de Moraes^{3*}, Susana M. G. Lebrão¹, Jorge L. Alves⁴ e Guilherme W.
Lebrão¹**

1 - Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP.

2 - Departamento de Design, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP

3- Departamento de Engenharia Mecânica, São Caetano do Sul, SP, Praça Mauá, 1, CEP 09580-900

*4-Departamentno de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,
Portugal*

autor_viviane.moraes@maua.br

RESUMO

O PET (polietileno tereftalato) é um polímero muito utilizado na forma de vasilhames de bebidas carbonatadas, sucos e água. Seu uso crescente o torna um vilão ambiental, uma vez que parte dos resíduos são destinados incorretamente. Encontrar formas de reciclagem dos polímeros é sempre um desafio em termos de garantia das propriedades mecânicas, além disso o PET é um polímero que cristaliza em aproximadamente 120°C, o que dificulta os processos de reciclagem convencionais que envolvem moagem e aquecimento. O PET necessita de etapa de cristalização em estufa previamente ao processo de extrusão, para permitir sua reciclagem secundária. A segregação de rótulos e tampas podem interferir na qualidade final do PET reciclado, resultando em diminuição do seu desempenho mecânico. Como o PET é um material de alta resistência mecânica e boa ductilidade sua aplicação na forma de filamento 3D atenderia uma demanda crescente da manufatura aditiva. Para tal aplicação este trabalho estudou o comportamento mecânico de filamentos de PET virgem e PET reciclado, através dos ensaios de tração, flexão e impacto. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram diminuição de 15% da tensão de ruptura, perda de 60% da absorção de energia no ensaio de impacto e manteve a resistência a flexão similar ao PET virgem. Mesmo com a redução no desempenho mecânico, o PET reciclado pode ser uma alternativa para impressão 3D de peças não estruturais, colaborando com a redução de resíduos e fornecendo matéria prima de baixo custo.

Palavras-chave: PET, reciclagem, filamento.

INTRODUÇÃO

Os polímeros foram desenvolvidos a partir do século XX, com crescentes demandas em aplicações de engenharia, têxtil, alimentícia e médica.

No setor alimentício destacam-se pelo seu uso em embalagens descartáveis, contudo por serem polímeros sintéticos não biodegradáveis possuem duração média no meio ambiente de aproximadamente 450 anos.

Apenas 25% das embalagens alimentícias são recicladas no mundo, o restante é descartado de forma inadequada ou em aterros sanitários.

O Brasil ocupa a 4ª posição em geração de resíduos plásticos, com cerca de 11,3 milhões de toneladas produzidas por ano, ficando atrás dos Estados Unidos, China e Índia.

Considerando as aplicações dos polímeros na indústria têxtil, automotiva e alimentícia o Brasil não chega a 50% da reciclagem desses materiais ⁽¹⁾, o que ocasiona um acúmulo de resíduos poliméricos.

O PET (polietileno tereftalato), que é o polímero mais utilizado em embalagens para bebidas, produtos de limpeza e embalagens farmacêuticas, ultrapassa 340 mil toneladas de produção por ano e não chega a 25 % de reciclagem ⁽²⁾.

Como a permanência desses resíduos no meio ambiente pode ultrapassar 450 anos e a sua produção é crescente devido a demanda de mercado, o seu acúmulo é inevitável. Assim alternativas tecnológicas que permitam a reciclagem são alternativas para minimizar o descarte prematuro de polímeros ⁽³⁾.

A grande oportunidade do tema em questão é como encontrar recursos para o uso adequado desse material na tentativa de buscar novas tendências e tecnologias ⁽⁴⁾.

Uma alternativa tecnológica é a manufatura aditiva, conhecida também como impressão 3D, que também faz uso de polímeros, contudo os mais comuns são PLA (poli ácido láctico) e ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno) ⁽⁵⁾.

O PLA é um biopolímero cristalino em ascensão na manufatura aditiva. Esta técnica tem destaque nas áreas aeroespacial, química, biotecnologia, civil, energia, saúde e mineração. A impressão 3D é bem promissora pela sua redução de custos, principalmente na fabricação de produtos, protótipos e peças em geral, para evitar estoques e produzir apenas o necessário; versatilidade, por exigir poucos ajustes e não exigir um alto nível de conhecimento do operador; possibilidade de produção de peças grandes e personalizadas, como moldes de baixo custo; níveis de perdas altamente reduzidos, uma vez que toda a matéria-prima é utilizada no processo; e ganhos de tempo, pois não é necessário ter uma pessoa para trabalhar durante todo o período de impressão ^(5,6).

O PLA apresenta maior cristalinidade que o PET, visto que o PET apresenta uma cadeia principal mais volumosa, o que atrapalha a ordem do arranjo. Polímeros mais cristalinos geralmente têm melhores propriedades mecânicas, são mais resistentes à dissolução por solvente e ao amolecimento pelo calor ^(7,8).

O PET apresenta dois grupos funcionais éster em sua unidade repetida e um anel benzênico, compondo uma cadeia linear relativamente volumosa. Por sua vez, o PLA apresenta um grupo funcional éster na unidade repetida de sua cadeia linear; no entanto, este biopolímero apresenta estereoisomerismo de cadeia ⁽⁸⁾.

Análises térmicas como DSC e TGA, químicas como FTIR e ensaios mecânicos de tração, impacto e flexão, podem ser utilizados para a caracterização dos polímeros virgens e reciclados a fim avaliar a seu desempenho em produtos reciclados ⁽⁹⁾.

A motivação para o presente trabalho consiste em buscar uma finalidade diversificada e acessível para coibir o descarte excessivo de materiais plásticos feitos de PET seguindo as principais tecnologias e tendências do mercado nacional e internacional de forma a mitigar potenciais impactos ambientais e atender as necessidades atuais. Para isso, realizou-se estudo das propriedades do filamento de impressão 3D feito de PET reciclado através da realização de testes térmicos e mecânicos, comparando as propriedades e desempenho do PET reciclado com o PET virgem e com o filamento de PLA, visando analisar a degradação do material causada

pela reciclagem e como consequência a perda das propriedades mecânicas, para viabilizar a substituição do PLA no mercado de impressão 3D.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção de filamentos de PET reciclado, foram realizadas quatro etapas: reciclagem de PET pós consumo, fabricação do filamento, impressão 3D e caracterização dos materiais.

Reciclagem de PET pós-consumo

Foi coletado garrafas PET pós consumo vazias, que foram higienizadas e segregadas de rótulos e tampas.

As garrafas foram trituradas em moinho de facas utilizando peneira de 9 mm.

Os flakes cominuídos foram mantidos em estufa a 170°C por 4h a fim de cristalizar o PET e permitir a extrusão no novo filamento em extrusora dupla rosca.

Fabricação do filamento

O PET já cristalizado foi colocado na extrusora dupla rosca com espessura de filamento de 3mm e 1,75mm, onde foram obtidos os pellets de PET reciclado.

Na sequência os pellets foram adicionados na extrusora mono rosca, onde foi obtido um filamento de espessura de 1,75 mm, adequado para impressão 3D.

Caracterização dos materiais

Foi realizada caracterização térmica através de análises de DSC e TGA; caracterização mecânica através de ensaios de impacto, flexão e tração.

Impressão 3D

Foi utilizado o filamento com espessura de 1,75 mm produzido com PET reciclado, com temperatura de mesa 75 °C e temperatura de extrusão 235 °C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a preparação do PET reciclado na forma de filamento foi realizado os ensaios térmicos de DSC e TGA para garantir o ajuste da temperatura para impressão 3D dos corpos de prova para ensaios mecânicos. Os resultados de DSC e TGA foram apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios térmicos de DSC e TGA do PET virgem e do PET reciclado na forma de filamento para impressão 3D.

Amostra	Temperatura de cristalização (°C)	Temperatura de fusão (°C)	Temperatura de degradação (°C)
PET reciclado	160,04 +/-2,7	243,06 +/-1,3	280 +/-1,2
PET virgem	181,66 +/-1,8	247,49 +/-1,5	280 +/-1,1

Observa-se discreta diminuição da temperatura de fusão do PET reciclado em relação ao PET virgem. A diminuição da cristalinidade do PET reciclado pode ocorrer devido a diminuição das ligações intermoleculares durante os ciclos de reciclagem e, portanto, ocorre uma diminuição de temperatura de cristalização para o PET reciclado quando comparado ao PET virgem.

Os resultados dos ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto tanto do PET virgem, quanto do PET reciclado foram apresentados na Tabela 2 e Figura 1.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto para PET virgem e reciclado

Material	Tensão de flexão (MPa)	Resistência a tração (kgf/mm ²)	Deformação (%)	Resistência ao impacto (kJ/m ²)
PET virgem	67,7 +/- 4,3	45,9 +/-3,7	2,6 +/-2,4	3,5 +/-0,1
PET reciclado	66,3 +/- 2,5	38,6 +/-1,0	2,9 +/-0,4	1,4 +/-0,1

No ensaio de flexão tanto o PET reciclado quanto o PET virgem apresentaram resistência similares; já no ensaio de tração observa-se discreta diminuição da resistência mecânica e aumento da deformação plástica, possivelmente ocasionado pela diminuição da cristalinidade do PET durante os ciclos de reciclagem. Já no ensaio de impacto observa diminuição da absorção de energia e, portanto, diminuição da tenacidade do PET reciclado, possivelmente pela diminuição das ligações intermoleculares durante os ciclos de reciclagem.

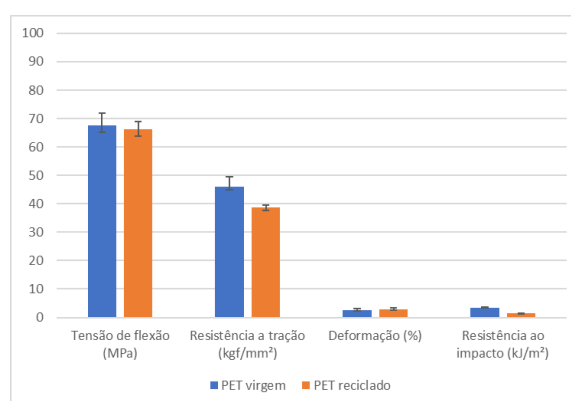


Figura 1 – Resultado gráfico dos ensaios mecânicos

Observa-se que nos ensaios de tração e flexão o PET reciclado apresenta diminuição no desempenho mecânico em aproximadamente 10%, já no ensaio de impacto observa-se diminuição de aproximadamente 58 % da tenacidade do PET reciclado em relação ao PET virgem.

O filamento de PET reciclado apresenta um comportamento muito semelhante ao do PET virgem quando submetido a tração e flexão. Isso permite substituir peças que sofrem ações de forças dessa natureza, como válvulas industriais e móveis (cadeiras, por exemplo), impressas em PET virgem, por PET reciclado. O uso do material reciclado também se mostra uma alternativa para a construção de itens que exigem força humana para o funcionamento, como lacres, para os quais é necessário exercer força para quebrar. Neste último caso, a utilização de matéria-prima reciclada na impressão 3D passa a ser não apenas uma alternativa, mas apresenta uma melhor correlação desempenho-aplicação em relação a outros produtos do mercado (PLA e PET), uma consideração também aplicada a produtos expostos a altas temperaturas, pois o ponto de fusão é consideravelmente superior ao do PLA e muito próximo ao do PET virgem, ressaltando, porém, que é uma matéria-prima reciclada mais barata e com maior apelo ambiental. Ainda, no que diz respeito às peças de proteção, como pára-choques ou embalagens, o PET reciclado não é uma alternativa na maioria dos casos considerando seu desempenho no teste de impacto.

Considerando a origem do material utilizado para a sua produção e o desempenho das peças impressas com o mesmo, é uma alternativa à impressão 3D que deve ser considerada para substituir os filamentos já disponíveis atualmente. Em termos de sustentabilidade, o processo de produção do filamento de PET reciclado mostra-se mais simples em relação aos ganhos

ambientais gerados. Além de utilizar garrafas que seriam descartadas e levariam anos para se decompor como resíduo, o filamento necessita de temperatura de impressão menor que o PET virgem, representando menor gasto energético para produção de peças com comportamentos semelhantes.

CONCLUSÕES

O PET reciclado apresenta desempenho similar ao PET virgem quando submetido a ensaios de tração e flexão.

Já no ensaio de impacto o PET reciclado teve menor tenacidade que o PET virgem.

Como alternativa ambiental a reciclagem de PET para a fabricação de filamento para impressão 3D permite o ganho energético através da diminuição da temperatura de fusão do PET reciclado e o aproveitamento de resíduo pós consumo de garrafas.

AGRADECIMENTOS

Karina Indústria e Comércio de Plásticos
Boomera Ambipar
Trem Dimensional 4D

REFERÊNCIAS

- 1- WWF. Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico. 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 25 jun. 2022.
- 2- PACHECO, E. B.; HEMAIS, C.A. Mercado para produtos reciclados à base de PET/HDPE/ionômero. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, p. 59-64, 1999.
- 3- SANTOS, C. M.A.; GONSALVES, A.C.R.; CINTRA, A.C.; SILVA, L.A.; ROSSI, A.; OLIVERIA, H. P.; ALVES, V.A. Processo de reciclagem química de PET em meio alcalino: efeito da concentração do íon hidróxido, da cor do PET e do tempo de reação. *Matéria*. V..23, pp. 2018.
- 4- ASHBY, M. F. *Materials selection in mechanical design*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.
- 5- BANNACH, G.; PERPÉTUO, G. L.; CAVALHEIRO, E.T.G.; CAVALHEIRO, C. C. S.; ROCHA, R.R. Efeitos da História Térmica nas Propriedades do Polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica. *Química Nova*. v. 34, p.1825-1829, 2011.
- 6- MANO, E. B. *Polímeros como materiais de Engenharia*. São Paulo: Editora Blücher, 1991.
- 7- CANEVAROLO, J. *Técnicas de Caracterização de Polímeros – Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros*. Ed. Artliber, 1ª Ed. São Paulo, 2002.
- 8- SKIBICKI, S.; PUŁTORAK, M.; KASZYŃSKA, M.; HOFFMANN, M.; EKIERT, E.; SIBERA, D.. The effect of using recycled PET aggregates on mechanical and durability properties of 3D printed mortar. *Construction And Building Materials*. v. 335, p. 1-16, 2022.
- 9- WENDLANDT, W. *Thermal methods of analysis*. New York: John Wiley, 1974.

EVALUATION OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF PET RECYCLED IN THE FORM OF FILAMENT FOR 3D PRINTING

ABSTRACT

PET (polyethylene terephthalate) is a polymer widely used in the form of containers for carbonated beverages, juices and water. Its growing use makes it an environmental villain, since part of the waste is disposed of incorrectly. Finding ways to recycle polymers is always a challenge in terms of guaranteeing mechanical properties, in addition, PET is a polymer that crystallizes at approximately 120°C, which makes conventional recycling processes that involve grinding and heating difficult. PET needs a crystallization step in an oven prior to the extrusion process, to allow its secondary recycling. The segregation of labels and caps can interfere with the final quality of recycled PET, resulting in a decrease in its mechanical performance. As PET is a material with high mechanical strength and good ductility, its application in the form of 3D filament would meet a growing demand for additive manufacturing. For such application, this work studied the mechanical behavior of virgin PET and recycled PET filaments, through tensile, bending and impact tests. The results of the mechanical tests showed a 15% decrease in rupture stress, a 60% loss of energy absorption in the impact test and a flexural strength similar to virgin PET was maintained. Even with the reduction in mechanical performance, recycled PET can be an alternative for 3D printing of non-structural parts, helping to reduce waste and providing low-cost raw material..

Keywords: PET, recycling, filament