



Artigo

Estudo das propriedades mecânicas de polímeros aplicados em manufatura aditiva em comparação a polímero de aplicação industrial

Ramsés Otto Cunha Lima ^[1], Samuel de Oliveira Martins ^[2], Kalyude Diógenes de Sousa ^[3] e Mayla Alencar Medeiros ^[4]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA; samuelmartins2802@gmail.com

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA; kalyude_13@hotmail.com

^[4] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA; maylalencar@gmail.com

Recebido: 08/11/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: A aplicação da impressão 3D para manufatura rápida tem a proposta de produzir peças de geometrias complexas de acordo com projetos computacionais, além de ter o benefício de evitar desperdício de material, uma vez que não há necessidade de operações de usinagem nas peças fabricadas. Dessa forma, oferecem muitas vantagens na fabricação de compósitos poliméricos, como alta precisão dimensional, custo competitivo efetivo e geometria customizada. No entanto, devido às propriedades mecânicas relativamente limitadas dos materiais poliméricos aplicados como matéria-prima para essas máquinas, é necessário realizar um estudo comparativo em relação às propriedades mecânicas de outros materiais mais comumente aplicados na indústria a fim de avaliar se, de fato, os materiais impressos podem substituir os polímeros mais usuais. Nesta pesquisa, cinco amostras de cada material, impressas por prototipagem 3D, ou seja, acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e ácido polilático (PLA), foram conduzidas para ensaios mecânicos de tração e flexão, tendo seus resultados comparados com as propriedades mecânicas do Nylon 6, submetido aos mesmos testes. A partir da comparação das propriedades mecânicas analisadas e da densidade específica dos materiais testados, verifica-se que os materiais usados na manufatura aditiva, em determinadas situações, podem substituir os plásticos de engenharia, comumente aplicados.

Palavras-chave: manufatura aditiva; polímeros de engenharia; ensaios mecânicos; propriedades mecânicas.

Abstract: The application of 3D printing for rapid manufacturing has the proposal of producing complex geometry pieces in accordance with computational projects, besides having the benefit of avoiding material waste, since there is no need for machining operations on manufactured pieces. Thus, they offer many advantages in manufacturing with polymer composites, such as high dimensional accuracy, competitive effective cost and customized geometry. However, due to the relatively limited mechanical properties of polymeric materials applied as feedstock for these machines, it is necessary to carry out a comparative study in relation to mechanical properties of other materials more commonly applied in industry in order to evaluate if, in fact, printed materials can replace the more usual polymers. In this research, five samples of each material, printed by 3D prototyping, i.e. acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polylactic acid (PLA), are conducted to mechanical tensile and flexural tests and their results are compared with mechanical properties of Nylon 6, submitted to the same tests. From the comparison of the mechanical properties analyzed, and the specific density of the tested materials, it is verified that the materials applied in additive manufacture, in certain situations, can replace commonly applied engineering plastics.

Key-words: additive manufacturing; engineering polymers; mechanical tests; materials properties.

1. INTRODUÇÃO

A indústria manufatureira, constantemente, busca novos materiais e processos de fabricação a fim de alcançar maior capacidade de produção, tolerâncias mais estreitas, melhor acabamento, associado ao baixo custo. Nesse contexto, a manufatura aditiva ou impressão 3D se popularizou, pois, diferentemente da usinagem, que funciona removendo material da peça para esculpi-la, a manufatura aditiva insere material em dimensões projetadas [1-3]. Recentemente, foram desenvolvidas técnicas de manufatura aditiva mais baratas e rápidas que podem produzir altas qualidades de impressão. Além disso, materiais poliméricos para impressão 3D estão sendo produzidos com uma ampla gama de propriedades [2,3]. Esses avanços mudam continuamente a maneira como os produtos são projetados e fabricados e como são utilizados pelos consumidores [1-4]. Essa tecnologia tem sido utilizada, tanto na área de engenharia, quanto em outras áreas, como arquitetura, construção e até medicina e a odontologia, com a produção de próteses.

As impressoras 3D baseadas em modelagem por fusão e deposição (FDM) são, atualmente, os dispositivos de consumo mais populares para impressão de polímeros e seus compostos baseados em sistemas de manufatura aditiva de extrusão. Entre outras técnicas baseadas em extrusão, a FDM é uma técnica de fusão de material, que usa um carretel de filamento termoplástico como policarbonato (PC), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e ácido polilático (PLA) com diâmetros variados para ser fundido e extrudado através de um bico aquecido [1,5]. O consumo global de sistemas de manufatura aditiva, materiais de impressão, peças ou software relacionados à tecnologia totalizaram mais de US\$ 13 bilhões em 2016. Além disso, os gastos mundiais com impressão 3D devem ter uma taxa de crescimento anual de 22,3% nos próximos anos [1]. Para essas aplicações práticas, as peças impressas devem suportar várias quantidades de tensões mecânicas e ambientais durante o uso.

Materiais poliméricos termoplásticos como ABS e PLA, entre outros, podem ser processados por tecnologia de manufatura aditiva, encontrando aplicações possíveis mesmo em áreas como a indústria aeroespacial, devido às tolerâncias estreitas alcançadas neste processo, para a criação de estruturas leves complexas [6]. No entanto, a maioria dos produtos de polímero impressos em 3D são, ainda, usados como protótipos conceituais ao invés de componentes funcionais, uma vez que produtos de polímero puro construídos por impressão 3D apresentam falta de resistência e funcionalidade se comparados aos plásticos de engenharia comuns [7]. O Nylon 6, por exemplo, é um polímero que pode ser aplicado como peças totalmente funcionais e com suporte à aplicação de carga devido às suas propriedades mecânicas adequadas [8]. Essas desvantagens restringem a ampla aplicação industrial de polímeros impressos em 3D.

Em estudo sobre as propriedades do Nylon 6 [8], foram realizados ensaios de tração utilizando a norma ASTM D638M, com velocidade de ensaio de 5 mm/min, em que valores limites de resistência à tração de 55 MPa e deformação na ruptura de 25% foram obtidos. Em outra pesquisa [9], foram realizados ensaios utilizando os mesmos parâmetros da anterior, alterando-se apenas a velocidade de ensaio para 50 mm/min, com o resultado obtido de 68 MPa de limite de resistência à tração e apenas 2% de deformação na ruptura, além disso a um módulo de elasticidade de 2,7 GPa. Em estudo semelhante [10], os testes foram realizados seguindo os mesmos parâmetros da pesquisa anterior, ou seja, com velocidade de 50 mm/min, obtendo valores semelhantes a 65 MPa de resistência à tração e módulo de elasticidade pouco acima de 2 GPa. Em estudo com testes de flexão de 3 pontos [11], seguindo o padrão ASTM D790, com os apoios a uma distância de 50 mm, um valor limite de resistência à flexão de 94,2 MPa foi encontrado. Em outro estudo [9], ao realizar o mesmo teste alterando a distância dos apoios para 64 mm, foi encontrado o valor de 89 MPa.

Como regra geral, as melhores propriedades mecânicas (principalmente para tração) são obtidas quando os filamentos poliméricos são orientados longitudinalmente e paralelamente à direção de carregamento, e as piores propriedades de tração são obtidas quando as amostras são carregadas ao longo da construção direção devido a uma fraca ligação intercamada [1]. O uso de compósitos poliméricos em manufatura aditiva resolve alguns problemas, combinando a matriz e os reforços para obter um sistema com propriedades estruturais ou funcionais mais úteis, não atingíveis por qualquer um dos constituintes sozinhos [12]. Nos últimos anos, houveram conquistas consideráveis no desenvolvimento de compósitos poliméricos imprimíveis, com incorporação de partículas, fibras ou reforços de nano materiais, com desempenho aprimorado [13]. Porém, por enquanto, essa tecnologia ainda é cara, restringindo seu uso.

Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) é um dos materiais de filamento de impressão 3D mais comuns. Este material é favorecido por suas propriedades reológicas, que tornam as superfícies relativamente lisas no FDM, além disso, o ABS é particularmente variável porque os três monômeros usados em sua produção podem ser

adicionados em diferentes proporções e em diferentes estágios, resultando em misturas e copolímeros rotulados como ABS [14]. É sempre recomendado certificar-se de que qualquer ABS produzido por FDM seja feito em um espaço bem ventilado, pois o material produz gases tóxicos ao ser derretido, produzindo um odor perceptível e causando dores de cabeça rapidamente [14].

Em pesquisa anterior [15] na qual o ensaio de tração do ABS foi realizado utilizando a norma ASTM D638, foram apresentadas as propriedades mecânicas obtidas em diferentes orientações. Com as fibras termoplásticas dispostas de forma diferente, o resultado foi que há maior resistência se houver impressão longitudinal, onde o valor limite da resistência à tração foi de 25,7 MPa e o módulo de elasticidade de 987,8 MPa. Da mesma forma, em outro estudo [16], foram realizados ensaios comprovando que a orientação longitudinal foi a mais resistente com um limite de resistência à tração de 33,5MPa e um módulo de elasticidade de 2 GPa. Na mesma pesquisa citada anteriormente [15], ao testar a flexão utilizando a norma ASTM D790 impressa longitudinalmente, foi obtido o valor limite de resistência à flexão de 38 MPa. Ao fazer uma investigação semelhante [17], ele encontrou um valor limite de resistência à flexão de 51 MPa.

O polilactídeo (PLA) é um polímero bem conhecido em aplicações no campo biomédico. É usado há décadas em dispositivos cirúrgicos, como suturas ou cliques. No campo biomédico, o PLA é altamente aceito por causa de suas boas propriedades mecânicas combinadas com sua biocompatibilidade e sua capacidade de degradar *in vivo* e *in vitro* [18,19]. É um polímero versátil feito de matérias-primas agrícolas renováveis e é totalmente biodegradável além disso, outra característica que torna este polímero interessante é o fato de poder ser processado de forma semelhante às poliolefinas; além disso, o PLA possui boa rigidez e resistência [20].

As propriedades mecânicas dos polímeros à base de ácido lático podem variar bastante, desde plásticos macios e elásticos a materiais rígidos e de alta resistência [21]. O PLA é, à temperatura ambiente, um polímero rígido e frágil, com uma temperatura de transição vítrea de 55 °C e uma temperatura de fusão de 180 °C, dependendo da quantidade de lactídeo L- e D-, usados na composição do monômero original. Os valores típicos das propriedades mecânicas de tal polímero de PLA incluem um módulo de elasticidade de mais de 3.500 MPa e uma resistência à tração de cerca de 40-60 MPa, com apenas 3% de alongamento na ruptura [18-20]. O PLA semicristalino é preferido, em vez de o polímero amorfo, quando propriedades mecânicas superiores são desejadas. O PLA semicristalino tem um módulo de tração aproximado de 3 GPa, resistência à tração de 50 - 70 MPa, módulo de flexão de 5 GPa, resistência à flexão de 100 MPa e um alongamento na ruptura de cerca de 4% [21,22]. Ainda assim, em um desses estudos [20], verificou-se que o PLA puro, obteve valores de resistência à tração e alongamento na ruptura superiores aos compósitos à base deste material testado. O que leva à tendência de que a adição desses elementos fragilize o material.

Apesar dos avanços consideráveis no estudo do processo de fabricação de aditivos, bem como nas propriedades dos materiais aplicados nesta tecnologia, ainda há pouca exploração quanto ao uso destes em ambiente industrial. Plásticos de engenharia, como o Nylon 6, continuam a ser amplamente aplicados devido à sua confiabilidade e propriedades mecânicas homogêneas. Porém, a utilização destes apresenta o inconveniente da necessidade de processos de usinagem, os quais, dependendo da complexidade geométrica do produto, bem como das tolerâncias dimensionais necessárias, podem se apresentar como fatores limitantes para o processo de produção. Assim, esta pesquisa propõe a comparação das propriedades mecânicas do Nylon 6 com o ABS e PLA. O objetivo é estudar a possibilidade de substituição desses materiais em aplicações de engenharia, acelerando assim a produção das peças e garantindo sua funcionalidade. Os resultados confirmam a possibilidade, em determinadas situações, de aplicação desses materiais em substituição ao Nylon 6, o que se torna viável no caso de peças com geometria complexa, baixa densidade e boa resistência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As dimensões das amostras foram baseadas na norma ASTM D638-14 (2014) [23], para ensaios de tração e na norma ASTM D790-16 (2016) [24], para ensaios de flexão. Para amostras de tração, foram utilizadas as dimensões do Tipo IV especificadas na norma [23], essas dimensões são recomendadas para materiais com diferentes valores de rigidez, geralmente usados quando se busca um estudo comparativo. Na norma para testes de flexão [24], as dimensões para termoplásticos são especificadas. As amostras de tração contêm a espessura de 4 mm e as amostras de flexão contêm espessura de 3,2 mm. Amostras de Nylon 6 foram feitas por usinagem convencional e amostras de ABS e PLA foram obtidas por meio de impressão 3D FDM.

Todas as amostras de ABS e PLA foram impressas com porcentagem de material de enchimento de 100%, a fim de atingir a resistência máxima à tração. Além disso, todas as amostras de manufatura aditiva foram impressas com orientação de ângulo de 45°. A escolha desta orientação se deve ao fato de que, por mais que como regra geral, as melhores propriedades mecânicas sejam obtidas quando os filamentos são orientados paralelamente (longitudinal) à direção de carregamento, a variação da orientação permite obter-se diferentes comportamentos mecânicos para diferentes materiais [1]. Desta forma, optou-se por uma orientação a qual considerou-se mediana entre os materiais a serem testados para se obter equilíbrio na influência das propriedades de todas as amostras. A geometria e as dimensões finais (mm) das amostras estão resumidas na Figura 1.

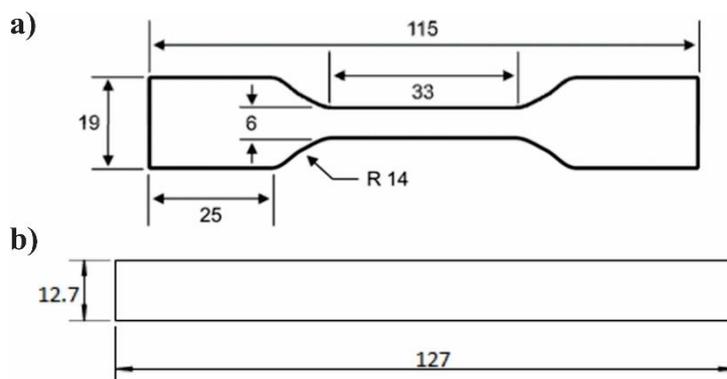


FIGURA 1. Representação esquemática com dimensões (mm) das amostras para (a) tração e (b) ensaios de flexão.

A avaliação da possibilidade de uso de um determinado material em aplicações industriais é importante. Nesse caso, a densidade é uma variável a ser considerada. Os sistemas mecânicos, assim como os elementos estruturais, quando leves, tendem a cumprir sua função de forma mais eficiente, dispensando tensões excessivas que podem encurtar sua vida útil. Para avaliar a densidade específica média dos corpos de prova confeccionados, a massa de cada um foi medida com o auxílio de uma balança de precisão Bioscale, modelo FA2204, com resolução de quatro casas decimais e o resultado dividido pelo seu volume.

Inicialmente, as amostras de flexão e tração foram projetadas no software SolidWorks® e exportadas no formato STL, em seguida, importado para a impressora 3D para fabricação. As amostras para ensaios de tração e flexão são mostradas na Figura 2 e Figura 3, respectivamente.

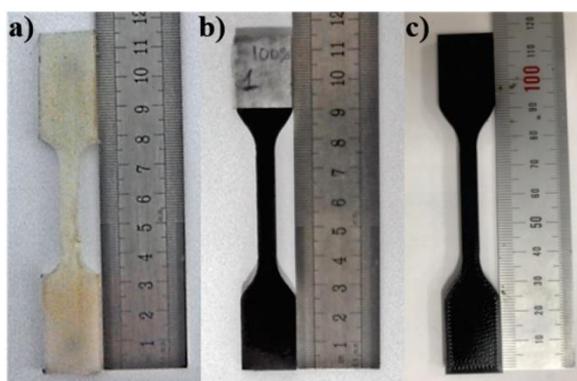


FIGURA 2. Amostras para ensaios de tração: a) Nylon 6; b) ABS e c) PLA.

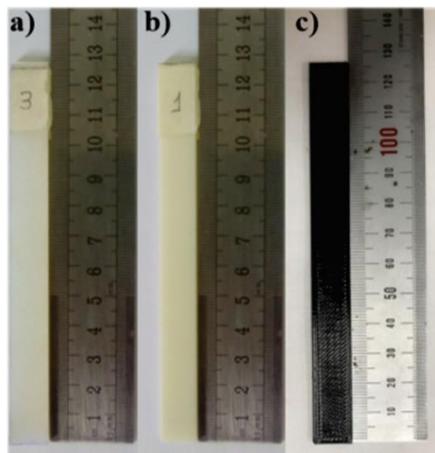


Figura 3. Amostras para ensaios de flexão: a) Nylon 6; b) ABS e c) PLA.

Todos os ensaios foram realizados na máquina de ensaios universal EMIC, modelo DL30000, com célula de carga de 100 kN. Para os ensaios de tração, cinco amostras foram testadas a uma velocidade de teste de 5 mm/min. É necessário garantir que a amostra esteja firmemente presa às garras para que não haja escorregamento e, conseqüentemente, uma leitura incorreta do alongamento. Para flexão, o ensaio de 3 pontos foi realizado em que a carga aumenta no ponto central da amostra. Cinco amostras foram ensaiadas com uma velocidade transversal de 2 mm/min e uma distância entre os suportes de 51,2 mm.

O cálculo do módulo de elasticidade é dado pela Equação (1), onde E é o módulo de elasticidade, σ a variação da tensão no regime elástico, $\Delta\chi$ a deformação proporcional à tensão e L é o comprimento útil da amostra.

$$E = \Delta\sigma / (\Delta\chi/L) \quad (1)$$

O cálculo da resistência à tração é dado pela Equação (2), onde σ_{max} é o limite da resistência à tração, F_{max} é a força máxima aplicada ao corpo de prova e A é a área da seção transversal da amostra. Para encontrar a tensão de ruptura, a mesma equação é aplicada, porém a força utilizada é a força no momento da ruptura.

$$\sigma_{max} = F_{max} / A \quad (2)$$

A tensão de flexão é encontrada na Equação (3), onde σ_f é a tensão de flexão, P é a carga de teste, L é a distância entre os apoios, b é a largura da amostra e d é a espessura da amostra.

$$\sigma_f = (3PL) / (2bd^2) \quad (3)$$

A deformação é calculada pela Equação (4), onde ϵ_f é a deformação de flexão e D o deslocamento do corpo de prova durante o teste. Por meio do gráfico tensão-deformação, encontram-se os valores do módulo de elasticidade em flexão, limite de resistência à flexão e flexão na ruptura.

$$\epsilon_f = (6Dd) / (L^2) \quad (4)$$

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos, bem como a comparação entre as propriedades dos materiais estudados.

3. RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados, comparados e discutidos os resultados da densidade específica, bem como as análises dos ensaios mecânicos dos materiais testados. Além disso, serão analisadas algumas ocorrências relacionadas ao comportamento de fratura das amostras, bem como escorregamento durante alguns ensaios mecânicos.

3.1. Densidade específica

Na Tabela 1 são apresentados os valores de densidade específica das amostras preparadas para serem submetidas aos ensaios mecânicos.

TABELA 1. Valores de densidade específica (g/cm^3) para amostras ensaiadas.

Material / Valores médios (g/cm^3)	Densidade específica (g/cm^3)	Desvio padrão
Nylon 6	1,4593	0,0581
ABS	1,1912	0,0154
PLA	1,4144	0,0183

Em relação às densidades calculadas para os materiais das amostras ensaiadas, observou-se proximidade entre os valores apresentados em pesquisas anteriores, e as densidades amostrais do Nylon 6 [5], ABS [1,5] e PLA [20,21,27]. É importante notar que o desvio padrão observado para as amostras de Nylon 6 foi maior do que para outros materiais. Como as amostras de ABS e PLA foram fabricadas por impressão 3D, elas possuem maior precisão dimensional e geométrica (e, conseqüentemente, de massa) do que as amostras de Nylon 6, que foram fabricadas por usinagem convencional.

3.2. Ensaios mecânicos

O comportamento das amostras de Nylon 6, ABS e PLA, ao longo dos ensaios de tração e flexão, são apresentados na Figura 4, Figura 5 e Figura 6, respectivamente.

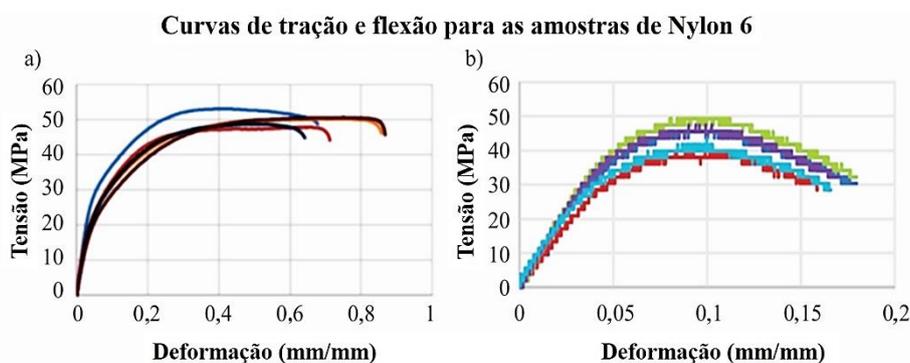


Figura 4. Comportamento de amostras de Nylon 6 para ensaios de a) tração e b) flexão.

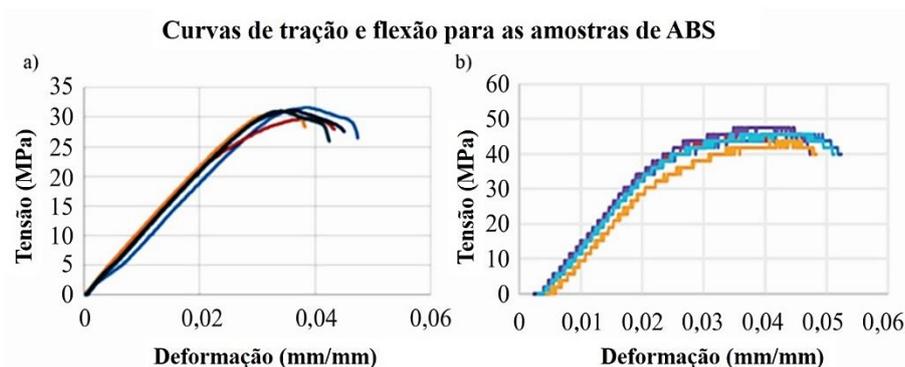


Figura 5. Comportamento de amostras de ABS para ensaios de a) tração e b) flexão.

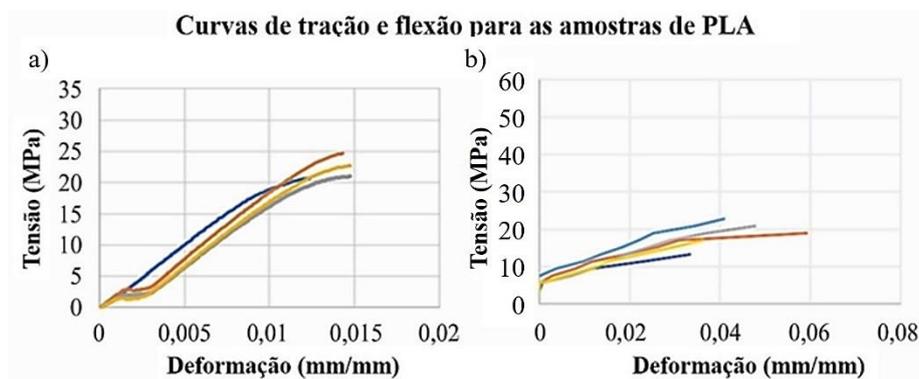


Figura 6. Comportamento de amostras de PLA para ensaios de a) tração e b) flexão.

O regime plástico do Nylon 6 foi iniciado antecipadamente em comparação ao ABS e PLA, esse comportamento conduziu a um módulo de elasticidade inferior, entre os materiais testados, o que está de acordo com estudos anteriores [8]. Isso pode ser devido às características de alta sensibilidade às taxas de deformação desses polímeros. Ao comparar esses estudos, observa-se que as tensões suportadas pelo Nylon 6 são muito próximas às do ABS, porém com alguma dispersão.

As propriedades mecânicas verificadas para os materiais de impressão 3D estão de acordo com estudos anteriores [6,13]. Ao contrário dos corpos de prova de Nylon 6, os corpos de prova de ABS e PLA foram produzidos por injeção, portanto, livres dos erros inerentes aos processos de usinagem. Observa-se um maior valor de resistência à tração do Nylon 6, bem como uma alta capacidade de deformação. Em contraste, o ABS e o PLA atingiram a fratura muito mais rápido. O PLA apresentou um comportamento mais frágil, exigindo menos tensão para falhar e apresentando menos deformação. Os materiais ABS e PLA apresentaram menor dispersão de valores nos ensaios, devido à maior precisão dimensional deste processo de fabricação, sendo milimetricamente idênticos.

Observa-se que os valores de tensões de flexão para o ABS foram próximos aos obtidos para o Nylon 6 e estão de acordo com estudos anteriores [6,8], sendo que o PLA apresentou valores menores. Isso pode ter ocorrido pelos mesmos motivos do ensaio de tração. É notável que existe uma diferença considerável entre os valores de deformação dos materiais. O Nylon 6 e ABS obtiveram valores muito maiores que o PLA, mesmo quando este último atingiu a tensão de ruptura. O PLA apresentou a menor deformação dos três materiais, confirmando sua característica de menor ductilidade (mais frágil). Assim como no ensaio de tração, a dispersão de PLA e ABS foi menor em relação ao Nylon 6, neste último caso porque a célula de carga de 100 kN não tem sensibilidade para avaliar a evolução da força aplicada.

A Tabela 2 confirma o comportamento dos materiais estudados durante os ensaios mecânicos e resume os valores médios das tensões máximas, bem como seus respectivos desvios-padrão. Além disso, são apresentadas as deformações totais dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração e flexão. Os valores calculados do módulo de elasticidade, bem como sua dispersão, também estão presentes.

TABELA 2. Valores-limite para resistência à tração e flexão dos materiais ensaiados.

<i>Valores médios / Material</i>	<i>Nylon 6</i>	<i>ABS</i>	<i>PLA</i>
Módulo de elasticidade (MPa)	774,23	1075,12	1762,07
Desvio padrão	16,8	8,34	6,76
Resistência à tração (MPa)	50,1725	30,9619	22,2613
Desvio padrão	3,99	2,25	1,84
Deformação total	75,17%	4,33%	1,40%
Desvio padrão	0,1046	0,0034	0,0011
Resistência à flexão (MPa)	45,2065	45,5864	18,6144
Desvio padrão	8,08	2,94	3,65
Deformação total	17,09%	4,82%	4,45%
Desvio padrão	0,0091	0,0041	0,0103

A princípio, esperava-se que o módulo de elasticidade do Nylon 6 fosse maior do que o dos demais polímeros (ABS e PLA), conforme demonstrado em estudos anteriores [8,9]. Isso se deve ao fato das características mecânicas do polímeros são altamente sensíveis à taxa de deformação [25]. Porém, com base no comportamento dos materiais durante os ensaios de tração e flexão, o PLA apresentou o maior valor para o módulo de elasticidade. Este não foi tão alto quanto o encontrado em alguns estudos anteriores [18,21,26], no entanto, é consistente em comparação com os outros materiais testados [27]. Os maiores valores observados nas pesquisas, anteriormente citadas, podem estar relacionados à estratégia de impressão, visto que, de maneira geral, amostras com rota de deposição longitudinal em relação ao comprimento apresentam maior resistência mecânica [1] do que para deposição na orientação de ângulo de 45°, como é o caso das amostras da presente pesquisa. Outro fator que provavelmente contribuiu para essa diferença é que muitas das pesquisas recentes não aplicam o polímero puro, mas sim, um compósito a partir dele.

Esse resultado corrobora o comportamento mais frágil desse material, entre os três estudados. O PLA foi o polímero que apresentou menor comportamento dúctil durante os ensaios mecânicos, praticamente, não passando pelo regime plástico. Este atingiu, praticamente, o dobro do valor verificado para o outro material aplicado na manufatura aditiva neste estudo (ABS) que também apresentou conformidade com a literatura [15]. O Nylon 6 e o ABS apresentaram valores de módulo de elasticidade mais próximos entre si, isso se deve à semelhança do comportamento dúctil desses dois materiais ao longo dos ensaios mecânicos, comprovando que ambos possuem rigidez aproximada.

Pode-se verificar que o Nylon 6 ainda é o polímero com maior resistência à tração, embora, junto com isso, este material tenha a maior taxa de deformação. Os valores obtidos para este material estão de acordo e/ou até um pouco superiores aos de pesquisas anteriores [1,5,8]. Dentre os três materiais estudados, o ABS foi o que apresentou valores medianos de resistência à tração, porém com um valor consideravelmente baixo de taxa de deformação, por mais que este polímero apresente comportamento dúctil. Esses dados estão de acordo com pesquisas anteriores [1,5,15,16]. O PLA foi o polímero com os menores valores de resistência à tração, mesmo abaixo dos valores encontrados em pesquisas anteriores [18,20,21,22]. Esse comportamento pode estar associado ao fato de este material ter o comportamento mais frágil entre os três, o que pode, também, ser evidenciado pelo seu baixo índice de deformação.

Com relação aos testes de flexão, o Nylon 6 e o ABS apresentaram valores médios equivalentes de tensão máxima. No entanto, o Nylon 6 apresentou uma taxa de deformação consideravelmente maior, como ocorreu em relação aos ensaios de tração, devido ao seu comportamento muito dúctil. O fato de o ABS apresentar valores de resistência à flexão semelhantes aos observados em pesquisas anteriores [15,17] e semelhantes aos do Nylon 6, porém, com deformação muito menos acentuada pode ser benéfico no sentido de permitir seu uso em aplicações nas quais não se exige tensões muito severas. Isso torna o ABS um forte candidato para substituir o Nylon 6 em algumas aplicações de engenharia. O PLA, novamente, foi o polímero que apresentou menores valores de resistência à flexão, sendo quase metade dos valores obtidos pelos outros dois materiais estudados. Os valores de resistência à tração e flexão tendem a tornar o PLA aplicável apenas em situações de baixa carga, uma vez que não suporta altas tensões. Porém, para estes casos, especificamente, por o PLA ser um material biodegradável, pode revelar-se uma boa opção de escolha, pois, assim, pode-se garantir que este polímero não irá falhar devido às cargas leves aplicadas e, também, garantindo a sustentabilidade do projeto, agredindo o menos possível o meio ambiente.

3.3. Análises de fratura e deslizamento

Além da análise da densidade específica e das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração e flexão, outros fenômenos foram observados ao longo do procedimento experimental. Estes se referem a algumas análises das condições de fratura e deslizamento das amostras testadas, que são relatadas e discutidas neste tópico.

A ruptura dos corpos de prova testados ocorreu na seção útil para todas as amostras testadas. Das cinco amostras de PLA preparadas para ensaio de tração, uma delas não pode ser testada pelo fato de que, devido ao seu comportamento frágil, ter quebrado durante a fixação nas pinças da máquina de ensaios. A Figura 7 apresenta as amostras de PLA testadas para resistência à tração.



Figura 7. Comportamento à fratura de amostras de PLA para ensaio de tração.

Na maioria dos casos, a fratura de um componente termoplástico é dúctil devido à reorientação e alongamento das macromoléculas semelhantes a fios que permitem alta deformação no material [28,29]. Este comportamento esperado foi observado para a maior parte das amostras de Nylon 6 e ABS (Figura 4 e Figura 5). Porém, no caso das amostras de PLA, devido à característica mais frágil desse material [29], as amostras testadas praticamente não sofreram a fase plástica, conforme já indicado na Figura 6.

Além disso, foi observado durante o ensaio de flexão que a carga não desceu de forma linear. Houve uma certa inclinação que, aliada à baixa velocidade do ensaio, ocasionou pequenos escorregamentos nos corpos de prova (Figura 8). Outra razão provável para isso é porque a superfície lisa das amostras resultou no seu escorregando, tanto em relação à garra como do suporte da amostra. Esse fenômeno já havia sido observado em pesquisas anteriores [30].

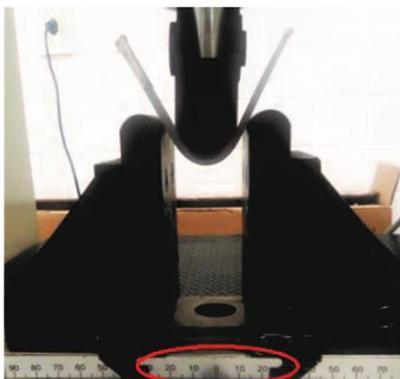


Figura 8. Distância entre os suportes da amostra durante os ensaios de flexão.

A distância entre os suportes de amostra é de 51,2mm, aproximando-se da largura do aplicador de carga. Para evitar a colisão com os apoios devido a esta inclinação, foi necessário movimentar os apoios para a esquerda, variando entre 29,2 mm à esquerda da origem e 22mm à direita da origem. O efeito desses deslizamentos pode ser observado nas curvas de flexão das Figuras 4, Figura 5 e Figura 6, bem como o valor do desvio padrão para os valores de resistência à flexão, apresentados na Tabela 2, que foram maiores que os observados para a resistência à tração.

A partir dos resultados apresentados, bem como da sua análise a partir da comparação com estudos semelhantes, serão apresentadas as considerações finais que encerram esta pesquisa.

4. CONCLUSÃO

Uma comparação entre as propriedades mecânicas do Nylon 6, um polímero de engenharia comumente aplicado na indústria, e do ABS e PLA, polímeros mais aplicados em processos de manufatura aditiva, foi investigada neste estudo. Esta comparação teve como objetivo avaliar a possibilidade de utilização de peças fabricadas por impressão 3D (com seus materiais característicos) em aplicações industriais, em substituição aos

polímeros normalmente selecionados. Assim, vantagens como alta precisão dimensional e menor disposição de resíduos podem ser obtidas. As seguintes conclusões podem ser tiradas com base nas descobertas deste estudo:

- Nylon 6 é o material com maior densidade entre os três testados, incluindo a maior dispersão de valores. Os outros dois materiais (ABS e PLA) possuem densidades semelhantes, com menor dispersão.
- PLA é o material com maior módulo de elasticidade (rigidez) devido à sua baixa ductilidade. Seguindo a ordem decrescente de rigidez, seguem o ABS e, por último, o Nylon 6.
- O Nylon 6 apresentou maiores valores de resistência à tração, com maiores deformações, seguido do ABS e PLA, apresentando menor dispersão.
- Para flexão, o Nylon 6 e o ABS suportaram tensões semelhantes, mas com deformações maiores para o primeiro. O PLA apresentou um comportamento frágil, mas com tensões menores.
- A aplicação do ABS em substituição ao Nylon 6 torna-se possível no caso de peças com geometria complexa e baixos carregamentos, devido à sua baixa densidade e boa resistência.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seu agradecimento ao Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) pelo apoio nos ensaios mecânicos dos materiais estudados.

REFERÊNCIAS

- [1] Dizon, John Ryan C.; Espera, Alejandro H.; Chen, Qiyi; Advincula, Rigoberto C.. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*. 2018. [s.l.], Elsevier BV. v. 20, p. 44-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.
- [2] Berman, Barry. 3-D printing: the new industrial revolution: The new industrial revolution. *Business Horizons*. 2012. [s.l.], Elsevier BV. v. 55, n. 2, p. 155-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
- [3] Gao, Wei; Zhang, Yunbo; Ramanujan, Devarajan; Ramani, Karthik; Chen, Yong; Williams, Christopher B.; Wang, Charlie C.L.; Shin, Yung C.; Zhang, Song; Zavattieri, Pablo D.. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 2015. [s.l.], Elsevier BV. v. 69, p. 65-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- [4] Leon, Al C. de; Chen, Qiyi; Palaganas, Napolabel B.; Palaganas, Jerome O.; Manapat, Jill; Advincula, Rigoberto C.. High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications. *Reactive And Functional Polymers*. 2016. [s.l.], Elsevier BV. v. 103, p. 141-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.04.010>.
- [5] Tanikella, Nagendra G.; Wittbrodt, Ben; Pearce, Joshua M.. Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. *Additive Manufacturing*. 2017. [s.l.], Elsevier BV. v. 15, p. 40-47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.005>.
- [6] Tymrak, B.M.; Kreiger, M.; Pearce, J.M.. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*. 2014. [s.l.], Elsevier BV. v. 58, p. 242-246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>.
- [7] Martinez, Andressa Carmo Pena; Souza, Douglas Lopes de; Santos, Denise Mônico dos; Pedroti, Leonardo Gonçalves; Carlo, Joyce Correna; Martins, Marianna Auxiliadora Dias. Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. *Gestão & Tecnologia de Projetos*. 2019. [s.l.], Universidade de Sao Paulo, USP Academic Information Management Agency (AGUIA). v. 14, n. 1, p. 125-141, 6. Brazilian. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148289>.
- [8] Valera, T.S. et al. Propriedades do Compósito Poliamida-6/Vidro em pó. In: Anais of 14 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. São Pedro – SP. 2000. 49401-49411. Brazilian.
- [9] Hamid, Farizah; Akhbar, Suffiyana; Halim, K.H. Ku. Mechanical and Thermal Properties of Polyamide 6/HDPE-g- MAH/High Density Polyethylene. *Procedia Engineering*. 2013. [s.l.], Elsevier BV.; v. 68, p. 418-424. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.201>.
- [10] Leite, Amanda Melissa Damiano; Araujo, Edcleide Maria; Paz, Rene Anisio da; Pereira, Osanildo Damiano; Lira, Hélio Lucena; Ito, Edson Noriyuki. Structure and mechanical properties of polyamide 6 Brazilian clay nanocomposites. *Materials Research*. 2009. [s.l.], FapUNIFESP (SciELO). v. 12, n. 2, p. 165-168. <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392009000200009>.

- [11] Chow, W. S.; Ishak, Z. A. Mohd. Mechanical, morphological and rheological properties of polyamide 6 Organo-montmorillonite nanocomposites. *Express Polymer Letters* 2007. [s.l.], Department of Polymer Engineering, Scientific Society of Mechanical Engineering.; v. 1, n. 2, p. 77-83. Brazilian. <http://dx.doi.org/10.3144/expresspolymlett.2007.14>.
- [12] Malhotra, S.K.; Goda, K; Sreekala, M.S.. *Part One Introduction to Polymer Composites*. In: Polymer Composites. 1st ed.1. Wiley-VCH. 2012.
- [13] Wang, Xin; Jiang, Man; Zhou, Zuowan; Gou, Jihua; Hui, David. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. : A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. 2017. [s.l.], Elsevier BV. v. 110, p. 442-458. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
- [14] Bates-Green, K., Howie, T. *Materials for 3D Printing by Fused Deposition*. Edmonds Community College. 2017. 21p
- [15] Zieman, C.; Sharma, M.; Zieman, S. *Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling*, IntechOpen, USA. 2012.159-180.
- [16] Cantrell, Jason T.; Rohde, Sean; Damiani, David; Gurnani, Rishi; Disandro, Luke; Anton, Josh; Young, Andie; Jerez, Alex; Steinbach, Douglas; Kroese, Calvin. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2017. [s.l.], Emerald. v. 23, n. 4, p. 811-824. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-03-2016-0042>.
- [17] Divyathej, M V; Varun, M; Rajeev, P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. Volume 7. Issue 3. 116-124.
- [18] Jacobsen, S.; Fritz, H. G.; Degée, PH.; Dubois, PH.; Jérôme, R.. Polylactide (PLA)-a new way of production. *Polymer Engineering & Science*. 1999. [s.l.], Wiley. v. 39, n. 7. p. 1311-1319. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.11518>.
- [19] Bergström, Jörgen S.; Hayman, Danika. An Overview of Mechanical Properties and Material Modeling of Polylactide (PLA) for Medical Applications. *Annals Of Biomedical Engineering*. 2015. [s.l.], Springer Science and Business Media LLC. v. 44, n. 2, p. 330-340. <http://dx.doi.org/10.1007/s10439-015-1455-8>.
- [20] Mathew, Aji P.; Oksman, Kristiina; Sain, Mohini. Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). *Journal Of Applied Polymer Science*. 2005. [s.l.], Wiley. v. 97, n. 5, p. 2014-2025. <http://dx.doi.org/10.1002/app.21779>.
- [21] Farah, Shady; Anderson, Daniel G.; Langer, Robert. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2016. [s.l.], Elsevier BV. v. 107, p. 367-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.
- [22] Södergård, Anders; Stolt, Mikael. Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition. *Progress In Polymer Science*. 2002. [s.l.], Elsevier BV. v. 27, n. 6, p. 1123-1163. [http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700\(02\)00012-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700(02)00012-6).
- [23] ASTM D638-14, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [24] ASTM D790-16, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2016
- [25] Callister Jr., William D. *Ciência e Engenharia dos Materiais - Uma Introdução*. (ed.) LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro. 2002. Brazilian.
- [26] Chacón, J.M.; Caminero, M.A.; García-Plaza, E.; Nñez, P.J.. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*. 2017. [s.l.], Elsevier BV. v. 124, p. 143-157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.
- [27] Lanzotti, Antonio; Grasso, Marzio; Staiano, Gabriele; Martorelli, Massimo. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*. 2015. [s.l.], Emerald. v. 21, n. 5, p. 604-617. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-09-2014-0135>.
- [28] Banjanin, Bojan; Vlastic, Gojko; Pál, Magdolna; Balos, Sebastian; Dramicanin, Miroslav; Rackov, Milan; Knezevic, Ivan. Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology. *Matéria* (Rio de Janeiro). 2018. [s.l.], FapUNIFESP (SciELO). v. 23, n. 4, p. 1-15. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0584>.

- [29] Perez, Angel R. Torrado; Roberson, David A.; Wicker, Ryan B.. Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. *Journal Of Failure Analysis And Prevention* 2014. [s.l.], Springer Science and Business Media LLC. v. 14, n. 3, p. 343-353. <http://dx.doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>.
- [30] Ibrahim, Yehia; Melenka, Garrett W.; Kempers, Roger. Fabrication and tensile testing of 3D printed continuous wire polymer composites. *Rapid Prototyping Journal*. 2018. [s.l.], Emerald. v. 24, n. 7, p. 1131-1141. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-11-2017-0222>.