

# IMPRESSÃO 3D - RECICLAGEM DE PET COM O USO DE REFORÇOS NA PREPARAÇÃO DE COMPÓSITOS NA MANUFATURA ADITIVA

Gabriel Felipe de Faria <sup>1</sup>; Guilherme Wolf Lebrão <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *A crescente utilização de polímeros por anos vem revolucionando muitos setores da indústria, ao mesmo passo que evidencia a necessidade de métodos eficazes de reciclagem e reinserção desses materiais no mercado. Dessa forma, este trabalho tem por objetivo viabilizar uma metodologia eficiente para produção de um filamento compósito de PET reciclado e PEAD para aplicação em impressoras 3D. Inicialmente foram analisados os procedimentos para recuperação do PET, testando metodologias já empregadas na indústria. Em seguida foram conduzidos ensaios térmicos com o intuito de caracterizar os polímeros utilizados, bem como as blendas extrudadas, avaliando a influência de parâmetros de produção do filamento nas características finais do filamento. Desta forma, foi possível produzir um filamento com qualidade próxima a desejada além de avaliar possíveis alterações para corrigir os defeitos encontrados.*

## Introdução

É difícil imaginar nossa sociedade atual sem os plásticos presentes no cotidiano das pessoas, bem como em diversos setores da indústria, trazendo consigo diversas qualidades e vantagens responsáveis por revolucionar estes setores. Porém, é notório também, um aumento nas preocupações relacionadas principalmente às questões ambientais, devido tanto a origem desses plásticos, proveniente de fontes não renováveis, quanto a falta de gerenciamento do pós-uso desses materiais (Gileno, L.A.; Turci, L.F.R., 2021).

Estima-se que, apenas em 2015, foram gerados cerca de 8300 milhões de toneladas de resíduos plásticos, tendo sido reciclado apenas 9% desse total (Geyer, R.; Jambeck, J. R.; *et al.*, 2017), demonstrando uma grande ineficiência do atual modelo de gerenciamento desses resíduos, e acarretando no aumento da pressão para a implementação de um novo modelo global mais eficiente, baseado no modelo de economia circular, Circular Economy Model (CEM) (Ghosh; Kumar, S., 2020) (PlasticsEurope, 2019) (Shamsuyeva, M.; Endres, H.J., 2021).

A reciclagem e reinserção da matéria prima na cadeia produtiva de forma eficiente é a chave para o sucesso deste modelo, impulsionando o desenvolvimento de diversos métodos de reciclagem desses resíduos plásticos. Atualmente, os processos de reciclagem de materiais plásticos são divididos em duas metodologias: *open-loop recycling* (reciclagem de ciclo-aberto) e *closed-loop recycling* (reciclagem de ciclo fechado), onde no primeiro caso, a matéria prima reciclada retorna para linha produtiva na mesma aplicação do produto de origem, substituindo a matéria prima virgem, já no segundo, a matéria prima reciclada é utilizada em aplicações diversas (Shamsuyeva, M.; Endres, H.J., 2021).

Dentre os principais polímeros presentes na indústria, o Politereftalato de etileno (PET) é um dos que mais se destaca, sendo responsável pela substituição quase que em sua totalidade do uso de vidro e metais na confecção de garrafas para bebidas, devido as suas características como transparência, boa resistência química e boas propriedades mecânicas, desejadas nesta aplicação (Awaja, F.; Pavel, D., 2005). Porém, ao contrário das garrafas de vidro e metais que podem ser facilmente recicladas em novas garrafas, seguindo o modelo de ciclo fechado conhecido nesse caso como *bottle-to-bottle* (garrafa-para-garrafa), o PET por sua vez, apresentou dificuldades em seguir esse formato, devido principalmente, ao desconhecimento dos efeitos do contato entre a bebida e a contaminação residual presente no plástico após os processos de reciclagem, exigindo métodos de reciclagem mais complexos e caros (Welle, F., 2011).

Dessa forma, inicialmente a reciclagem de garrafas PET seguia exclusivamente o modelo de

ciclo-aberto, tendo como principal aplicação a produção de fibras de poliéster para indústria, que logo se mostrou incapaz de escoar a quantidade de garrafas coletadas para reciclagem (Welle, F., 2011). Com o intuito de viabilizar a reciclagem das garrafas PET no formato *bottle-to-bottle*, diversos estudos foram conduzidos em diversos países, alcançando resultados promissores, com metodologias do tipo já sendo aplicadas em alguns segmentos da indústria. No Brasil, cerca de 55% das embalagens fabricadas em PET foram recicladas no ano de 2019, onde 23% desse total reciclado retornou para a cadeia produtiva na forma de garrafa seguindo o modelo de ciclo-fechado, sendo o restante, reutilizado em outros setores da indústria (ABIPET, 2019).

Isso mostra que, apesar do significativo avanço no emprego da tecnologia *bottle-to-bottle* na reciclagem de garrafas PET, ainda há uma dificuldade em aplicar o método de forma abrangente relacionada principalmente a viabilidade econômica. Dessa forma, torna-se interessante o desenvolvimento de novas aplicações mais simples e baratas para o PET reciclado, auxiliando no escoamento matéria prima coletada para reciclagem. Dentre os inúmeros setores para aplicação da matéria prima reciclada, o mercado de Impressão 3D apresenta grande potencial, tendo em vista a grande utilização de diversos filamentos termoplásticos.

A Impressão 3D vem cada vez mais assumindo papel de destaque no desenvolvimento de cadeias de produção mais sustentáveis bem como no âmbito da Indústria 4.0, apresentando diversos benefícios relacionados a redução no uso de recursos. A técnica FDM (*Fused Deposition Modeling* ou Modelagem por Fusão e Deposição) desenvolvida há mais de 20 anos por Scott Crump, é o principal método aplicado nesse setor atualmente, por sua efetividade e acessibilidade. Tal método funciona através da deposição subsequente de camadas do material desejado (filamentos termoplásticos) para formar a peça a partir de um modelo digital (Gebler, *et.al.*, 2014) (Stratasys, 2021). Apesar das vantagens da difusão da Manufatura Aditiva tanto na indústria quanto no mercado popular, em especial a Impressão 3D, há preocupações relacionadas principalmente ao aumento no consumo de recursos para fabricação dos filamentos utilizados, ocasionando um efeito contrário ao desejado (Ford, S.; Despeisse M., 2016).

Assim sendo, este trabalho tem por objetivo desenvolver um filamento compósito para impressão 3D utilizando PET reciclado a partir de garrafas em conjunto com Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e o compatibilizante Fusabond N416, isso pois, a característica frágil do PET, comumente potencializada após as etapas de reciclagem mecânica (Giraldi, A.L.F.M.; Jesus, R.C. *et.al.*, 2005), traria dificuldades em viabilizar um filamento composto exclusivamente por PET reciclado com as características desejadas para tal aplicação, fazendo-se necessário o desenvolvimento de uma blenda polimérica que consiste na união de diferentes polímeros resultando em um material com propriedades e características customizadas (Dorigato, A., 2021). A escolha do polietileno também traz vantagem de que tal polímero pode também ser futuramente reciclado a partir das tampas das garrafas bem como outros produtos, permitindo a produção de filamentos quase que totalmente reciclados.

Para tanto, foram conduzidos experimentos e testes acerca da recuperação do PET, adaptando-a conforme a necessidade com intuito de tornar o processo mais eficaz. Também foram avaliados os parâmetros envolvidos na etapa de produção do filamento via extrusão e o seus devidos impactos na qualidade final, bem como a efetividade da composição da blenda, comparando três opções distintas com o intuito de definir a mais adequada através de avaliações qualitativas e análises térmicas.

## **Material e Métodos**

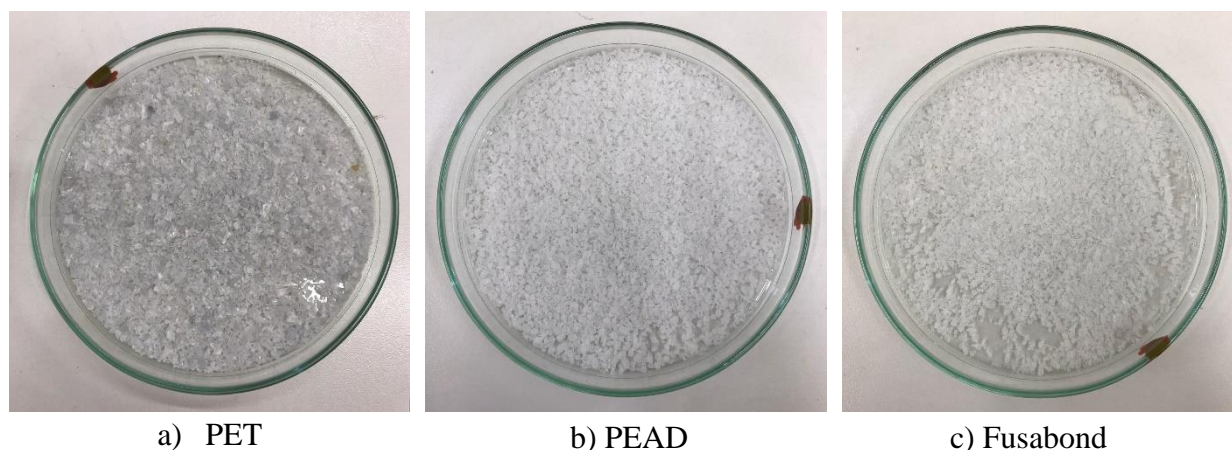
A etapa experimental foi definida a partir da adaptação de metodologias já empregadas na indústria para recuperação do PET e produção do filamento, descritas por (Awaja, F.; Pavel, D., 2005) (Welle, F., 2011), sendo os processos divididos em 3 etapas principais: *Etapa 0: Preparação das amostras, Etapa 1: Extrusão do filamento e Etapa 2: Caracterização térmica*. Para realização dos experimentos foram utilizados os seguintes materiais: PET reciclado pré-triturado com aproximadamente 5 mm disponível no Laboratório de Metalografia do IMT, PEAD GM9450F produzido pela Braskem e Fusabond N416 (Elastômero de etileno modificado quimicamente

utilizado como modificante/compatibilizante de polímeros) produzido pela Dow Química, ambos dispostos na forma de pellets de aproximadamente 2 mm.

#### Etapa 0: Preparação das amostras

O processo de preparação das amostras iniciou-se a partir da etapa de adequação dos polímeros utilizados para o tamanho desejado, definido como 2 mm, já que estudos feitos por (Adnan, H.A.; Al-Zubiedy, A.A.A., 2021) demonstraram que o aumento do tamanho da amostra, há uma diminuição no alongamento e resistência a tração do material, além de influenciar em outras propriedades do material. Para isso, foi utilizado um moinho de facas do tipo Willey e um agitador de peneiras.

Figura 1 – Amostras pós-adequação para tamanho de 2 mm



Em seguida as amostras de PET reciclado já trituradas passaram pela etapa de descontaminação através da lavagem (dois métodos distintos) e posterior secagem em estufa, descritos na Tabela 1. As amostras de PEAD e Fusabond não passaram por essas etapas tendo em vista que estas são matéria prima virgem, e, portanto, as contaminações presentes nelas são mínimas.

Tabela 1 – Descrição dos processos de descontaminação das amostras de PET reciclado

Etapa	Descrição	Premissas
Lavagem em solução	Lavagem por 15 minutos em solução de 2% de NaOH e detergente em água DI a 80°C, seguida de uma lavagem em água DI apenas a temperatura ambiente.	Remoção de contaminações mais profundas e ácidos presentes nos flakes (Awaja, F.; Pavel, D., 2005) (Welle, F., 2011).
Lavagem em água	Lavagem em água DI a temperatura ambiente por 10 minutos.	Remover contaminações superficiais mais grosseiras.
Secagem	Permanência em estufa a uma temperatura de 170 °C por 6 horas.	Reduzir a presença de água na amostra, evitando a degradação via hidrólise durante a etapa de extrusão (Awaja, F.; Pavel, D., 2005).

Após a secagem, as amostras foram armazenadas em dessecadores até a etapa de extrusão para evitar o contato com o ambiente externo e a possível absorção de umidade. As composições em porcentagem mássica das três blendas analisadas são expostas na Tabela 2, de forma que, o Fusabond, não foi contabilizado na massa total da amostra.

Tabela 2 – Composição das blendas para amostra de 50g

Blenda	PET	PEAD	Fusabond
1	75,0%	25,0%	1,50%
2	50,0%	50,0%	3,0%
3	30,0%	70,0%	5,0%

### Etapa 1: Extrusão do filamento

Para a extrusão das amostras foi utilizada a extrusora modelo AX-DR 16:40 disponibilizada pelo laboratório da Boomera, tendo em vista que esta possui a configuração de rosca dupla *co-rotating* (ambas as roscas giram no mesmo sentido) que apresenta vantagem sobre a configuração de rosca simples permitindo uma melhor mixagem da blenda (Awaja, F.; Pavel, D., 2005).

As zonas de aquecimento da extrusora (9 zonas para esse modelo) foram configuradas de três diferentes formas, apresentadas na Tabela 3, a fim de avaliar a influência do perfil de temperatura nas características do filamento resultante. A rotação das roscas da extrusora foi mantida constante no valor de 80 rpm, que apresentou melhor desempenho para a extrusão das amostras desse tamanho.

Tabela 3 – Temperaturas das zonas de aquecimento da extrusora (°C)

Zonas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Perfil 1	180	230	235	240	240	245	245	245	240
Perfil 2	180	220	240	245	245	245	240	220	220
Perfil 3	180	200	225	245	245	245	225	200	200

As extrusões por sua vez, foram realizadas seguindo as configurações listadas na Tabela 4 com o intuito de avaliar a influência do perfil de temperatura de extrusão e a composição da blenda na qualidade do filamento extrudado.

Tabela 4 – Ensaios de extrusão realizados

Ensaio	1	2	3	4	5
Amostra	Blenda 1	Blenda 1	Blenda 1	Blenda 2	Blenda 3
Aquecimento	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 2	Perfil 2

### Etapa 2: Caracterização térmica das amostras

Os ensaios térmicos de Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC) e Termogravimetria (TGA) foram realizados de acordo com as normas ISO 11357/ISO 11358, respectivamente. As análises do tipo DSC tiveram como objetivo determinar os valores de Temperatura de Fusão ( $T_m$ ), Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e a variação de Entalpia ( $\Delta H$ ). Já as análises TGA, buscaram avaliar os processos de degradação térmica e oxidação das amostras, tanto em atmosfera inerte (N<sub>2</sub>) quanto em atmosfera oxidante (80% N<sub>2</sub> – 20% O<sub>2</sub>), onde o segundo caso se assemelha melhor a condição real de extrusão.

As Figuras 2 e 3 apresentam esquematicamente a metodologia dos ensaios, onde para os ensaios DSC foram realizados 3 ciclos, afim de promover a reorganização das cadeias poliméricas nos primeiros ciclos, e então o ensaio efetivo no terceiro ciclo. Já os ensaios TGA foram realizados através de um único ciclo de aquecimento contínuo até a temperatura definida como 700°C.

Figura 2 – Esquemática dos ensaios DSC sob atmosfera Inerte

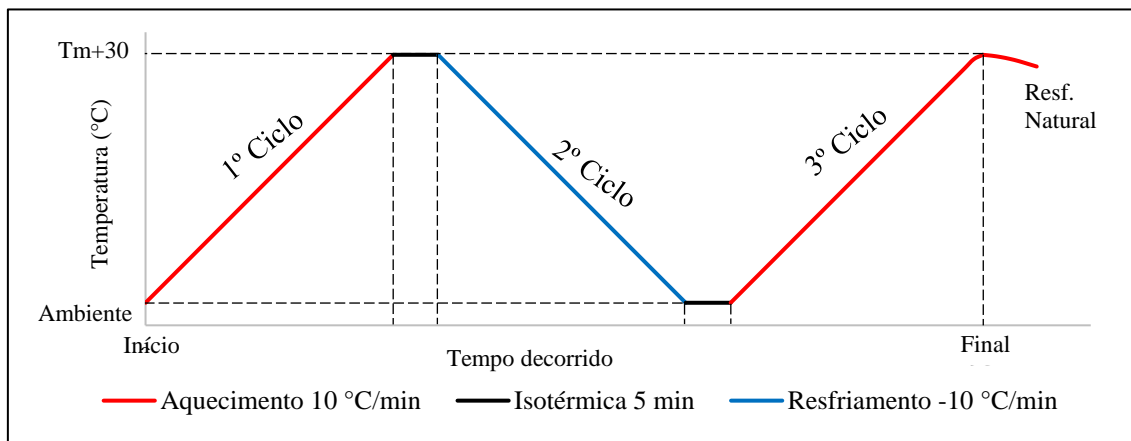
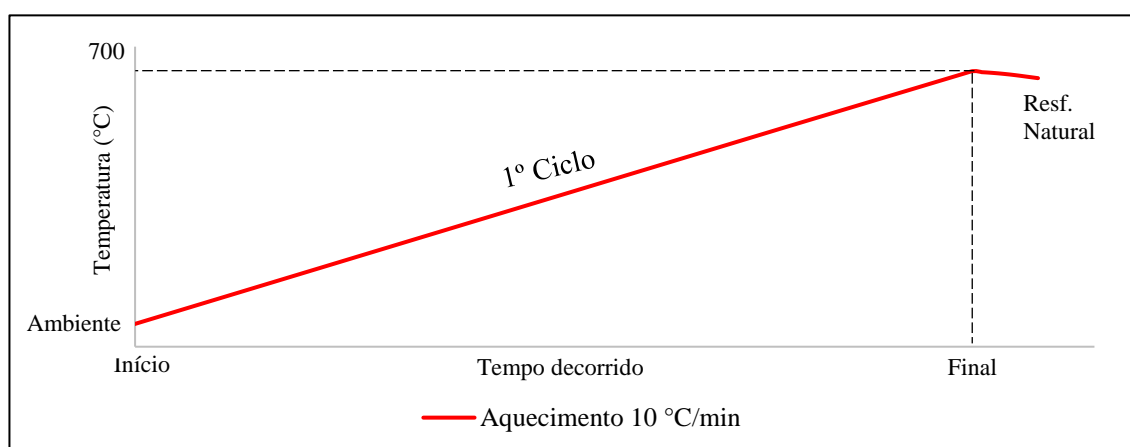


Figura 3 – Esquemática dos ensaios TGA sob atmosferas Inerte e Oxidante



## Resultados e Discussão

Os resultados das análises TGA para as amostras de PET reciclado são expressos pelas Figuras 4, 5 e 6. Os testes apresentam duas curvas, referentes a variação percentual de massa em função da temperatura (curva verde) e a sua respectiva derivada (curva azul), identificando os picos de degradação dos polímeros.

Figura 4 – Análise TGA para amostra de PET não lavada

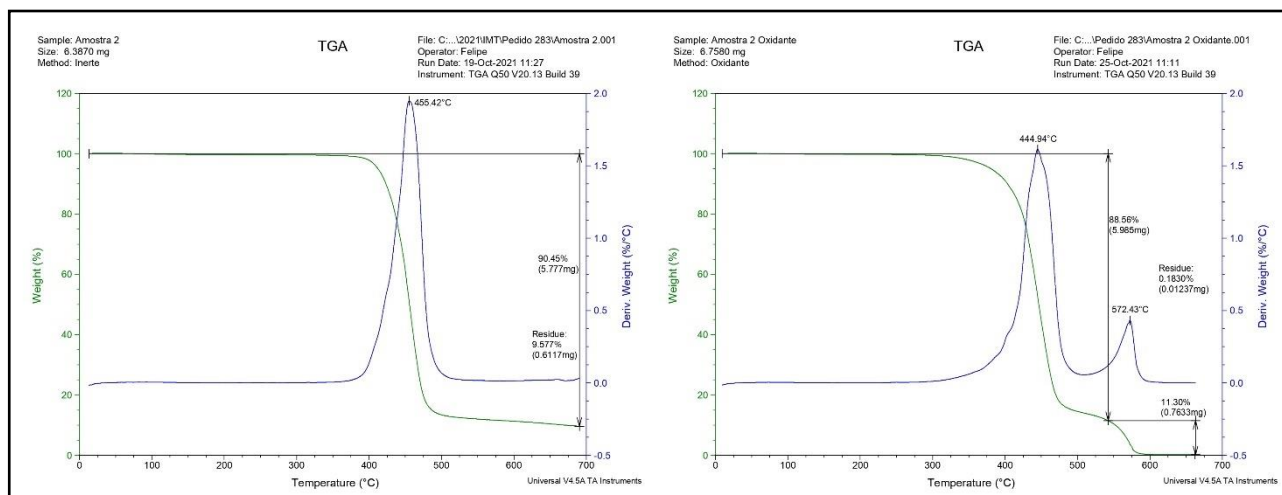


Figura 5 – Análise TGA para amostra de PET lavada em água

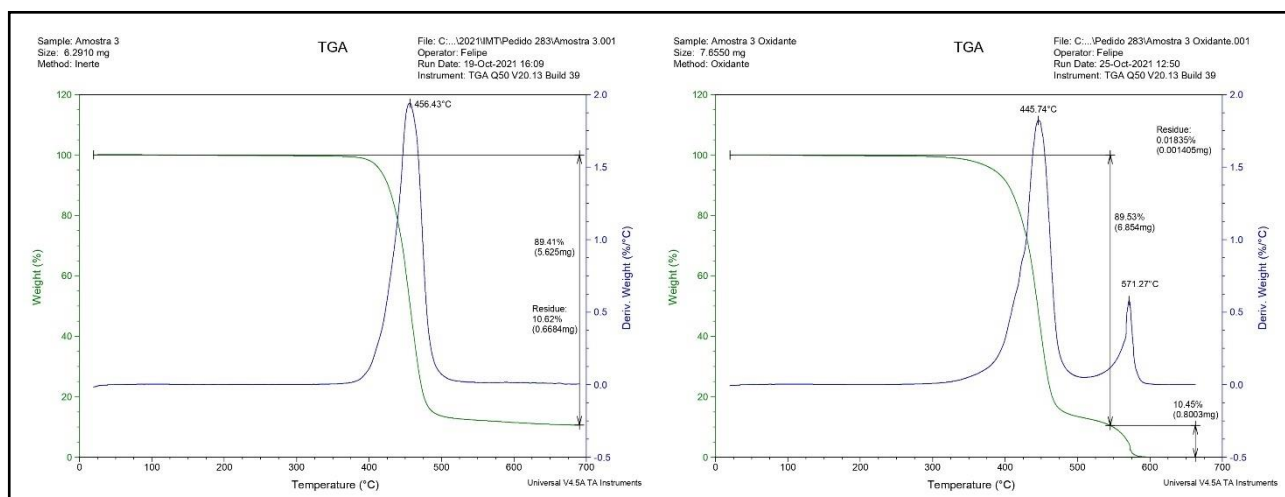
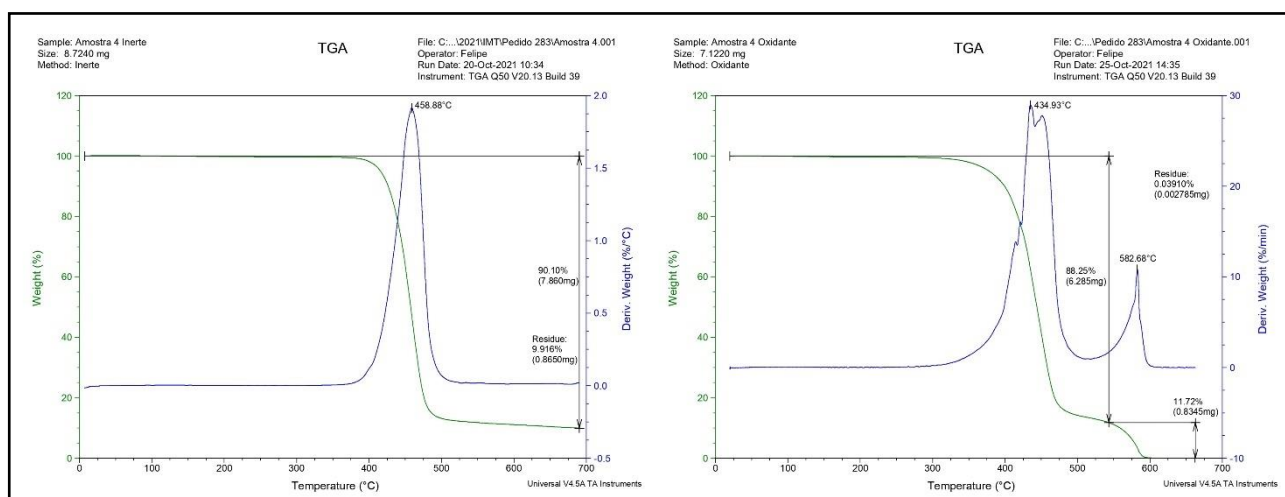


Figura 6 – Análise TGA para amostra de PET lavada em solução



No caso dos ensaios realizados sob atmosfera inerte, observa-se a presença de apenas um pico de degradação, onde amostra degrada quase que totalmente nesse intervalo, estabilizando a volta de valores percentagem mássica referentes aos resíduos dentre os quais se encontram: contaminantes, aditivos dos polímeros, subprodutos frutos de reações durante o ensaio etc. Já nos ensaios sob atmosfera oxidante, há a presença de um segundo pico de degradação devido a combustão por conta da interação com o ar sintético, levando a uma degradação total da amostra.

Além disso, observa-se que a degradação térmica da amostra se inicia prematuramente para atmosfera oxidante, por volta de 270~280°C enquanto para a atmosfera inerte, isso ocorre por volta de 330~350°C. Ambos os fenômenos são descritos também por (Das, P.; Tiwari, P., 2019). Para ambos os métodos de ensaio (inerte e oxidante), percebeu-se que os métodos de lavagem não apresentaram alteração significativa no comportamento das amostras, demonstrado pela Tabela 5.

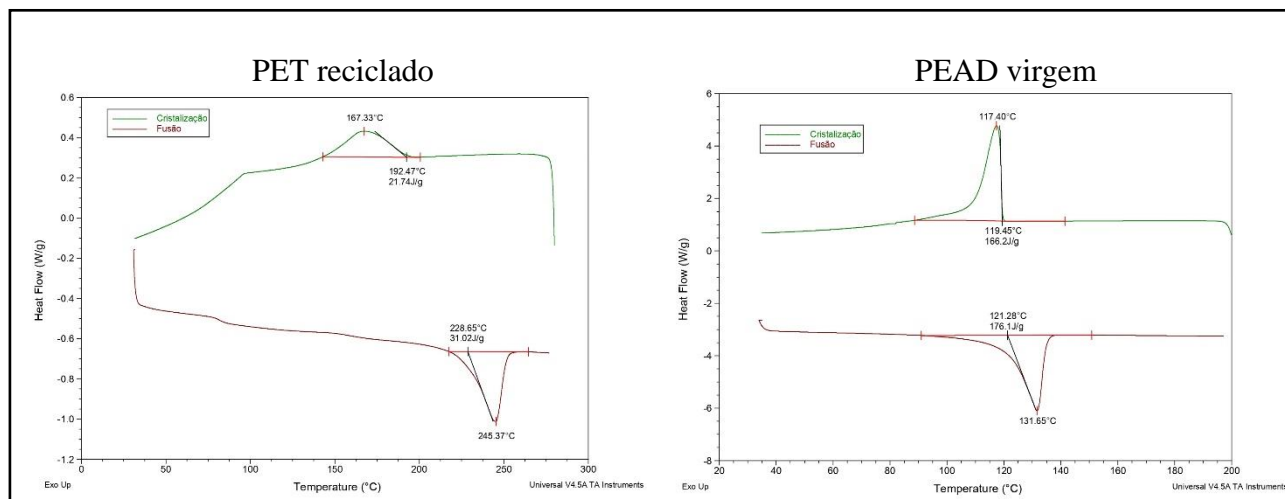
Tabela 5 – Comparação dos métodos de lavagem

Amostra	Atmosfera Inerte		Atmosfera Oxidante
	Pico de degradação (°C)	Resíduos (%)	Picos de degradação (°C)
Sem lavagem	455,42	9,577	444,94 e 572,43
Lavagem 1	456,43	10,62	445,73 e 571,27
Lavagem 2	458,88	9,916	434,93 e 582,68

Um fator que contribuiu para tal resultado, foi o processo de pré-seleção das garrafas, que foram separadas sem ir para o lixo e ainda passaram por uma pré-lavagem, diminuindo a efetividade das posteriores lavagens. Sendo assim, para este cenário apenas uma pré-lavagem em água e a secagem em estufa já se mostraram suficientes para a aplicação.

Os resultados obtidos nos ensaios DSC por sua vez estão expressos na Figura 7, onde os gráficos apresentam duas curvas, referentes aos processos de Fusão (linha vermelha) que apresenta comportamento endotérmico e o processo de Cristalização (linha verde) que apresenta por sua vez, comportamento exotérmico.

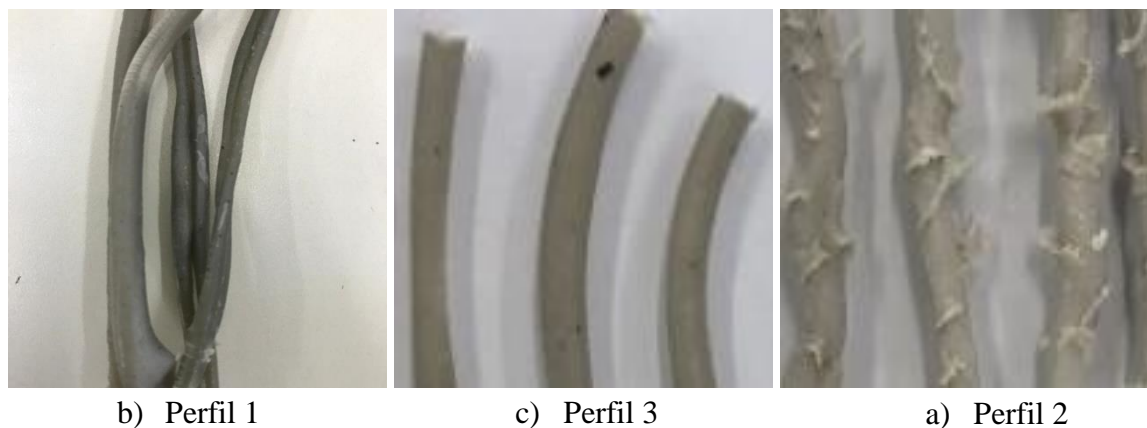
Figura 7 – Ensaio DSC amostras de PET e PEAD



As temperaturas indicadas no pico das curvas em vermelho, representam a Temperatura de Fusão ( $T_m$ ) enquanto o valor de pico da curva verde a Temperatura de Transição vítrea ( $T_g$ ). Como já esperado, o PET apresenta uma  $T_m$  muito maior que o PEAD, comprovando a necessidade da utilização do compatibilizante Fusabond N416 com o intuito de propiciar uma faixa fusão em comum para a blenda, evitando a degradação do PEAD.

Os resultados para os três primeiros ensaios de extrusão por sua vez, expostos pela Figura 8, demonstraram que o Perfil 2 de aquecimento da extrusora se mostrou mais adequado, favorecendo uma fusão homogênea da amostra. Já o Perfil 1, resultou em um extrudado muito fluido devido as altas temperaturas na zona de saída impossibilitando a formação de um filamento contínuo, e o Perfil 3 por sua vez, apresentou uma incapacidade de fundir completamente o PET, resultando em um filamento com aspecto de “espinhoso”.

Figura 8 – Resultados das extrusões da Blenda 1 para os diferentes perfis de aquecimento



Observou-se também, que os extrudados da Blenda 1 apresentaram característica muito frágil e quebradiça, não permitindo a formação de um filamento contínuo através do tracionamento do material pela bacia de resfriamento, descartando assim a possibilidade de utilizá-la para fabricação de um filamento para impressão 3D, sendo possível apenas a fabricação de pellets nesse caso.

Os ensaios 4 e 5 por sua vez, tem seus resultados apresentados na Figura 9, demonstrando uma melhor qualidade no extrudado e a possibilidade de formar um filamento contínuo, apesar de não apresentar qualidade dimensional (diâmetro contínuo ao longo do filamento) suficiente para ser utilizado na impressão 3D, sendo que o filamento da Blenda 2 apresentou uma qualidade superficial melhor que o filamento da Blenda 3, que apresentou certa rugosidade ao longo do filamento.

Figura 9 – Resultados das extrusões das Blenda 2 e 3



a) Blenda 2



b) Blenda 3

Por fim os ensaios DSC e TGA das Blendas 2 e 3 são apresentados nas Figuras 10 e 11 respectivamente, sendo que a Blenda 1 não foi ensaiada devido a evidente impossibilidade de ser utilizada para a aplicação desejada, como discutido anteriormente. As variações da Entalpia de Fusão ( $\Delta H$ ) obtida nas curvas DSC para ambas as amostras, permitiram avaliar qualitativamente a ductilidade do filamento, uma vez que, tal propriedade está relacionada de forma diretamente ao grau de cristalinidade e, portanto, a fragilidade do material (Canevarolo Jr, S.V., 2013.).

A Blenda 2 apresentou menor valor de  $\Delta H$  para o ciclo de fusão (79,37 J/g) e, portanto, maior ductilidade que Blenda 3 (119,2 J/g), que por sua vez apresentou também uma anormalidade na curva da análise TGA, causada por uma incorreta proporção de compatibilizante utilizada para essa amostra, nesse caso, quantidade utilizada maior do que a necessária. Esse fenômeno é descrito por demais pesquisas (Pawlak, A.; Morawiec, J.; *et al.*), que comprovam que o aumento indeferido da porcentagem de compatibilizante, não se traduz necessariamente em uma melhor compatibilização dos polímeros, apresentando resultado contrário, podendo ocasionar a fabricação de subprodutos durante a termo oxidação da amostra durante o ensaio afetando o comportamento da curva característica das análises TGA, além de prejudicar a qualidade do filamento.



Figura 10 – Análise DSC da Blendas 2 e 3 após a extrusão

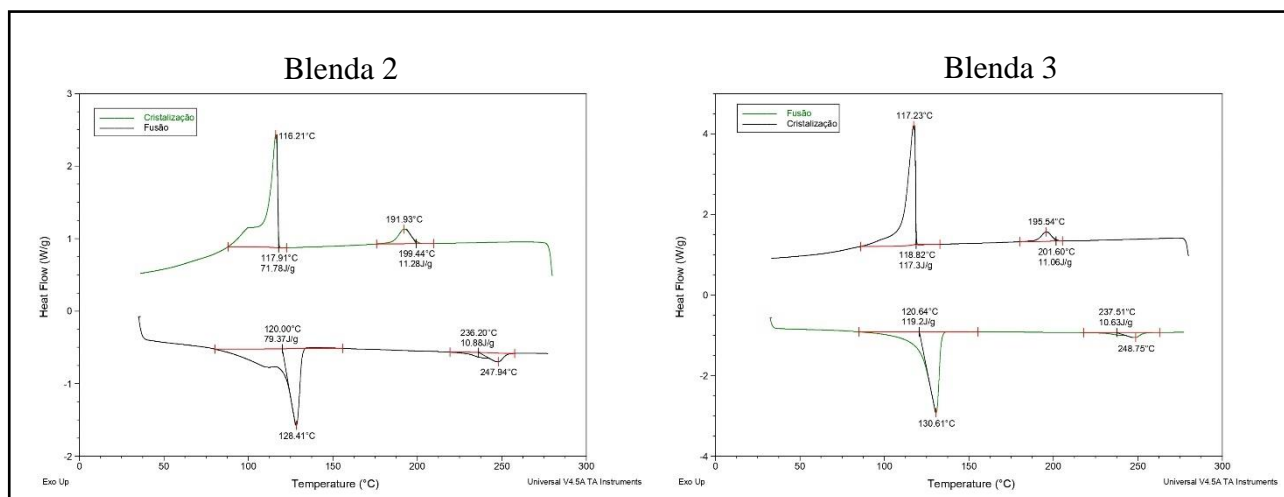
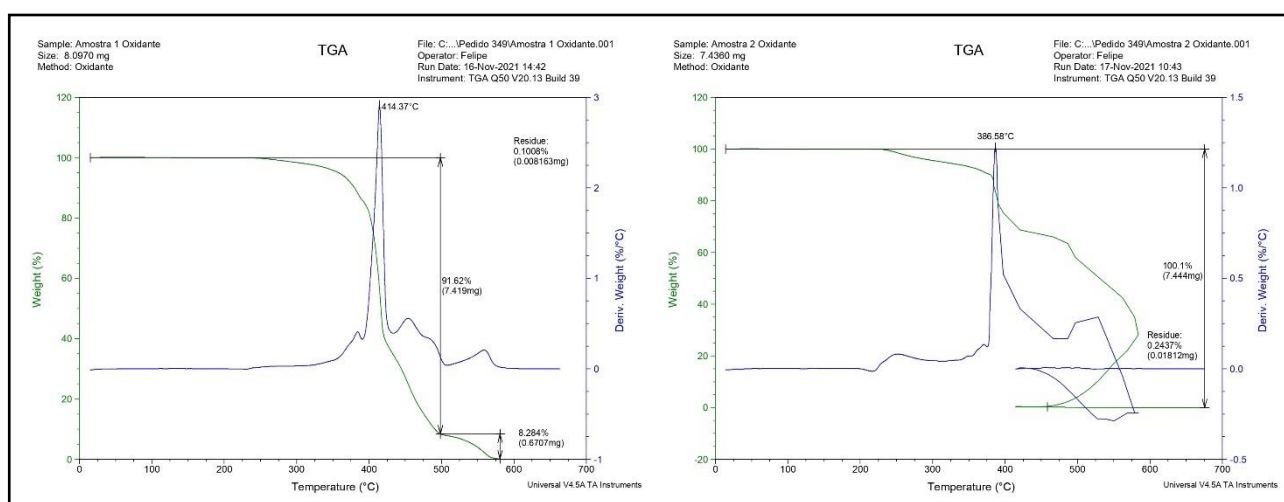


Figura 11 – Análise TGA das Blendas 2 e 3 após a extrusão



## Conclusões

Os resultados dos ensaios mostraram que para produzir um filamento que possa ser utilizado para impressão 3D é necessária uma composição de blenda mais equilibrada (Blenda 2), descartando a possibilidade de se utilizar blendas com altas concentrações de PET (Blenda 1), devido a rigidez excessiva do filamento. Já para o caso inverso, onde há maior concentração de PEAD (Blenda 3), observou-se um desempenho melhor no extrudado, tendo em vista o comportamento mais dúctil do polietileno, porém os ensaios apresentaram falhas já comentadas relacionadas a proporção de compatibilizante utilizada, impossibilitando afirmações conclusivas. De qualquer forma, concentrações altas de PEAD (virgem) contrariam o propósito de se produzir um filamento de PET reciclado, justificando a preferência por frações maiores de PET.

Portanto, apesar de ainda não ter sido possível obter um filamento que pudesse ser utilizado em impressoras 3D, foi possível avaliar parte das variáveis envolvidas na recuperação do PET e produção do filamento, concluindo que uma metodologia simples para reciclagem do PET já é suficiente para tal aplicação, e que uma blenda de 50/50 (porcentagens mássicas de PET e PEAD respectivamente) observou-se mais ductilidade, e menor viscosidade que garantiu uma produção de quantidades homogêneas o suficientes para a futuras aplicações.

## Referências

- ABIPET. (2019) *Abipet divulga dados do 11º Censo da Reciclagem do PET no Brasil*, Disponível em: <https://blogdoplastico.wordpress.com/tag/abipet>.
- Adnan, H.A.; Al-Zubiedy, A.A.A. (2021) Studying the effect of irregular crumbling from recycled polymeric materials on selected characteristics of the extrusion process, *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.279>
- Awaja F.; Pavel D. (2005) Recycling of PET, *European Polymer Journal*, **41**, 1453-1477. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>
- Canevarolo Jr, S.V. (2013) *Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. São Paulo, Artliber Editora.
- Das, P.; Tiwari, P. (2019) Thermal degradation study of waste polyethylene terephthalate (PET) under inert and oxidative environments, *Thermochimica Acta*, **679**. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178340>
- Dorigato, A. (2021) Recycling of polymer blends, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, **4**, 53-69. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.02.005>
- Ford, S.; Despeisse, M. (2016) Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *Journal of Cleaner Production*, **137**, 1573-1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- Gebler, M.; Anton, J.M.; Uiterkamp, S.; Visser, C. (2014) A global sustainability perspective on 3D printing technologies, *Energy Policy*, **74**, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>
- Geyer R.; Jambeck J. R.; Law K. L. (2017) *Production, use, and fate of all plastics ever made*. *Sci. Adv.* **3**, e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Ghosh; Kumar, S. (2020) *Circular economy: global perspective*. ed. Singapore, Springer.
- Gileno, L.A.; Turci, L.F.R. (2021) Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes, *Cleaner Environmental Systems*, **3**. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100057>
- Giraldi, A.L.F.M.; Jesus, R.C.; Mei, L.H.I. (2005) The influence of extrusion variables on the interfacial adhesion and mechanical properties of recycled PET composites, *Journal of Materials Processing Technology*, **162–163**, 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.046>
- Pawlak, A.; Morawiec, J.; Pazzagli, F.; Pracella, M.; Galeski, A. (2002) Recycling of Postconsumer Poly(ethylene terephthalate) and High-Density Polyethylene by Compatibilized Blending, *Journal of Applied Polymer Science*, **86**, 1473-1485. <http://dx.doi.org/10.1002/app.11307>
- PlasticsEurope. (2019). *The circular economy for plastics, a European overview*. Disponível em: [https://plasticseurope.org/fr/wpcontent/uploads/sites/2/2021/11/CircularEconomy\\_study\\_FINAL\\_061219\\_SINGLE.pdf](https://plasticseurope.org/fr/wpcontent/uploads/sites/2/2021/11/CircularEconomy_study_FINAL_061219_SINGLE.pdf)
- Shamsuyeva, M.; Endres, H.F. (2021) Plastics in the context of the circular economy and sustainable plastics recycling: Comprehensive review on research development, standardization and market, *Composites Part C*, **6**. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100168>
- Stratasys. (2021) *O que é a Tecnologia FDM*, Disponível em: <https://www.stratasys.com/br/fdm-technology>
- Welle, F. (2011) Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview, *Resources, Conservation and Recycling*, **55**, 865-875. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.04.009>

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente o professor orientador Dr. Guilherme Wolf Lebrão pelo auxílio e orientação em durante todo o andamento da pesquisa e a Sra. Margarete C.M. Serbino do Laboratório de Metalografia do IMT pelo auxílio ao longo de toda a parte experimental da pesquisa realizada. Agradeço também a empresa Boomera pelo material doado, além dos equipamentos utilizados, e aos Srs. Maurício Fuin e Thales B. Delollo pelo auxílio com o uso desses equipamentos. Por fim, agradeço também a Sra. Érica F.S Tirelli e Sr. Felipe S. Andrade da Divisão de Ensaios e Análises do Centro de Pesquisa do IMT pelas análises, além dos Srs. Douglas D. Justina e Lucas F. Arruda da Planta Piloto do IMT pelo auxílio no uso dos equipamentos do laboratório.