

## VIABILIDADE DE FILAMENTOS DE POLILÁCTICO ÁCIDO RECICLADO PARA APLICAÇÕES EM IMPRESSÃO 3D

**Cleiton Lazaro Fazolo de Assis**

**Kelvin dos Santos Tiene**

**Guilherme Rosati Mecelis**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Votuporanga – Avenida Jerônimo Figueira da Costa, 3014 – Pozzobon, Votuporanga – SP, 15503-110

fazolocla@ifsp.edu.br; kelvin.tiene@aluno.ifsp.edu.br; guilherme.mecelis@ifsp.edu.br

**Resumo:** As últimas décadas tem revelado um aumento considerável do consumo de materiais poliméricos, evidenciando a necessidade ecológica de redução do descarte de plásticos. A realização de pesquisas que viabilizem o uso de materiais reciclados em substituição da matéria prima virgem traz grandes vantagens e pode também ser indicada para aplicações em Manufatura Aditiva. Contudo, a utilização de materiais reciclados pode apresentar mudanças nas propriedades mecânicas quando comparadas as versões originais, tornando necessário avaliar seu comportamento mecânico para validar a qualidade da técnica de reciclagem, assim como favorecer a sustentabilidade. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico de corpos de prova de Ácido Poliláctico Reciclado (PLA-Reciclado) produzidos por Fabricação por Filamento Fundido (FFF). Ensaios de tração foram aplicados para avaliar a resistência mecânica do filamento reciclado em comparação a filamentos comerciais de PLA virgem na condição básica (PLA-Básico) e de alta temperatura (PLA-HT). Os parâmetros de impressão, considerados fatores de controle na fabricação dos corpos de prova, foram o material do filamento de impressão e a temperatura de extrusão (190 a 260°C). Análise de Variância (ANOVA) e Teste Post-Hoc de Tukey foram as ferramentas estatísticas adotadas para a análise dos dados experimentais, considerando uma confiabilidade de 95%. De acordo com a análise estatística, os fatores de controle afetaram as propriedades mecânicas dos corpos de prova. O PLA-HT apresentou aumento da resistência máxima com o aumento da temperatura. O PLA-Básico apresentou tendência de aumento da resistência e o PLA-Reciclado revelou redução a partir de 210°C. Contudo, para a faixa entre 190 e 210°C o comportamento mecânico dos materiais foi equivalente. Para qualidade da adesão das peças na mesa de impressão e fluidez do material reciclado, a temperatura de extrusão de 210°C apresentou melhor desempenho para o processo FFF. A especificação de parâmetros de impressão adequados ao material reciclado proporciona boas propriedades mecânicas, validando a reciclagem mecânica e o emprego em aplicações de impressão 3D, assegurando qualidade e segurança das peças produzidas.

**Palavras-chave:** PLA; FFF, Reciclagem; Filamento; Manufatura Aditiva.

### 1. INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação por adição de material, também conhecidos como Manufatura Aditiva, são um conjunto de técnicas que visam a fabricação de peças tridimensionais por meio da deposição de camadas de um material fundido uma sobre as outras até formar a geometria desejada (Jandyal *et al.*, 2022). Popularmente chamado Impressão 3D, o processo está atualmente disseminado na pesquisa científica, engenharia de manutenção, produção de bens de consumo, educação e público em geral (Thompson, 2022). Uma das técnicas mais utilizadas é a Fabricação por Filamento Fundido (FFF), a qual envolve a fusão de um filamento de material termoplástico para deposição e fabricação da peça (Rajan *et al.*, 2022).

A Manufatura Aditiva favorece a redução do desperdício de materiais, culminando na redução do consumo de energia ao eliminar etapas de tratamento de resíduos derivados do processo de fabricação (Kai *et al.*, 2016). Além disso, os processos aditivos podem adicionar mais elementos que corroborem os aspectos apresentados, por exemplo, utilizando materiais menos contaminantes do meio ambiente e que também possam ser reaproveitados (Faludi *et al.*, 2015). Nesse sentido, a reciclagem de materiais para uso na impressão 3D é um aspecto significativo para a sustentabilidade dos meios de produção, inclusive na redução de custos relativos à matéria-prima (Javaid *et al.*, 2021). Há uma diferença de preços entre os materiais virgem e reciclados, os quais tendem a ser barateados com o aumento do número de consumidores de filamentos reciclados (Sun *et al.*, 2020).

Dentre os polímeros termoplásticos utilizados para fabricação de filamentos para impressão 3D, o PLA (Ácido Poliláctico) é destaque por ser um biopolímero biodegradável, bioabsorvível e reciclável (Baran e Erbil, 2019). Apresenta boa qualidade de impressão e uma estabilidade térmica e resistência a degradação a altas temperaturas, superior a outros filamentos (Matos *et al.*, 2019). Além disso, possui boas propriedades mecânicas e elétricas (Zhu *et al.*, 2021). Apesar do maior custo de produção, quando comparado a outros termoplásticos para impressão 3D, é um material industrialmente relevante devido ao aumento da preocupação das empresas e da sociedade com a sustentabilidade (Correia *et al.*, 2022).

Contudo, segundo os autores, como geralmente ocorre com a maioria dos termoplásticos, sofre alterações de performance ao ser reciclado, decorrente da degradação molecular do material durante o processamento por reciclagem mecânica.

Pesquisas indicam uma baixa perda de resistência mecânica do PLA reciclado quando comparado a versão virgem do material (Fernandes, 2019). Porém, quedas maiores desta propriedade mecânica podem ocorrer quando o material passa por mais ciclos de reciclagem, afetando significativamente o comportamento mecânico do PLA reciclado (Lanzotti *et al.*, 2019).

Nesse sentido, este projeto de pesquisa visa investigar o efeito do processo de reciclagem de PLA desenvolvido pela empresa PrintGreen 3D. Ensaio de tração foram aplicados para avaliar a resistência mecânica, tensão de ruptura e deformação dos corpos de prova impressos em 3D. Análise estatística utilizando as ferramentas Análise de Variância (ANOVA) e Test *Post-Hoc* de Tukey foram empregados para verificar o efeito dos fatores de controle nas respostas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A técnica de impressão dos corpos de prova foi a Fabricação por Filamento Fundido (FFF). A impressora 3D foi fornecida pela empresa Topink3D Ltda. O equipamento é da marca Kywood3D, modelo Tycoon Max, com eixo linear. O tamanho útil de impressão é de 300 mm x 300 mm x 230 mm. A velocidade máxima de impressão é de 100 mm/s e de deslocamento de 150 mm/s. O diâmetro útil de filamento do material é de 1,75 mm. A temperatura máxima do bico de extrusão é de 260 °C. A mesa de impressão é de alumínio aquecida, com tampo de vidro temperado (até 110 °C), nivelamento automático e detecção de fim de filamento. O gabinete da impressora é aberto, sendo adequada ao trabalho com PLA (Fig. 1).



Figura 1. Impressora 3D adotada na produção dos corpos de prova.

O software de fatiamento utilizado foi o Ultimaker Cura®. Os corpos de prova foram impressos com padrão de preenchimento concêntrico, altura da camada de 0,2 mm e preenchimento de 100%. A velocidade de impressão foi de 30 mm/s. O diâmetro do bico de extrusão foi de 0,4 mm, temperatura da mesa de 60°C e a temperatura de extrusão variou de 190 a 260°C. Cinco corpos de prova de cada condição experimental foram impressos para posterior análise estatística dos resultados dos ensaios mecânicos. A Tab.1 apresenta os parâmetros de impressão 3D dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração.

Tabela 1. Parâmetros de impressão adotados nos experimentos de impressão 3D.

Fatores de controle	Níveis
Material	PLA-Básico, PLA-HT e PLA-Reciclado
Padrão de preenchimento	Concêntrico
Altura de camada [mm]	0,2
Preenchimento [%]	100
Diâmetro do bico de extrusão [mm]	0,4
Velocidade de impressão [mm/s]	30
Temperatura da mesa [°C]	60
Temperatura de extrusão [°C]	190, 200, 210, 220, 230, 240, 250 e 260

Os poliméricos termoplásticos utilizados na fabricação dos corpos de prova foram o PLA (Ácido Polilático) nas condições básica (PLA-Básico), alta temperatura (PLA-HT) e reciclado (PLA-Reciclado). Os filamentos virgens foram

fornecidos pela empresa 3DX Filamentos LTDA e o reciclado pela PrintGreen 3D LTDA. O padrão de preenchimento concêntrico foi aplicado na produção dos corpos de prova, conforme ilustrado na Fig. 2. A escolha desse padrão visou facilitar e agilizar o processo de impressão das amostras, além de alinhar as linhas de deposição com a direção de aplicação da tensão durante o ensaio de tração.

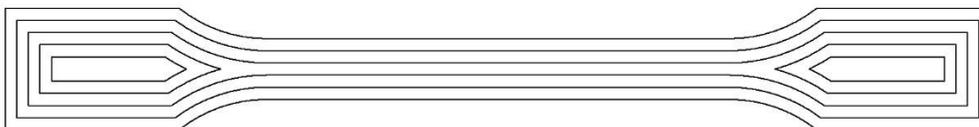


Figura 2. Padrão de preenchimento dos corpos de prova dos ensaios de tração.

Os ensaios de tração foram realizados com auxílio de uma máquina de ensaios de tração da marca EMIC, modelo DL-30000, com capacidade máxima de 300 kN. A norma técnica aplicada foi a ISO 527-1/2:2012. A velocidade de deformação ou de ensaio foi de 10 mm/min. As propriedades mecânicas avaliadas foram deformação, tensão máxima e tensão de ruptura, com aplicação de uma matriz fatorial 3×8, totalizando 24 condições de impressão 3D. Cinco corpos de prova de cada condição foram produzidos para fins de repetibilidade e cálculo das médias, considerando um intervalo de confiança de 95%. Sendo assim, foram realizados 120 ensaios de tração no total.

As análises dos resultados quantitativos foram realizadas com auxílio da ferramenta estatística Análise de Variância (ANOVA), para verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores de controle exercem influência nas respostas (deformação, resistência máxima e tensão de ruptura). O Teste *Post-Hoc* de Tukey foi também aplicado para comparação das médias, visando identificar quais níveis dentro de um mesmo fator de controle geram diferentes respostas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tab. 2 apresenta o quadro ANOVA para a resistência máxima e tensão de ruptura dos corpos de prova impressos em 3D e submetidos ao ensaio de tração. Para os fatores de controle e respectiva interação, a probabilidade P foi menor que 0,05, indicando que as variáveis adotadas afetaram estatisticamente a resistência máxima das amostras. Quanto a tensão de ruptura, o material do filamento e interação com a temperatura de extrusão afetaram estatisticamente a resposta. Porém, a temperatura de extrusão não foi estatisticamente relevante para este efeito ( $P > 0,05$ ). Este resultado indica que a resistência ao escorregamento das macromoléculas umas sobre as outras durante a deformação plástica é mais dependente do tipo de PLA utilizado do que da temperatura de extrusão empregada na fabricação das peças. A análise da soma dos quadrados médios ajustado sustenta a afirmação ao revelar um valor muito maior para o material do filamento (835,03) em comparação aos valores para a temperatura de extrusão (29,36) e respectiva interação (52,73).

Tabela 2. Quadro ANOVA para a resistência máxima e tensão de ruptura.

Fator de controle	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados Ajustado		Soma dos Quadrados Médios Ajustado		Frequência		Valor-P	
		Máxima	Ruptura	Máxima	Ruptura	Máxima	Ruptura	Máxima	Ruptura
Material	2	1251,68	1670,05	625,84	835,03	69,96	53,63	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
Temperatura	7	306,82	205,54	43,83	29,36	4,90	1,89	<b>0,000</b>	0,080
Material.Temperatura	14	922,74	738,19	65,91	52,73	7,37	3,39	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
Erro	96	858,80	1494,87	8,95	15,57				
Total	119	3340,04	4108,65						

A Fig. 3 apresenta o gráfico do efeito da interação do material do filamento com a temperatura de extrusão na resistência máxima e tensão de ruptura dos corpos de prova. De acordo com a análise dos gráficos, no intervalo entre 190 e 210°C, os materiais tenderam a apresentar comportamento mecânico semelhante quanto a resistência máxima. Com o aumento da temperatura de extrusão, o PLA-HT tendeu a aumentar a resistência, enquanto o PLA-Básico aparentou menor variação entre as médias. Contudo, para o PLA-Reciclado, o aumento da temperatura resultou em diminuição acentuada da resistência máxima a partir de 210°C. Quanto a tensão de ruptura, o PLA-HT apresentou estabilidade com o aumento da temperatura, enquanto os demais materiais apresentaram maior variação da média, com tendência a queda da tensão de ruptura para o PLA-Reciclado em temperaturas de extrusão mais elevadas. A queda nas tensões máxima e de ruptura para o material reciclado indica que a degradação molecular, sofrida pelo material devido as reações térmicas a cada fusão realizada, afeta o comportamento mecânico das peças. Devida a baixa estabilidade térmica dos polímeros, a cada processo de fusão pelo qual o termoplástico é submetido, ocorre o rompimento de ligações covalentes (dissolução das moléculas), alterando a estrutura do polímero e resultando em prejuízo das propriedades mecânicas.

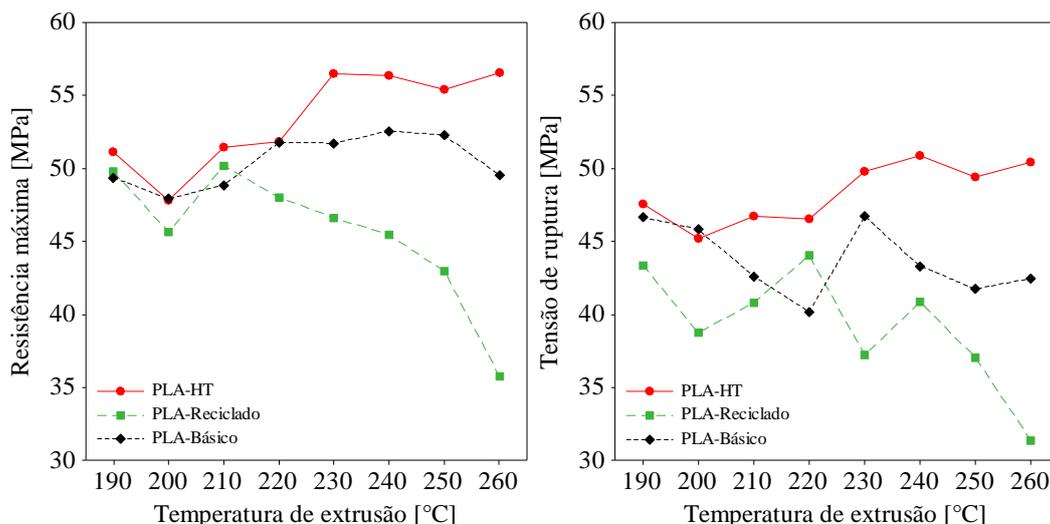


Figura 3. Gráficos do efeito dos fatores de controle na resistência máxima e tensão de ruptura.

O efeito da temperatura de extrusão também pode ser verificado no erro experimental calculado, considerando um intervalo de confiança de 95%. A Fig. 4 apresenta o erro experimental para a resistência máxima e tensão de ruptura. Para a resistência máxima é possível verificar que o erro experimental foi influenciado pelo tipo de PLA. De acordo com o gráfico, o PLA-HT apresentou redução e constância do erro a partir da temperatura de extrusão de 230°C. Este efeito pode ser proveniente da menor fluidez do material em temperaturas de extrusão abaixo de 230°C, alterando a adesão entre as interfaces das linhas de deposição e aumentando a variação da resistência do material. O PLA-Básico tendeu a um erro experimental constante e em torno de 2%. O PLA-Reciclado apresentou erro experimental acima de 10% nas temperaturas de 230, 240 e 250°C. Este efeito pode ser resultado da mistura de resíduos de PLA diversos, provenientes de diferentes fabricantes, afetando a composição química do filamento e apresentando diferentes resistências em temperaturas acima de 220°C. A redução do erro experimental na temperatura de 260°C pode indicar que o efeito da degradação molecular prevaleceu sobre o efeito da mistura de resíduos de PLA para reciclagem. Para a tensão de ruptura, os erros experimentais foram maiores e sem tendência aparente, revelando que possivelmente a interação entre material do filamento, temperatura de extrusão, mistura de resíduos e degradação molecular influenciaram os resultados.

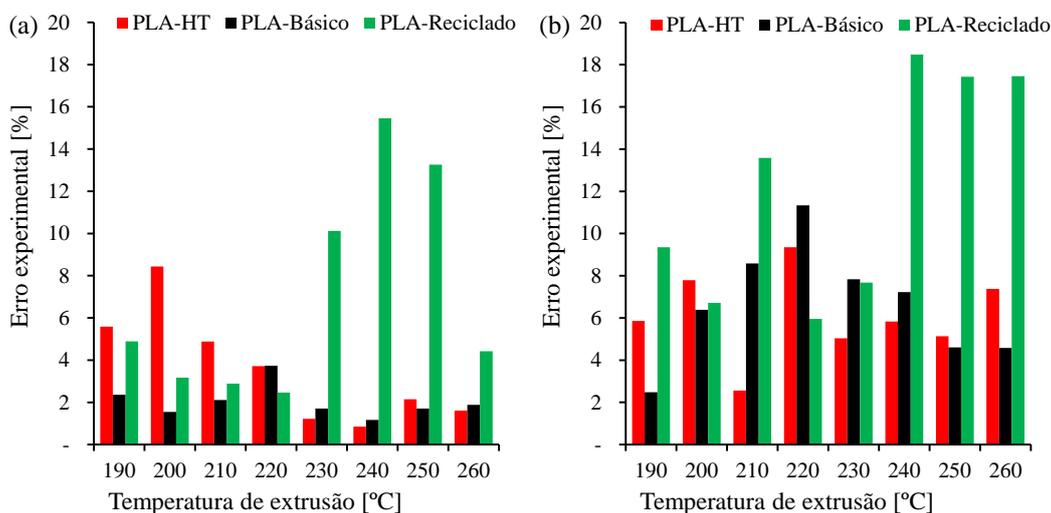


Figura 4. Erro experimental para a (a) resistência máxima e (b) tensão de ruptura.

As Tab. 3 apresenta o Test *Post-Hoc* de Tukey da comparação das médias dos resultados de resistência máxima e tensão de ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração, considerando os fatores de controle e respectiva interação. Para a tensão de ruptura não foi realizado o teste para a temperatura de extrusão pelo fato de a probabilidade P, revelada pelo quadro ANOVA da Tab. 2, ser maior que 0,05. As comparações dos níveis dentro de um mesmo fator de controle revelaram que as médias das propriedades mecânicas analisadas são diferentes, ou seja, alterando o tipo de PLA e a temperatura de extrusão é possível produzir peças por impressão 3D com diferentes comportamentos mecânicos. A aplicação do Teste de Tukey para a interação entre o material do filamento e a temperatura de extrusão resultou em 276 comparações. Nesse sentido, uma análise geral foi realizada e os resultados mais significativos foram as comparações das

interações para a faixa de temperatura entre 190 e 210°C, na qual ficou constatado que não há diferença entre as médias ( $P>0,05$ ), indicando comportamento mecânico semelhante entre os tipos de PLA estudados nessa pesquisa.

Tabela 3. Teste *post-hoc* de Tukey para a resistência máxima e tensão de ruptura.

Fator de Controle	Erro Padrão da Diferença		Comparação	Diferença das Médias		Valor-T		Valor-P	
	Máxima	Ruptura		Máxima	Ruptura	Máxima	Ruptura	Máxima	Ruptura
Material	0,8999	1,0070	PLA-HT – PLA-Rec	-7,8180	-9,1380	-8,6880	-9,0700	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
			PLA-HT – PLA-Básico	-2,8630	-4,6250	-3,1820	-4,5900	<b>0,0054</b>	<b>0,0000</b>
			PLA-Rec – PLA-Básico	4,9550	4,5130	5,5070	4,4790	<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>
Temperatura	1,0920		200 – 220	3,4013		3,1144		<b>0,0480</b>	
			200 – 230	4,4787		4,1008		<b>0,0021</b>	
			200 – 240	4,3340		3,9684		<b>0,0034</b>	
			230 - 260	-4,3330		-3,9670		<b>0,0034</b>	
			240 – 260	-4,1880		-3,8350		<b>0,0053</b>	

A análise estatística da deformação dos corpos de prova durante o ensaio de tração é apresentada no quadro ANOVA da Tab. 4. De acordo com os dados, os fatores de controle e respectiva interação afetaram estatisticamente a deformação dos corpos de prova. A análise da soma dos quadrados médios indicou que o material do filamento foi a variável mais significativa para a mudança de comportamento mecânico do material seguido da temperatura de extrusão e interação entre as variáveis. O gráfico da Fig. 5 apresenta o efeito dos fatores de controle na deformação. A análise gráfica indica comportamento mecânico semelhante entre os materiais na faixa de temperatura entre 190 e 210°C. A deformação continua estável para o PLA-HT com o aumento da temperatura. Porém, para o PLA-Reciclado a deformação diminui, ou seja, com o aumento da temperatura de extrusão do filamento, o corpo de prova tendeu a deformar menos antes de romper. O fenômeno também pode ser explicado pela degradação molecular do material reciclado, pois devido ao rompimento de ligações covalentes, menos suscetível o material é a deformação plástica antes da ruptura.

Tabela 4. Quadro ANOVA para a deformação.

Fator de controle	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados Ajustado	Soma dos Quadrados Médios Ajustado	Frequência	Valor-P
Material	2	13,85250	6,92625	73,07	<b>0,000</b>
Temperatura	7	3,00569	0,42938	4,53	<b>0,000</b>
Material.Temperatura	14	5,24660	0,37476	3,95	<b>0,000</b>
Erro	96	9,09940	0,09479		
Total	119	31,20420			

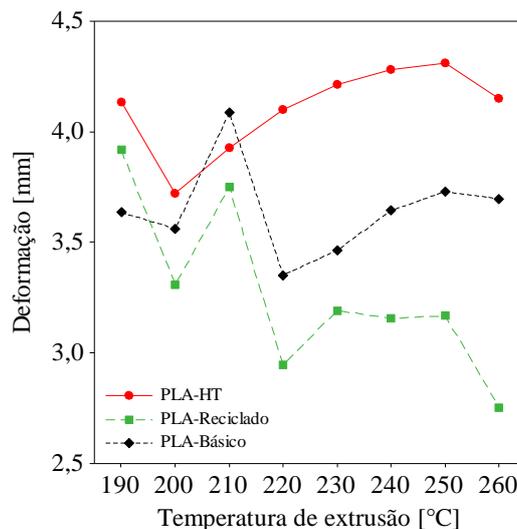


Figura 5. Gráfico do efeito dos fatores de controle na deformação dos corpos de prova após o ensaio de tração.

A Tab. 5 apresenta o Test *Post-Hoc* de Tukey para a deformação dos corpos de prova durante o ensaio de tração até a ruptura. A comparação das médias revelou diferença na deformação com a mudança do material do filamento e a

temperatura de extrusão. Da mesma forma que o realizado para a resistência máxima e tensão de ruptura, a comparação das médias entre as interações revelou comportamento semelhante na faixa de temperatura entre 190 e 210°C.

Tabela 5. Teste *post-hoc* de Tukey para a deformação.

Fator de Controle	Erro Padrão da Diferença	Comparação	Diferença das Médias	Valor-T	Valor-P
Material	0,08075	PLA-HT – PLA-Reciclado	-0,83070	-10,2900	<b>0,0000</b>
		PLA-HT – PLA-Básico	-0,45850	-5,6800	<b>0,0000</b>
		PLA-Reciclado – PLA-Básico	0,37220	4,6100	<b>0,0000</b>
Temperatura	0,1124	190 – 200	-0,36600	-3,2560	<b>0,0323</b>
		190 – 220	-0,42930	-3,8190	<b>0,0056</b>
		190 – 260	-0,36200	-3,2200	<b>0,0358</b>
		200 – 210	0,39067	3,4751	<b>0,0169</b>
		210 – 220	-0,45400	-4,0380	<b>0,0027</b>
		210 – 260	-0,38670	-3,4400	<b>0,0188</b>

A Fig. 6 apresenta o gráfico e as equações da regressão polinomial para a resistência máxima dos materiais dos filamentos de impressão 3D estudados, considerando a variação da temperatura de extrusão. A regressão polinomial de segunda ordem apresentou um ajuste das curvas aos dados mensurados nos ensaios de tração maior que a regressão linear e por essa razão foi adotada para representar o comportamento da resistência máxima. O PLA-Reciclado apresentou o maior ajuste (85,64%), seguido do PLA-HT (72,76%) e PLA-Básico (54,16%). Apesar do menor ajuste da regressão para o PLA-Básico, o gráfico ainda representa a mudança média na resistência máxima com a variação da temperatura de extrusão. Esta observação é sustentada pelo quadro ANOVA e Teste *Post-Hoc* de Tukey das Tab. 2 e Tab. 3, respectivamente. Conforme análise anterior, os materiais partem de valores de resistência máxima aproximados na temperatura de 190°C e tendem a apresentar comportamentos distintos a partir de 210°C. Considerando que o fabricante do PLA-Básico e PLA-HT indica uma temperatura de extrusão entre 190 e 220°C, o material reciclado revelou comportamento mecânico satisfatório nessa faixa de temperatura. Além disso, foi observado que a partir da temperatura de extrusão de 210° a adesão do PLA-Reciclado na mesa de vidro temperado aquecida foi mais favorável ao processo de impressão 3D.

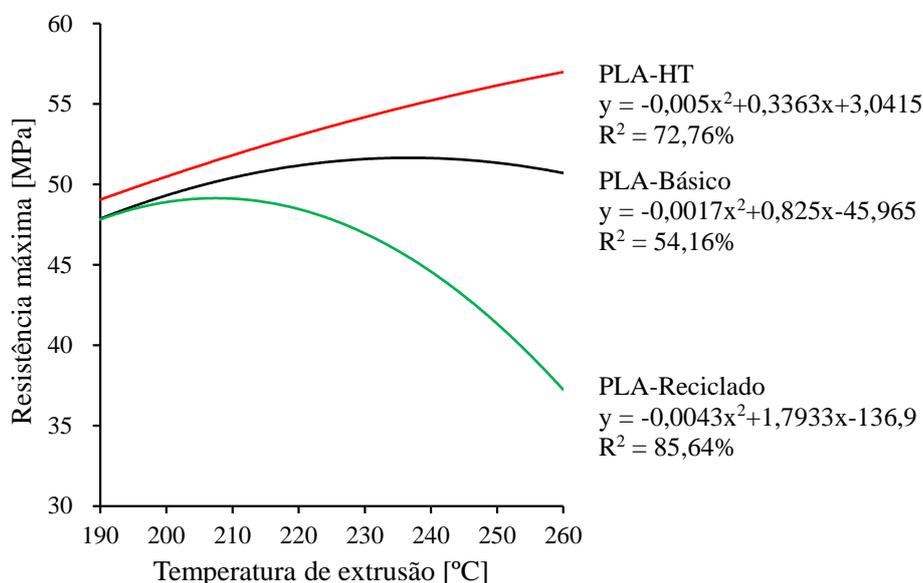


Figura 6. Gráfico e respectivas equações da regressão polinomial para o comportamento da resistência máxima em função da temperatura de extrusão, considerando os termoplásticos avaliados.

#### 4. CONCLUSÕES

Esta pesquisa demonstrou que resíduos de produtos de PLA submetidos a reciclagem mecânica apresentam comportamento mecânico semelhante a filamentos de PLA virgem para impressão 3D na faixa de temperatura de extrusão entre 190 e 210°. A resistência máxima se mantém em torno de 48 a 50 MPa. Além disso, a temperatura ideal para assegurar adesão da peça a mesa de impressão e boa resistência mecânica do PLA-Reciclado é 210°C. Após essa

temperatura, o PLA-HT apresenta aumento da resistência mecânica até 260°C e o PLA-Básico tende a manter uma resistência uniforme. O PLA-Reciclado perde resistência com o aumento da temperatura de extrusão, assim como tensão de ruptura e deformação também diminuem. Considerando a faixa de temperatura de extrusão indicada por fabricantes de filamentos de PLA (190 a 220°C), o material reciclado apresenta viabilidade para aplicações em impressão 3D e representa uma alternativa para o reaproveitamento de resíduos e redução do descarte de plásticos.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas PrintGreen 3D Ltda e 3DX Filamentos Ltda pelos filamentos de PLA, a Topink3D Impressoras e Suprimentos Ltda pela impressora 3D e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pelo fomento à pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

- Baran, E. H. e Erbil, H. Y., 2019. Surface modification of 3D printed PLA objects by fused deposition modeling: a review. *Colloids and interfaces*, v. 3, n. 2, p. 43.
- Correia, C. *et al.*, 2022. Reprocessability of PLA through Chain Extension for Fused Filament Fabrication. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 6, n. 1, p. 26.
- Faludi, J. *et al.*, 2015. Does material choice drive sustainability of 3D printing? *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*.
- Fernandes, C. P. 2019. Use of recycled poly lactic acid (PLA) polymer in 3D printing: a review. *Research Journal of Engineering and Technology*, v. 123, n. 104.34, p. 98.32.
- Jandyal, A. *et al.*, 2022. 3D printing—A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, v. 3, p. 33-42.
- Javaid, M. *et al.*, 2021. Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, v. 4, n. 4, p. 312-322.
- Kai, D. A. *et al.*, 2016. Measure Additive Manufacturing for Sustainable Manufacturing. *In: ISPE TE*. p. 186-195.
- Lanzotti, A. *et al.*, 2019. A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. *Procedia Cirp*, v. 79, p. 143-146.
- Matos, B. D. M. *et al.*, 2019. Evaluation of commercially available polylactic acid (PLA) filaments for 3D printing applications. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, v. 137, n. 2, p. 555-562.
- Rajan, K. *et al.*, 2022. Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1-40.
- Sun, L. *et al.*, 2020. Virgin or recycled? Optimal pricing of 3D printing platform and material suppliers in a closed-loop competitive circular supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 162, p. 105035.
- Thompson, M. S., 2022. Current status and future roles of additives in 3D printing—A perspective. *Journal of Vinyl and Additive Technology*.
- Zhu, C. *et al.*, 2021. Realization of circular economy of 3D printed plastics: A review. *Polymers*, v. 13, n. 5, p. 744.

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

## VIABILITY OF RECYCLED POLYLACTIC ACID FILAMENTS FOR 3D PRINTING APPLICATIONS

**Cleiton Lazaro Fazolo de Assis**

**Kelvin dos Santos Tiene**

**Guilherme Rosati Mecelis**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Votuporanga – Avenida Jerônimo Figueira da Costa, 3014 – Pozzobon, Votuporanga – SP, 15503-110  
fazolocla@ifsp.edu.br; kelvin.tiene@aluno.ifsp.edu.br; guilherme.mecelis@ifsp.edu.br

**Abstract.** *The last few decades have revealed a considerable increase in the consumption of polymeric materials, highlighting the ecological need to reduce the disposal of plastics. Conducting research that enables the use of recycled materials to replace virgin material brings great advantages and can also be made viable for applications in Additive Manufacturing. The use of recycled materials may present differences in mechanical properties when compared to virgin versions. In this sense, evaluating the mechanical behavior of these materials for use in industry is relevant to validate the quality of the recycling technique, as well as favoring the sustainability of its use. This work goals to evaluate the mechanical behavior of Recycled Polylactic Acid (PLA-Recycled) specimens produced by Fused Filament Fabrication (FFF). Tensile tests were applied to evaluate the mechanical strength of the recycled filament compared to commercial virgin PLA filaments in basic condition (PLA-Basic) and high temperature (PLA-HT). The control factors considered in the manufacture of the specimens, were the material of the printing filament and the extrusion temperature (190 to 260°C). Analysis of Variance (ANOVA) and Tukey's Post-Hoc Test were the statistical tools adopted for the analysis of experimental data, considering a reliability of 95%. According to the statistical analysis, the control factors affected the mechanical properties of the specimens. PLA-HT showed an increase in maximum strength with increasing temperature, followed by PLA-Basic while PLA-Recycled showed the greatest decrease in strength. However, for the range from 190 to 210°C, the mechanical behavior of the materials was equivalent. For the quality of adhesion of the parts on the printing bed and fluidity of the recycled material, the temperature from 210 °C presented the best performance for the FFF process. The specification of printing parameters suitable for the recycled material provides good mechanical properties, validating mechanical recycling and use in 3D printing applications, ensuring the quality and safety of the produced parts.*

**Keywords:** *PLA; Recycling; Printing filament; Additive Manufacturing.*

### RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.