

Artigo

Estudo comparativo das propriedades mecânicas de materiais poliméricos aplicados à manufatura aditiva

Mayla Alencar Medeiros ^[1], Ramsés Otto Cunha Lina ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, graduanda do curso de engenharia mecânica; maylalencar@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; Orientador: ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Data da defesa: 15/06/2022;

Resumo: A evolução dos processos de fabricação de produtos só inova com o tempo, passando de um processo totalmente artesanal e arcaico até manufatura aditiva automatizada por impressão 3D. Visando inovações que atendam às necessidades de mercado, é necessário o desenvolvimento de produtos e seus respectivos processos de fabricação, sempre prezando pela eficiência e a viabilidade de produção. O processo de fabricação de manufatura aditiva sendo concretizada pela impressora 3D traz consigo a eficiência e tolerância dimensional dos manufaturados com alto desempenho. Os materiais avaliados foram os filamentos de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), ácido polilático (PLA) e polietileno tereftalato de etileno glicol (PETG) de forma que possa avaliar as aplicações de acordo com a caracterização das propriedades mecânicas desses materiais. De acordo com os ensaios de tração, flexão e análise de densidade, foi observado que o PETG e o PLA possuíam propriedades de tração próximas. Quando se trata de deformação antes do rompimento, o PETG se destaca mais e logo em seguida o ABS.

Palavras-chave: propriedades mecânicas, impressão 3D, PETG, PLA, ABS.

1. INTRODUÇÃO

Com a busca constante da indústria por materiais com um processamento de fabricação mais eficiente [1] e variadas complexidades geométricas é relevante avaliar novos materiais principalmente com o conceito da indústria 4.0 [2] e compreender suas propriedades mecânicas antes da implementação. Nesse contexto, a manufatura aditiva vem como uma opção de processo de fabricação tanto para evitar desperdício de materiais quanto para alcançar geometrias mais complexas com alta tolerância dimensional quando comparado com outros tipos de processos como a usinagem.

O mercado de impressão 3D e seus serviços são avaliados em torno de 2,2 bilhões de dólares por todo o mundo em 2012, aumentando cerca de 29% em relação ao ano anterior, 2011 [3]. A indústria da impressão 3D para produtos em pequena escala reduz o custo de produção e o *lead time* (tempo que um produto demora até chegar ao consumidor), como é o caso de componentes utilizados em aeronaves pela General Electric (GE), na China, que imprimiu reduzindo 30% de custo e 40% do tempo de espera. [4]

No âmbito da impressão 3D, a *Fused Deposition Modelling* (FDM) é uma das técnicas mais usadas, devido à sua facilidade de uso e uma boa relação de custo-benefício [5]. A prototipagem rápida representa uma evolução em processos de protótipos. Nos últimos avanços, é possível criar modelos mais rapidamente e de geometrias ainda mais complexas. Dentre os diferentes tipos de prototipagem rápida, tem-se *Stereolithography* (SLA), *Selective Laser Sintering* (SLS) ou *Laminated Object Manufacturing* (LOM) e a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) é mais difundida para esse processo. Apesar de existir desde os anos 80, é uma das técnicas que possuem maior potencial de produtos manufaturados comparado com os processos convencionais de fabricação de polímeros [6].

Modelagem por Fusão e Deposição é um dos tipos de prototipagem rápida mais usada atualmente que utiliza de um carretel de filamento de material tal como policarbonato, com diâmetros variados e fundidos em um bico aquecido. Esse processo é uma técnica baseada na fusão e extrusão do material que é depositado em uma plataforma, com camadas de duas dimensões, criando a peça 3D [7,8].

Materiais poliméricos são bastante utilizados nesse processo de manufatura aditiva, comumente chamada por impressão 3D. Os mais utilizados são o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e ácido polilático (PLA), já o

polietileno tereftalato de etileno glicol (PETG) é outro que possui uma deficiência de análises de pesquisas e assim sendo importante registrar esses dados comparando com outros trabalhos já publicados [9,10], a fim de obter dados das propriedades mecânicas providas de testes de flexão e tração e só então avaliar a sua necessidade de projeto e a respectiva viabilidade de produção.

O PETG apresenta algumas vantagens em relação ao PLA: na maior parte das respostas avaliadas neste estudo [11], o PETG, variando a disposição dos filamentos, apresentou menor dispersão estatística que o PLA e a flexibilidade apresentada pelo PETG o tornam aplicável, principalmente em impressão 3D, para usos como por exemplo a construção de conexões do tipo *snap-fits* (encaixes flexíveis que conectam peças móveis) quando comparado ao PLA que é mais rígido.

1.1. Impressão 3D e a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

A manufatura aditiva é conhecida como um processo de fabricação baseado em adição de muitas camadas com informações obtidas de uma representação geométrica originada de um sistema CAD (*computer-aided design*). Esse processo é totalmente automatizado, tornando-o relativamente rápido, além de poder alcançar geometrias mais complexas quando comparado com os meios mais tradicionais. Segundo um estudo [7], dentre os materiais mais utilizados na manufatura aditiva pela indústria, o polímero representa 51% das aplicações, e os metais representando os 49%.

Uma vantagem desse processo é a menor exposição do operador durante o processo de fabricação. A maior necessidade do operador é a preparação dos materiais, parâmetros da máquina, retirada e limpeza da peça [1].

1.2. PLA

O ácido polilático (PLA) é um dos mais utilizados nessa técnica de fabricação, sendo um termoplástico, semicristalino ou amorfo, sintetizado a partir do ácido láctico obtido de fontes renováveis, podendo ser extraído do amido de milho e da batata, cana-de-açúcar e raízes de tapioca [13].

Portanto, não sendo tóxico, é utilizado em louças descartáveis, produtos de higiene e até embalagens de alimentos. Deve-se evitar a aplicação deste material a temperaturas acima de 60°C e quando exigido resistência mecânica [12].

Estudo [11] aponta ensaios de tração para este material em torno de $49,34 \pm 1,12$ MPa e ensaios de flexão [14] apresentou que corpos de prova de PLA, quando avaliando os mesmos parâmetros, as tensões de flexões e rigidez foram superiores ao ABS. Outro estudo [10] revela que o PLA apresenta uma resistência à tração de 22,26 MPa utilizando um preenchimento de 100% e orientação da deposição em 45°, e para resistência à flexão apresentou 18,61 MPa.

1.3. ABS

A Acrilonitrila Butadieno Estireno apresenta propriedades mecânicas melhores que o PLA, sendo mais resistente e leve. Além disso, é capaz de suportar temperaturas mais altas e possui certa flexibilidade. A dificuldade ao trabalhar com esse material é a geração de fumaças tóxicas durante o processo de fusão durante a impressão. Por precisar de atingir temperaturas mais altas para a fusão, necessita-se de um aparato dedicado ao processo, como uma mesa de aquecimento e o uso de impressoras fechadas [13].

Algumas propriedades do ABS [15] apresentaram 33,9 MPa (ISO 527) em resistência à tração e 70,5 MPa (ISO 178) para tensão de flexão. Em outra ficha comercial [16] é encontrado em torno de 44,8 MPa (ASTM D638) e para tensão de flexão em torno de 75,8 MPa (ASTM D790). Outro estudo [10] apresenta uma resistência à tração de 30,97 MPa utilizando de um preenchimento de 100% e deposição à 45° do filamento e para resistência à flexão apresentou 15,59 MPa.

1.4. PETG

O Polietileno Tereftalato (PET) é um dos plásticos mais utilizado no mundo, porém não é disseminado na indústria da impressão 3D, porém seu derivado, o polietileno tereftalato modificado com glicol (PETG) é bastante utilizado para esses tipos de impressões [12].

O PETG combina as vantagens do ABS e do PLA, produzindo manufaturados mais resistentes e mais flexíveis. Em um estudo [17] avaliando testes de tração no PETG com uma orientação de 0° conseguiu alcançar os melhores resultados em torno de 44 MPa de resistência à tração. O PETG obteve uma deformação maior em relação ao PLA. Em outro estudo [11], o mesmo material, também orientado a 0°, apresentou comportamento

similar no ensaio de tração. Em outro estudo [18], foi realizado uma análise de 52,70 MPa para tensão de flexão no PETG com 50% de preenchimento. Na Tabela 1, é possível visualizar a comparação entre os estudos.

Tabela 1. Tensões de tração e flexão para o PETG. Adaptado de [11][17][18].

	Tensão de tração (MPa)	Tensão de flexão (MPa)	Preenchimento da impressão
Santana, 2018 [11]	41,10 ± 0,14	-	100%
Hanon, 2019 [17]	44,00 ± 0,25	-	100%
Bolelli 2020 [18]	21,01	52,70	50%

A Tabela 1 mostra alguns estudos [11,17-18] que comparam ensaios de tração alterando os preenchimentos desses durante o processo de impressão, mostrando que as amostras com maior preenchimento, possui uma tensão de tração maior que a peça impressa a 50% do preenchimento.

Podendo ser visualizado na Figura 1, a comparação entre o PLA e o PETG, em ensaios de tração, avaliando a deformação e a tensão máxima.

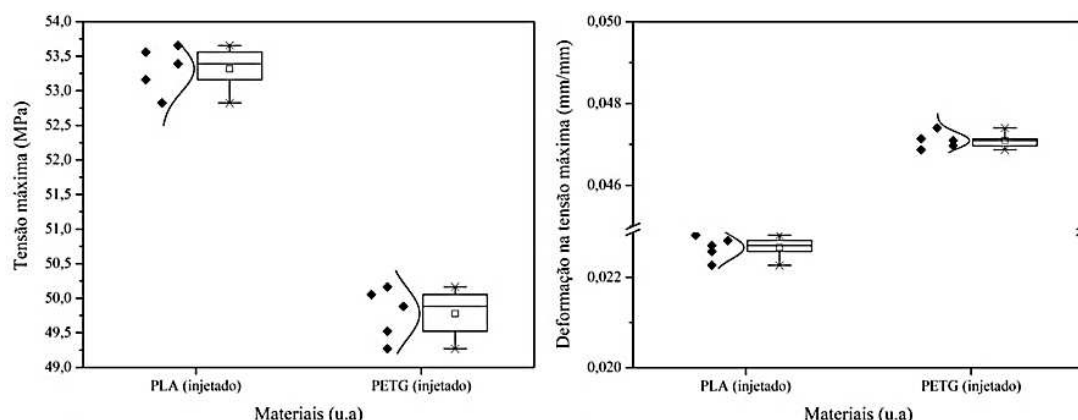


Figura 1. Comparação entre o PETG e PLA Tensão máxima e deformação, respectivamente [11].

Nessa Figura 1, é possível visualizar uma comparação entre o PLA e o PETG quando produtos da manufatura aditiva. Identificando que o PLA possui uma tensão máxima com módulo superior ao PETG. Assim como ao lado pode ser identificado que quando se trata de deformação, o PETG se sobressai quando comparado com o PLA.

1.5. Densidade e resistência dos polímeros

Na Figura 2, é mostrado em vermelho as tensões máximas de tração para polímeros, um deles utilizados em impressão 3D, é mostrado na imagem em azul (ABS) que alcançam entre 10 e 100 MPa. A densidade está representada no eixo das abcissas do gráfico e é possível identificar que a densidade fica em torno de 1 até 3 kg/m³. [19]

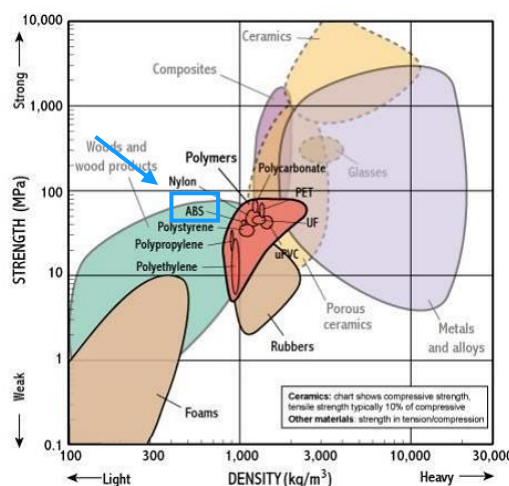


Figura 2. Carta de Ashby avaliando densidade em função da tensão máxima de tração. [19]

1.6. Influência dos parâmetros na impressão 3D

Com o advento da impressão 3D, os manufaturados passam a ser obtidos de uma maneira mais acessível, não sendo necessário estar em um ambiente industrial. Além de poder variar facilmente a geometria em projetos complexos, é possível criar peças únicas, sem precisar de um custo elevado para implantação de moldes específicos, como acontece em processos de fabricação que só é viável quando produzido em massa.

Segundo estudo [20] as amostras testadas no ensaio de tração com orientação a 0° teve melhor desempenho quando comparado aos outros tipos de amostras em outras orientações que foram testadas. A tensão máxima de ruptura para ABS foi observado para uma disposição de filamento em 45° , quando comparado com a disposição em 0° e 90° [21].

Sendo assim, mudar variáveis da impressão 3D possibilita alterar muitos parâmetros na hora da impressão, tais como o preenchimento da peça. Estudo [22] mostra que ensaios de tração mostraram um incremento que pode ser superior a 70% no módulo de tração, quando aumentado o preenchimento das amostras. Isso acontece porque com maior preenchimento, a área de seção transversal é maior, consequentemente, com mais área para distribuir a força, o material consegue resistir à maiores cargas de tração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova utilizados nesse estudo são de PLA, ABS e PETG. Os testes de tração, flexão e determinação da densidade são normatizados pela ASTM D638 – 14 [23], ASTM D790 – 17 [24] e ASTM D792 – 20 [25], respectivamente.

As amostras foram confeccionadas em uma impressora 3D, pela técnica de FDM utilizando do preenchimento em 100% das peças com uma orientação de disposição dos filamentos de 45° . Todas as amostras foram ensaiadas em uma máquina de ensaio universal EMIC modelo DL10000 utilizando uma célula de carga de 100 kN, sendo utilizada em ambos os ensaios, flexão e tração.

Na Figura 3 pode ser visualizada a geometria e as dimensões dos corpos de prova de tração e flexão, todos identificados em milímetros.

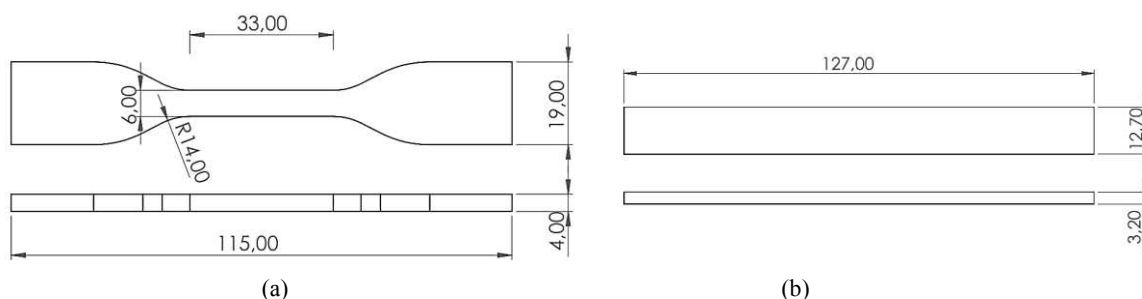


Figura 3. Geometria e dimensões do corpo de prova de (a) tração e (b) flexão, dados em milímetros.

2.1. Ensaio de densidade

O ensaio de densidade foi realizado baseado na norma D792-20 [25] utilizando do método de plásticos sólidos que possuem densidade maior que a água. O ensaio foi realizado imergindo o corpo de prova em um béquer e anotando o volume alterado no momento da imersão completa como mostrada na Figura 4. Com o volume e a massa pesada, é possível calcular a densidade das peças ensaiadas.



Figura 4. Corpo de prova de tração imergido em búle.

2.2. Ensaio de tração

Segundo a norma ASTM D638-14, ela abrange as propriedades de plásticos para realizar os testes de tração padronizando a preparação, geometria, temperatura e velocidade dos ensaios. É recomendado utilizar no mínimo 5 corpos de prova para a validação do ensaio de tração, portanto seis unidades foram fabricadas e o ensaio realizado a uma velocidade de ensaio de 5 mm/min [23]. Na Figura 5, é possível visualizar as amostras impressas antes do ensaio.



Figura 5. Corpos de prova (PLA, ABS e PETG, em ordem da esquerda para a direita) confeccionados para ensaio de tração.

Após o ensaio, a curva adquirida é força *versus* deformação, que é possível obter alguns parâmetros a partir das equações dispostas na norma. O cálculo para encontrar o módulo de elasticidade pode ser encontrado na Equação 1, em que E representa o módulo de elasticidade, $\Delta\sigma$ (MPa) é a diferença de tensão no regime elástico da curva, Δx (mm) é o deslocamento referente aos pontos extraídos da tensão no regime elástico e L o comprimento útil do corpo de prova (mm).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta x/L} \quad (1)$$

A resistência à tração é dada pela Equação 2, que F_{max} representa a força máxima que o corpo de prova suportou antes de romper durante o ensaio, w é a largura da seção mais estreita e T é a espessura do corpo de prova, a multiplicação desses dois últimos calculam a área de seção transversal da amostra.

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{wT} \quad (2)$$

2.3. Ensaio de flexão

Segundo a norma ASTM D790-14, esse método de teste é usado para determinar as propriedades de flexão de plásticos utilizando do método de 3 pontos de apoio, aplicando uma carga numa amostra simplesmente apoiada em dois pontos. O mínimo de amostras a serem ensaiadas são cinco unidades, portanto seis foram fabricadas em função da segurança dos testes. A velocidade de ensaio indicada é de 2 mm/min [24]. Na Figura 6, é possível visualizar as amostras impressas antes do ensaio.



Figura 6. Amostra dos corpos de prova de flexão (PLA, ABS e PETG na ordem da esquerda para a direita).

A tensão de flexão pode ser obtida pela Equação 3, em que P representa a força (N) em dado ponto na curva tensão *versus* deformação, L (mm) é a distância entre os suportes no ensaio, b e d representam a largura (mm) e a espessura (mm) da seção transversal do corpo de prova ensaiado.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3)$$

A deformação de flexão é dada por ϵ_f (mm/mm) e calculada na Equação 4, em que D (mm) representa a deflexão no meio dos suportes e d (mm) é a espessura do corpo de prova.

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (4)$$

2.4. Tratamento estatístico

Os dados obtidos diante dos ensaios de tensão de flexão e tração foram tratados estatisticamente no Software Excel® de acordo com as Equações 5,6 e 7:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma}{n} \quad (5)$$

Sendo, $\bar{\sigma}$ a média aritmética das tensões de flexão (MPa), σ a tensão obtida para cada valor de deslocamento e ensaiada e n o número de corpos de prova que foram submetidos à ensaio.

$$s = \sqrt{(\sum \sigma^2 - n\bar{\sigma}^2)/(n-1)} \quad (6)$$

Onde: s - desvio padrão.

$$s(\%) = s/\bar{\sigma} \quad (7)$$

Onde: s (%) – desvio padrão em porcentagem.

3. RESULTADOS

A partir dos ensaios realizados, algumas discussões considerando a densidade média específica, limites de tração e flexão são aqui validadas e comparadas com referências bibliográficas.

3.1. Densidade Específica

Por se tratar de um trabalho que interage com as propriedades mecânicas dos materiais em questão, a densidade é levada em consideração para avaliação dos módulos de tração e flexão.

Tabela 2. Densidades específicas médias e desvio padrão dos corpos de prova.

	PLA	ABS	PETG
Densidade específica	1,41 g/cm ³	1,09 g/cm ³	1,21 g/cm ³
Desvio padrão	3,2%	8,6%	4,9%

Os corpos de prova de PLA possui uma maior densidade específica quando comparado aos corpos de prova de ABS e PETG. O material que mais apresentou variação foi o ABS com um desvio padrão de 8,6%. Todos esses dados obtidos estão em concordância com o gráfico de Ashby [19], na Figura 2 podendo ser interpretado os dados de densidade dos polímeros, e em específico é citado o ABS.

3.2. Ensaio de tração

Os ensaios de tração que seguiram a norma D638-14 [23] com uma velocidade de 5 mm/min estão representados na Figura 7 a 9, apresentando as curvas de tensão (MPa) versus deformação (mm/mm) para cada tipo material testado e os resultados de tensão máxima e módulo de elasticidade com seus respectivos desvios padrões na Tabela 3.

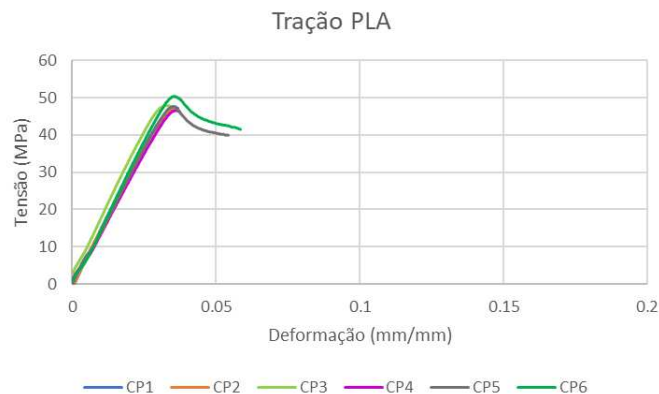


Figura 7. Curva de tensão de tração em função da deformação dos ensaios com PLA.

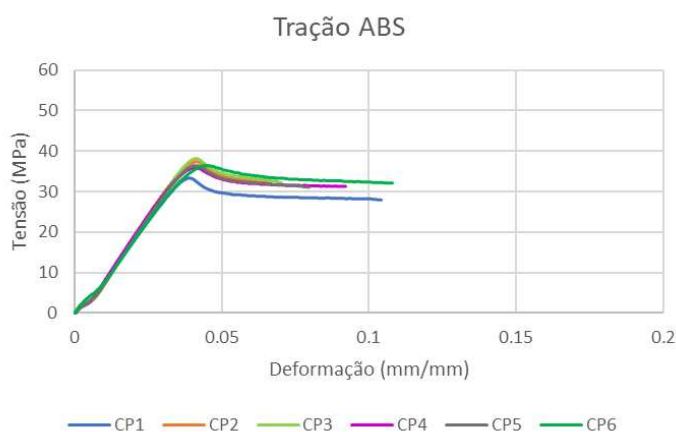


Figura 8. Curva de tensão de tração em função da deformação dos ensaios com ABS.

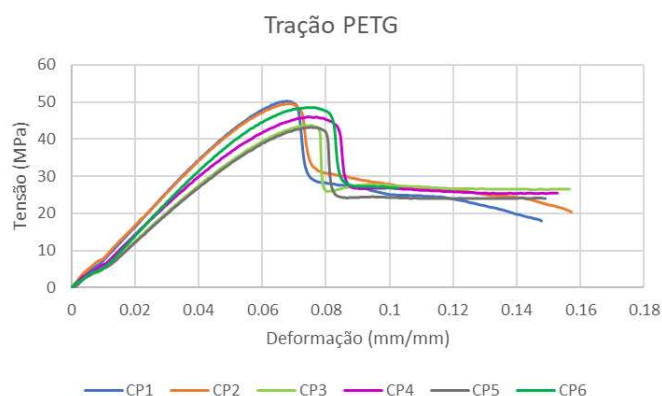


Figura 9. Curva de tensão de tração em função da deformação dos ensaios com PETG.

Tabela 3. Limites de resistência à tração e módulo de elasticidade.

	PLA	ABS	PETG
Tensão Máxima (MPa)	47,87	36,26	46,82
Desvio padrão - Tensão Máxima	1,8%	2,9%	5,5%
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,55	1,10	0,86
Desvio padrão - módulo de elasticidade	3,8%	3,7%	5,4%
Deformação máxima média	5,0%	9,4%	15,3%

Os limites de tração de PLA ficaram próximos do que foi esperado a partir do estudo citado [14] com uma variação de 3% em relação ao ensaiado. Já o ABS, ficou em torno de uma variação de 8% em relação aos estudos [10,15] e o PETG ficou em 9% de variação comparado ao estudo [11,17].

Dentre os três materiais ensaiados, o PETG apresentou maior deformação ficando em torno de 15,3%, ou seja, sendo as amostras que mais deformaram antes de romper os corpos de prova durante o ensaio de tração. A Figura 10 mostra os limites de resistência a tração dos três materiais e o respectivo desvio padrão.



Figura 10. Comparação entre os limites de resistência à tração do PLA, ABS e PETG.

É possível identificar que houve uma maior dispersão dos dados com os corpos de prova do PETG, sendo representado pelo retângulo cinza principal na Figura 10, que apresenta o primeiro e o terceiro quartil o mais distante da mediana, representada pelo x. Quanto ao PLA e ABS, o primeiro e o terceiro quartil ficam mais próximos da mediana, identificando uma menor dispersão dos dados.

3.3. Ensaio de flexão

Os ensaios de tração que seguiram a norma D790 - 17 com uma velocidade de 2 mm/min estão representados na Figura 11 a 13, apresentando as curvas de tensão (MPa) versus deformação (mm/mm) para cada tipo de material testado e os resultados de tensão máxima com o respectivo desvio padrão e a deformação total na Tabela 4.

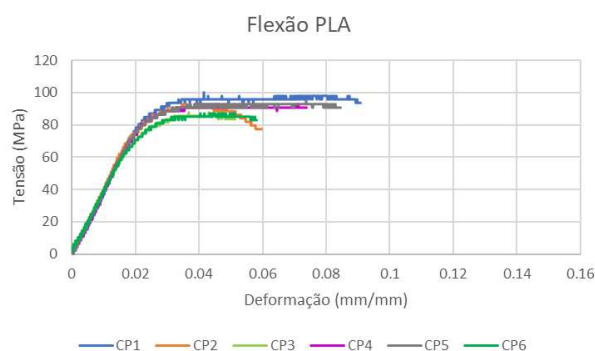


Figura 11. Curva de tensão de flexão em função da deformação dos ensaios com PLA.

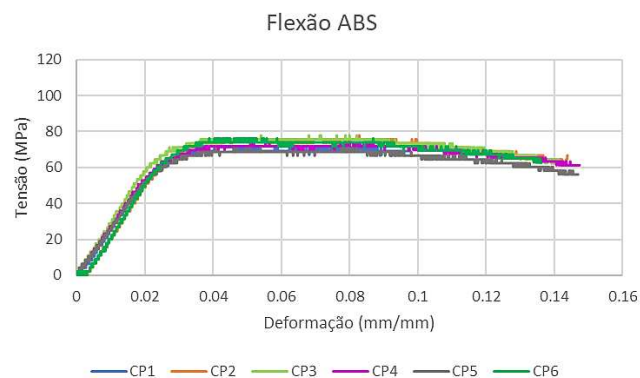


Figura 12. Curva de tensão de flexão em função da deformação dos ensaios com ABS.

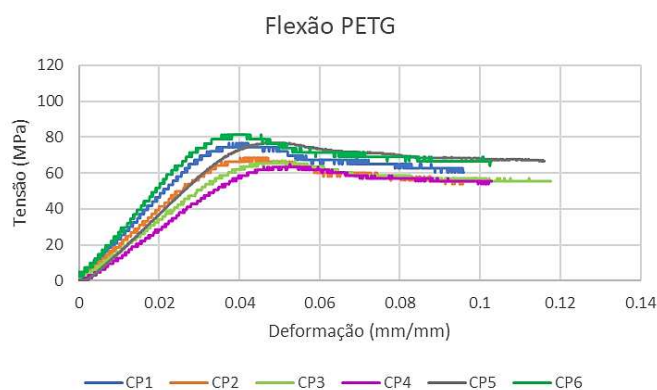


Figura 13. Curva de tensão de flexão em função da deformação dos ensaios com PETG.

Tabela 4. Limites de resistência à flexão.

	PLA	ABS	PETG
Média de tensão de flexão máxima (MPa)	92,675	74,665	72,514
Média do desvio padrão	3,7%	3,6%	7,9%
Média da deformação total	7,4%	13,6%	10,5%

Os limites de flexão do ABS, ficou em torno de uma variação de 1,5% em relação ao estudo [16] e o PETG ficou em 72,5 MPa no ensaiado com um preenchimento da amostra de 100% e 52,7 MPa com um preenchimento de 50% como citado em outro estudo [18].

Dentre os três materiais ensaiados, o ABS apresentou maior deformação ficando em torno de 13,6%, ou seja, sendo as amostras que mais deformaram antes de romper os corpos de prova durante o ensaio de tração. A Figura 14 mostra os limites de resistência a flexão dos três materiais e o respectivo desvio padrão, notando que o PLA apresenta um maior limite de resistência à flexão.

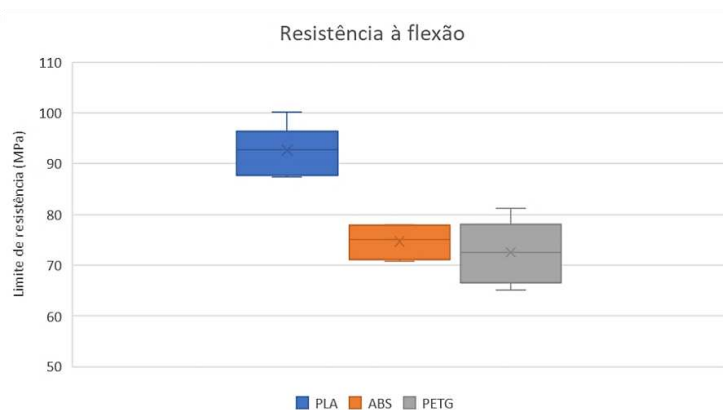


Figura 14. Comparação entre os limites de resistência à flexão do PLA, ABS e PETG.

As resistências à flexão das amostras de ABS e PETG ficaram com valores próximos, pois as dispersões dos dados do ABS estão contidas no do PETG. Já quando se trata da concentração dos dados no primeiro e terceiro quartil, o PLA e o PETG se destacam mais por apresentarem uma maior dispersão dos dados.

Na Figura 15 é possível identificar os tipos de fratura nos três tipos de materiais ensaiados no teste de tração.



Figura 15. Imagem microscópica obtida das fraturas dos corpos de prova de tração ensaiados. São representados os materiais (a) PLA; (b) ABS e (c) PETG.

Os dois primeiros (PLA e PETG) se comportando de forma semelhante como uma fratura com menor deformação e o terceiro (PETG) apresentando uma fratura com maior alongamento, ou seja, apresentando uma maior deformação antes do rompimento do corpo de prova. O que demonstra, nesse último, que a deformação (mm/mm) apresentada na Figura 9 consegue compreender essa maior deformação e decaimento na curva de tensão de tração. Isso acontece pois há o estiramento dos fios da amostra, além da ruptura de alguns fios, com isso reduzindo a seção transversal e diminuindo a tensão de ruptura de tração do corpo de prova ensaiado.

O comportamento dúctil da fratura do PETG pode ser justificado pela região amorfa desse polímero identificado nesse estudo [26], em que foi avaliada a cristalização de materiais utilizados em impressão 3D. À medida que aumentava a cristalinidade do material, a deformação do corpo de prova até ruptura se tornava menor, podendo validar o comportamento das amostras nesse estudo.

Na Figura 16 é possível identificar o comportamento dos corpos de prova após o ensaio de flexão, as linhas vermelhas foram utilizadas como referências horizontais para conseguir visualizar de forma prática a flexão das amostras.

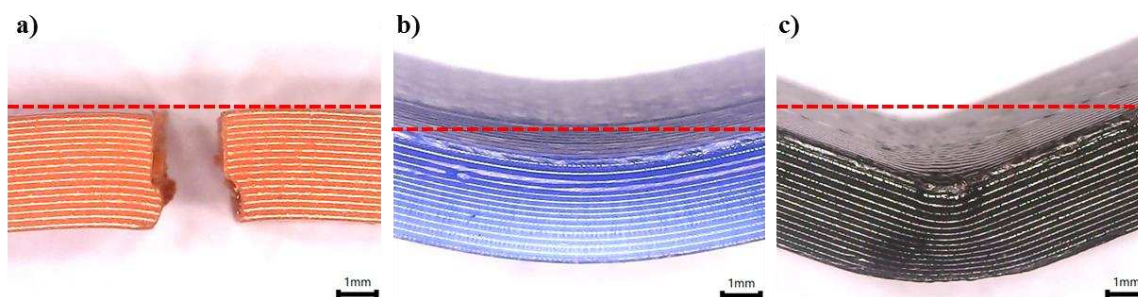


Figura 16. Imagem microscópica obtida dos corpos de prova de flexão ensaiados mostrando o ponto de aplicação de força no ensaio. São os materiais (a) PLA; (b) ABS e (c) PETG.

Pode observar que nas amostras de ABS e PETG não houve a fratura como ocorreu na primeira imagem ilustrando o PLA. Isso pode ser observado nas Figuras 11 a 13, que os dois últimos materiais possuem uma deformação (mm/mm) maior que quando comparado com o PLA, este apresentando fragilidade e rompendo logo após a tensão máxima de flexão.

4. CONCLUSÃO

Uma comparação entre as propriedades mecânicas do PLA, ABS e PETG, os materiais mais utilizados para impressão 3D foi avaliado nesse estudo. Essa avaliação foi feita visando obter os dados de tensão de tração e de flexão assim como as respectivas deformações antes do rompimento. Algumas condições foram identificadas nos ensaios como o PLA é o material que suporta uma maior tensão de tração antes de romper, assim como o PETG é o material que mais se deforma antes do rompimento.

O PLA foi o material que apresentou a maior densidade dentre os analisados e o ABS foi o que apresentou a maior dispersão nos dados coletados. O PLA é o material que possui o maior módulo de elasticidade, portanto baixa ductilidade e maior rigidez do material, bem representado pelo tipo de fratura que foi explicitado.

O material mais indicado para aplicações que requerem maiores tensões de tração seria, estatisticamente falando, o PLA e o PETG, porém o segundo possui uma deformação maior antes do rompimento. É recomendado que a peça seja construída de acordo com o carregamento solicitado no projeto.

5. REFERÊNCIAS

- [1] VOLPATO, Neri, *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*, Editora Blucher, 2017.
- [2] ALMADA-LOBO, Francisco, *The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES)*, *Journal of innovation management*, v, 3, n, 4, p, 16-21, 2015.
- [3] WOHLERS, Terry, *Additive manufacturing and 3D printing state of the industry*, Wohlers Associates, Fort Collins, CO, v, 6, p, 269-375, 2013.
- [4] PENG, Tao, *Analysis of energy utilization in 3D printing processes*, *Procedia Cirp*, v, 40, p, 62-67, 2016.
- [5] WOJTYLA, S., KLAMA, P., BARAN, T., —Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylonl, *Journal of occupational and environmental hygiene*, v.14, n.6, pp, 80-85, Jun, 2017.
- [6] CARNEIRO, Olga S.; SILVA, A, F.; GOMES, Rui, *Fused deposition modeling with polypropylene*, *Materials & Design*, v, 83, p, 768-776, 2015.
- [7] DIZON, John Ryan C, et al, *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*, *Additive Manufacturing*, v, 20, p, 44-67, 2018.
- [8] DUDEK, P, F, D, M, *FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements*, *Archives of metallurgy and materials*, v, 58, n, 4, p, 1415--1418, 2013.
- [9] XVIII MRS MEETING, 2019, Balneário Camboriú, *Comparative study on mechanical properties of Additive Manufacturing polymers and common engineering plastics used in industry*, Balneário Camboriú: Sbpmat, 2019.
- [10] LIMA, Ramsés Otto Cunha et al, *Estudo comparativo das propriedades mecânicas de polímeros usados na manufatura aditiva e plásticos de engenharia comuns usados na indústria*, *Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica*, v, 3, n, 1, p, 35-46, 2021.
- [11] SANTANA, Leonardo et al, *Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica*, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v, 23, 2018.
- [12] BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten, *Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D*, *Gestão, Tecnologia e Inovação: Revista Eletrônica dos Cursos de Engenharia*, Curitiba, v, 1, n, 3, p, 9-18, 2017.
- [13] BRITO, G, F, et al, *Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes*, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, Campina Grande – PB, p, 127-139, set, 2011.
- [14] SHIMANO, Marcos Massao et al, *Influência do percentual de preenchimento no comportamento mecânico de peças em PLA e ABS obtidas por Impressão 3D por extrusão*, *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, v, 3, n, 2, p, 178-190, 2019.
- [15] ULTIMAKER, *Technical data sheet ABS*, Ultimaker, 2017, Disponível em: <http://www.farnell.com/datasheets/2310520.pdf>, Acesso em: 05 out, 2021.
- [16] PLASTICS, Laminated, *Technical data sheet ABS*, Laminated Plastics, 2017, Disponível em: <https://laminatedplastics.com/abs.pdf>, Acesso em: 05 out, 2021.
- [17] HANON, Muammel M.; MARCZIS, Róbert; ZSIDAI, László, *Anisotropy evaluation of different raster directions, spatial orientations, and fill percentage of 3D printed PETG tensile test specimens*, In: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2019, p, 167-173.

- [18] BOLELLI, Raquel Meirelles; LEBRÃO, Guilherme Wolf, Avaliação das propriedades de material produzido por FDM em impressora 3D, 2020.
- [19] ASHBY, Michael F.. Materials selection in mechanical design. 3. ed. Burlington, MA: Pergamon Press, 2005.
- [20] VEGA, V, et al, The effect of layer orientation on the mechanical properties and microstructure of a polymer, Journal of materials engineering and performance, v, 20, n, 6, p, 978-988, 2011.
- [21] DIZON, John Ryan C, et al, Mechanical characterization of 3D-printed polymers, Additive Manufacturing, v, 20, p, 44-67, 2018.
- [22] MEDEIROS, Magno et al. Influência da Densidade de Preenchimento e do Número de Perímetros nas Propriedades Mecânicas de Peças Fabricadas em PLA a Partir de Impressão 3D, CALIBRE-Revista Brasiliense de Engenharia e Física Aplicada, v, 5, p, 33-39, 2020.
- [23] ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [24] ASTM D790-17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [25] ASTM D792-20, Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [26] YANG, Chuncheng et al. Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material. Journal of Materials Processing Technology, v. 248, p. 1-7, 2017.