

INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE CAMADA DE IMPRESSÃO 3D NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS FABRICADAS COM O COPOLÍMERO ABS

Dielyson Martins Galina¹, Davi Pereira Garcia¹, Rômulo Maziero², Antonio Carlos Barbosa Zancanella¹, Bruno Dorneles de Castro^{2*}, Juan Carlos Campos Rubio²

1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES, Rodovia BR Norte, Km 58, R. São Mateus, 101 – Litorâneo – ES, 29932–540, Brasil. E-mail: dielysongalina@hotmail.com, davi.garcia@ifes.edu.br, antonio.zancanella@ifes.edu.br

2) Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte – MG, 31270–901, Brasil. E-mail: maziero.ifes@gmail.com, brunodorn_92@hotmail.com*

Recibido: Marzo de 2018; Aceptado:

RESUMO

Os materiais poliméricos estão sendo cada vez mais utilizados, proporcionando a confecção de peças e objetos de geometrias complexas por meio da manufatura aditiva. Para que essas peças sejam aplicadas na engenharia, as propriedades mecânicas dos materiais utilizados devem ser testadas e conhecidas. O trabalho analisou a variação das propriedades mecânicas em tração e flexão, modificando as espessuras do filamento de cada camada no processo de impressão tridimensional do copolímero acrilonitrila–butadieno–estireno (ABS). Utilizou-se quatro espessuras diferentes (0,25; 0,30; 0,35 e 0,40 mm) tanto para ensaios de tração quanto para ensaios de flexão. Os resultados obtidos indicam que o comportamento das propriedades analisadas não cresce ou decresce linearmente com o aumento ou diminuição gradual da resolução. Os maiores resultados para resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência à flexão do material foram obtidos com amostras de resolução intermediária 0,25 mm. Já os menores resultados para resistência à tração e flexão foram obtidos com amostras impressas em 0,35 mm de espessura de camada. O menor módulo de elasticidade foi exibido pelas amostras com 0,30 mm de resolução.

Palavras-chave: Comportamento mecânico, polímero, manufatura aditiva, resolução de impressão.

ABSTRACT

Polymeric materials are being increasingly used, providing the manufacture of parts and objects of complex geometries through the additive manufacturing. To be applied in engineering, their mechanical properties must be tested and known. The work analyzes the variation of mechanical properties by modifying the thickness of the filament of each layer in the three-dimensional process of the acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) copolymer. Four different thicknesses (0.25, 0.30, 0.35 and 0.40 mm) were used for both tensile and flexural tests. The results indicate that the behavior of the analyzed properties does not increase or decrease linearly with the gradual increase or decrease of the resolution. Higher results for tensile strength, modulus of elasticity and flexural strength were obtained with samples materials of intermediate resolution 0.25 mm. On the other hand, smaller results for tensile strength and flexural were obtained with samples printed at 0.35 mm layer thickness. The smaller modulus of elasticity exhibited was from 0.30 mm resolution samples.

Keywords: Mechanical behavior, Polymer, Additive manufacture, Print resolution.

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia, cada vez mais é exigido que os materiais proporcionem propriedades específicas para atender condições adversas do dia a dia. Por apresentarem diversificadas características, os polímeros estão entre os materiais mais utilizados no cotidiano das pessoas e em praticamente todas as áreas do mercado [1].

Com o crescimento da população e do desenvolvimento tecnológico, houve aumento da

produção global de plástico em 500% ao longo dos últimos 30 anos e é esperado que continue a crescer para 850 milhões de toneladas por ano até 2050 [2].

Atualmente, os materiais poliméricos ganham espaço sobre os metais nos mais diversos segmentos, como peças de sanitários, projetos de engenharia, eletroeletrônicos, material de construção e embalagens para cosméticos e alimentos, entre outros, podendo ser produzidos em formas complexas por meio da manufatura aditiva (MA) [3].

O recente desenvolvimento de impressoras 3D tem tornado tecnicamente viável a produção de objetos de alto valor que são fabricados principalmente a partir de polímeros, por possuírem temperatura de fusão suficientemente baixa para serem usados na extrusão e, ao mesmo tempo, suficientemente alta para que seja possível realizar impressões e manter a forma em temperaturas médias de uso. Para que as peças impressas sejam úteis em aplicações na área da engenharia, a qual exige boa resistência à corrosão e baixa densidade, as propriedades mecânicas das peças impressas em polímero devem ser bem conhecidas [4].

Segundo *Koten* [5], as impressoras 3D podem empregar uma variedade de materiais e criar objetos tão variados como tênis, bicos de combustível para aviões e, em última análise, até mesmo órgãos humanos. Uma única impressora desse tipo, ao invés de ser programada para executar uma única função, pode ser personalizada para fabricar ilimitados objetos. Como essa tecnologia é inteiramente controlada por computadores, seguindo as precisas instruções digitais, a primeira peça confeccionada tende a ser tão boa quanto a última. O custo adicional de se produzir um objeto, torna-se função apenas do tempo e dos materiais que serão utilizados.

O baixo custo das impressoras 3D, juntamente com a capacidade de imprimir geometrias complexas de produtos com alto valor capital, fez com que se tornassem economicamente atraentes para a família de classe média dos USA [6]. Observadores da tecnologia e dos meios de comunicação especulam que a manufatura aditiva terá um impacto econômico profundo sobre o setor manufatureiro e, de fato, na sociedade em geral [5, 7].

A impressora 3D utilizada para confecção dos corpos de prova para ensaios mecânicos possui vários parâmetros, que podem ser alterados para diferentes tipos de impressão de acordo com a necessidade do usuário, como por exemplo melhor acabamento ou maior rendimento de produção no processo. A espessura de camada ou resolução de impressão, é equivalente à dimensão que o filamento possui quando depositada para formar as camadas e, esta foi escolhida como o parâmetro variável neste estudo. A resolução de camada com menor dimensão, consegue proporcionar melhor acabamento superficial da peça construída e, em contrapartida, uma resolução de camada maior,

reduz o tempo de impressão, pois são necessárias menos camadas para constituir a mesma peça do que com espessura de camada menor.

Neste trabalho, foram analisadas as propriedades mecânicas em tração e flexão do copolímero ABS. Dentre quais a tensão de tração, o módulo de elasticidade, o alongamento na ruptura, a tensão de flexão, o módulo de flexão e a deflexão máxima. Para quantificar essas propriedades, todos os ensaios foram realizados em corpos de prova confeccionados a partir de um processo de fabricação fundamentado na MA por meio de impressão 3D.

A utilização do ABS vem crescendo muito nos últimos tempos e, por este motivo, torna-se importante o estudo das propriedades mecânicas desse polímero, permitindo dessa forma a aplicação de forma otimizada em projetos de engenharia.

MATERIAIS E MÉTODOS

A matéria-prima utilizada para confecção dos corpos de prova foi o copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), fornecido em forma de bobinas de filamentos da marca UP3D que é a mesma da impressora. Essas bobinas geralmente podem ser utilizadas a uma temperatura de impressão na faixa de 220 a 250°C, com o diâmetro do filamento de 1,75 mm podendo ter uma variação de $\pm 0,03$ mm. Cada rolo de filamentos é fornecido embalado à vácuo e possui uma massa de um quilograma.

A Tabela 1 apresenta propriedades físicas, químicas e mecânicas do copolímero ABS fornecidas pela fabricante UP3D.

Tabela 1. Características do ABS Premium utilizado na impressão.

<i>Parâmetros do material</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Densidade (21,5°C)	1,05	g/cm ³
Índice de fluidez (220°C/5,0 kg)	1,8	g/10 min
Temperatura de distorção de calor	95	°C
Alongamento sob tração	25	%
Resistência à tração	4,41	MPa
Resistência à flexão	7,55	MPa
Módulo de flexão	2,45	GPa
Resistência ao impacto	18	kJ/m ²
Diâmetro	1,70 – 1,78	mm

Fonte: UP3D (2017).

Na Tabela 2 é apresentado alguns dados das características de impressão para o ABS Premium da UP3D.

Tabela 2. Características de impressão para o ABS Premium.

<i>Parâmetros de impressão 3D</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Temperatura do bico	210 – 250	°C
Temperatura ideal de impressão	235	°C
Temperatura da plataforma de impressão	80 – 110	°C
Velocidade de impressão	30 – 90	mm/s

Fonte: UP3D (2017).

Utilizou-se as normas ASTM D 638–03 [8] e ASTM D 790–02 [9] para ensaios de tração e flexão, respectivamente, e foram confeccionados oito amostras de cada, com as resoluções de 0,25; 0,30; 0,35 e 0,40 mm, totalizando 32 corpos de prova para ensaio de tração e a mesma quantidade para flexão.

Os ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 10.000 com capacidade máxima de 100 kN, que utiliza *software Tesc Versão 3.5*, do *Laboratório de Ensaios Destrutivos do IFES (campus Vitória)*. Realizou-se no total oito ensaios de tração e oito de flexão para cada resolução de impressão analisada.

A Figura 1 apresenta os ensaios de tração (a) e flexão (b) realizados.

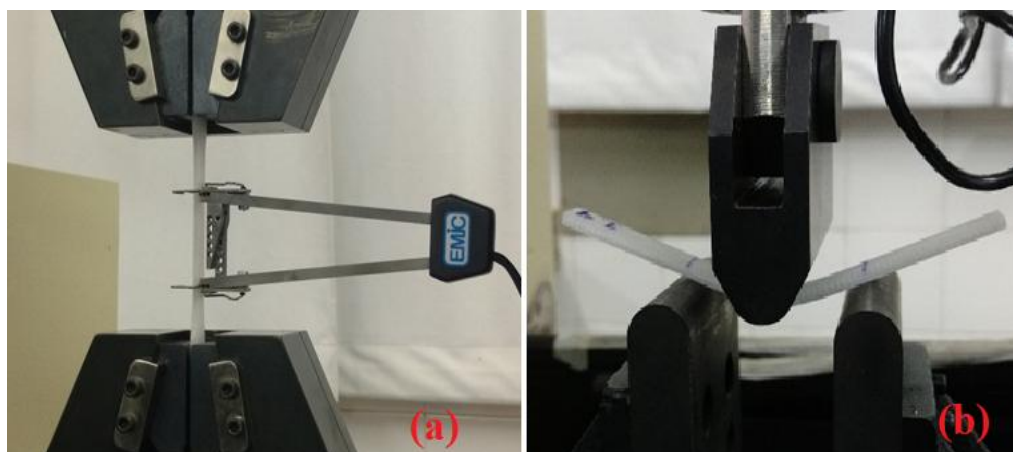


Figura 1. Ensaios mecânicos.

Para o ensaio de tração utilizou-se uma célula de carga de 1.000 kgf, garras para fixação do corpo de prova e extensômetro de 50 mm que possui capacidade de medição de 25 mm. Foi utilizada uma velocidade de 5 mm/min e, para o ensaio de flexão foi utilizada célula de carga de 200 kgf, com taxa de deformação calculada a partir da norma equivalendo a 1,36 mm/min. O corpo de prova sofreu uma deflexão até 5% (0,05 mm/mm) de deformação máxima alcançada, conforme especificado em norma.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta a relação entre a quantidade de camadas e a resolução de impressão de cada corpo de prova. Realizou-se uma análise para garantir que a espessura do corpo de prova desenhado fosse um múltiplo inteiro da respectiva espessura de camada e que o mesmo não extrapolasse os limites de tolerância normatizado.

Tabela 3. Relação entre resolução de impressão, espessura e número de camadas impressas.

<i>Resolução mm</i>	<i>Espessura mm</i>	<i>Número de camadas</i>
0,25	3,0	12
0,30	3,0	10
0,35	2,8	8
0,40	3,2	8

Ensaio de tração. A Figura 2 mostra o comportamento em tração das quatro resoluções ensaiadas. Observa-se que a resolução 0,25 mm apresentou maior limite de resistência mecânica do que as demais amostras, devido a provável quantidade de camadas depositadas.

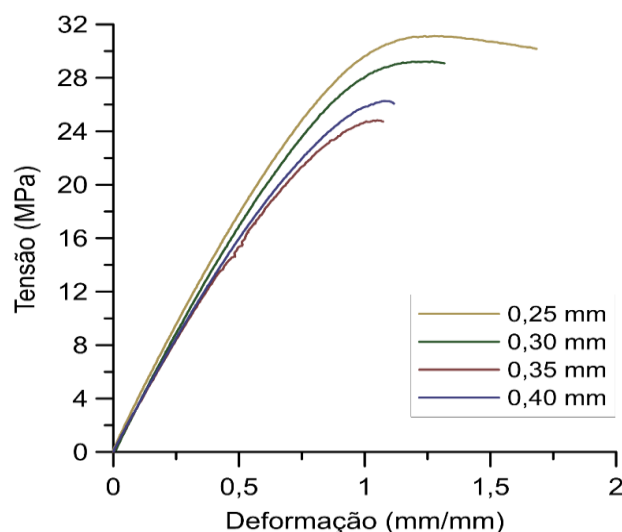


Figura 2. Curvas tensão-deformação para as peças em ABS, sob esforços de tração.

Na Figura 3, tem-se os valores de tensão máxima, ou tensão de tração suportada por cada resolução de camada, com os respectivos desvios padrões. O maior valor obtido foi de 31,14 MPa com 0,25 mm de espessura de camada e o que menos resistiu à tração foi o de 0,35 mm de resolução de impressão, conseguindo atingir 24,83 MPa de resistência. Houve um ganho de 25,40% na resistência à tração da amostra de 0,25 mm comparado à de 0,35 mm.

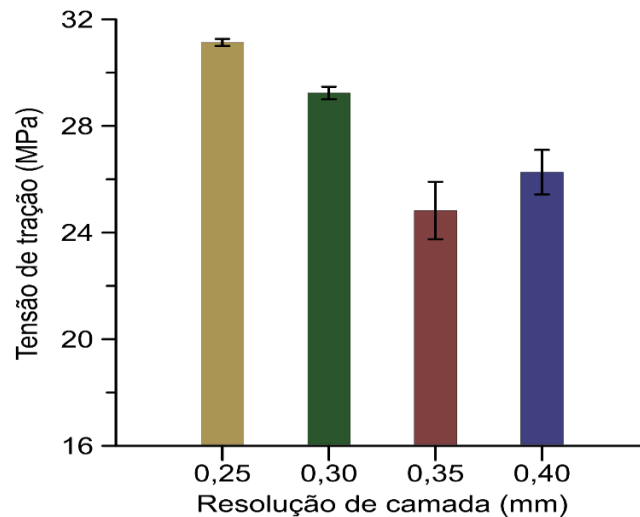


Figura 3. Comparativo entre resolução de camada e tensão de tração.

Pode-se verificar que os resultados para essa propriedade mecânica apresentam uma relação com a quantidade de camadas, sendo que a amostra com maior valor de resistência à tração foi constituída com 12 camadas, conforme Tabela 3, e os dois menores valores que se assemelham considerando o desvio padrão foram constituídos com 8 camadas cada. Possivelmente, além da diferença na quantidade de camadas, ocorre uma melhor adesão dos filamentos de menor resolução, uma vez que o bico extruda o filamento com 0,40 mm de diâmetro e a diferença de altura entre a plataforma e o bico extrusor é que determina o valor da resolução de camada depositada na peça. Dessa forma, as menores resoluções tendem a ter um maior contato durante a deposição dos filamentos, aumentando assim a adesão entre as camadas e, conseqüentemente, melhorando a resistência mecânica da peça impressa.

Os valores encontrados podem estar diretamente relacionados com a disposição das orientações de filamento depositados e a quantidade de camadas na constituição do corpo de prova, assim como analisado por *Ziemian et al.* [10] que obtiveram 25,15 MPa, *Tymrak et al.* [11] com 28,50 MPa e *Lovo e Fortulan* [12] com 32,00 MPa. Os primeiros autores ainda explicam que a retirada de lacunas de ar na seção transversal do material pode elevar ainda mais e tornar o resultado superior ao método tradicional.

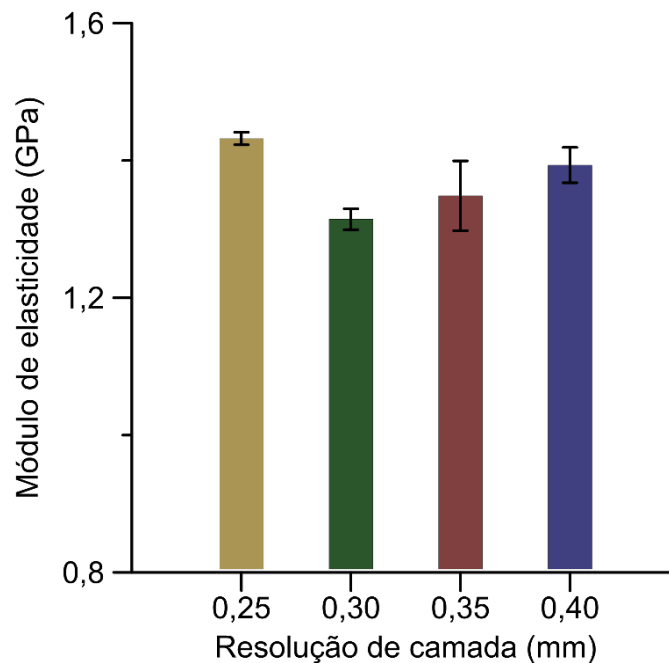


Figura 4. Comparativo entre resolução de camada e módulo de elasticidade.

A Figura 4 indica um comparativo entre o módulo de elasticidade, que é obtido por meio da tensão de tração e a respectiva deformação. O maior valor encontrado foi na resolução de camada 0,25 mm atingindo o valor de 1,43 GPa e o menor foi de 1,31 GPa respectivo a resolução de 0,30 mm.

Houve um aumento de 9% comparando a resolução 0,25 mm com a 0,35 mm. É possível inferir que o processo de fabricação não tem influência direta no módulo de elasticidade do material, o que pode ser comprovado pela Figura 4, considerando os desvios padrões. A pequena variação apresentada entre os resultados pode ter ocorrido devido a alguma imperfeição durante o processo de impressão das amostras. Valores esses próximos ao encontrado por *Tymrak et al.* [11] que foi de 1,81 GPa e *Lovo e Fortulan* [12] que foi de 1,60 GPa, que também quantificaram essa propriedade mecânica de amostras produzidas a partir do ABS em impressora 3D, mostrando conformidade entre os resultados e o processo de fabricação.

A Figura 5 mostra um comparativo entre o alongamento na ruptura das amostras com diferentes resoluções de camada. O maior valor obtido foi para resolução 0,25 mm equivalendo 3,31% e o menor foi de 2,14% referente a resolução de camada de 0,35 mm. Houve pequena variação entre os resultados e, além disso, comparando as resoluções de 0,25 e 0,30 mm nota-se que se equivalem considerando o desvio padrão. Da mesma forma, o resultado para as resoluções de 0,35 e 0,40 mm se equivalem. O tipo de comportamento apresentado dificultou a relação das

resoluções de camada com outras características analisadas, fazendo com que fosse complexo definir algum atributo para explicar os resultados.

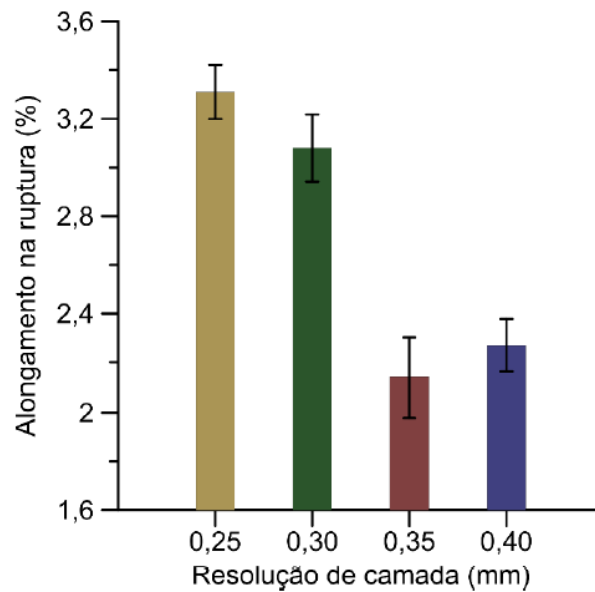


Figura 5. Comparativo entre resolução de camada e alongamento na ruptura.

Os valores obtidos estão de acordo com os resultados de *Perez et al.* [13], que obtiveram 3,1% de alongamento na ruptura para peças fabricadas em ABS.

Ensaio de flexão. Na Figura 6, está representado o comportamento em flexão das amostras submetidas ao ensaio de flexão. Assim como no resultado de resistência à tração, no ensaio de flexão observa-se também aumento na resistência mecânica com a resolução 0,25 mm em relação as demais amostras, isso provavelmente está relacionado com as menores resoluções que tendem a um maior contato durante a deposição das camadas.

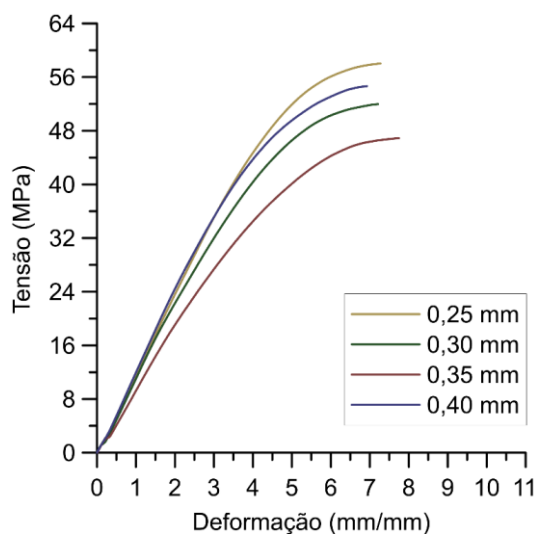


Figura 6. Curvas tensão–deformação para as peças em ABS, sob esforços de flexão.

Na Figura 7, observa-se que o maior valor obtido foi de 58,03 MPa com 0,25 mm de espessura de camada e o que menos resistiu à flexão foi o de 0,35 mm de resolução de impressão, conseguindo atingir 46,90 MPa de resistência. Houve um ganho de 23,73% na resistência à flexão da amostra de 0,25 mm comparado à de 0,35 mm.

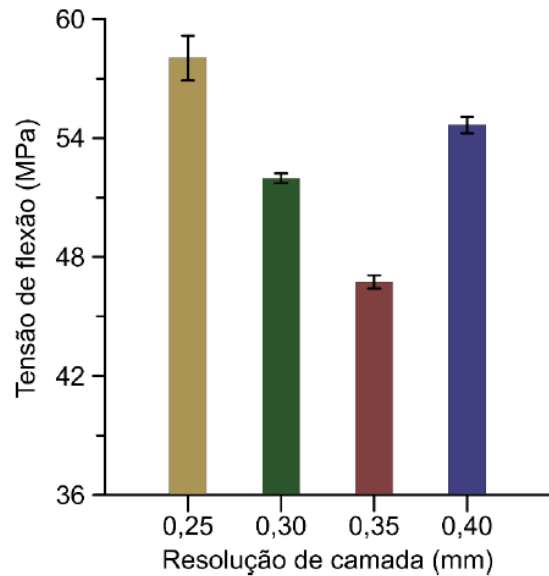


Figura 7. Comparativo entre resolução de camada e tensão de flexão.

Analisando a Figura 7, percebe-se que há uma relação entre o decréscimo do valor da tensão de flexão à medida que se torna menor a quantidade de camadas que constitui as amostras entre as resoluções de 0,25 e 0,35 mm. Já na amostra de 0,40 mm ocorre uma variação que não segue a tendência das outras amostras, podendo ter ocorrido alguma influência que não foi possível de ser determinada por meio das características analisadas, sendo necessário uma análise morfológica dos materiais ensaiados para melhor verificação dos resultados apresentados.

Valores próximos para tensão de flexão também foram obtidos por *Belter e Dollar* [14] que foi de 50,00 MPa e *Wu et al.* [13] que foi de 56,10 MPa, equiparando os resultados para o ABS.

A Figura 8 indica um comparativo entre a máxima deflexão, que é a variação percentual no incremento do comprimento onde a deformação máxima irá ocorrer. O maior valor encontrado foi na resolução de camada 0,35 mm atingindo o valor de 6,25% e o menor foi de 5,07% respectivo a resolução de 0,40 mm. Esses valores seguem a mesma lógica do resultado de *Solis* [16] de 6,62%, que também quantificou a máxima deflexão de amostras de ABS confeccionadas a partir da injeção de material.

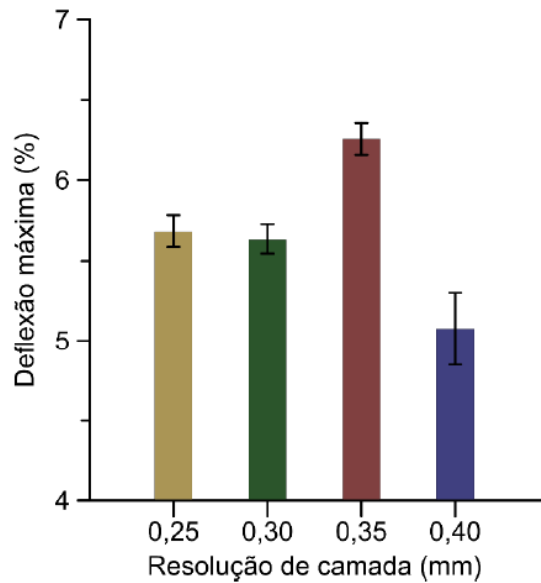


Figura 8. Comparativo entre resolução de camada e deflexão máxima.

Os valores encontrados mostram que ocorre uma variação pequena nos resultados de deflexão máxima para as amostras de 0,25; 0,30 e 0,40 mm. Já para a resolução de 0,35 mm ocorreu uma grande variação comparado às outras e isso pode ser explicado por alguma imperfeição durante o processo de fabricação ou um possível descolamento de camadas.

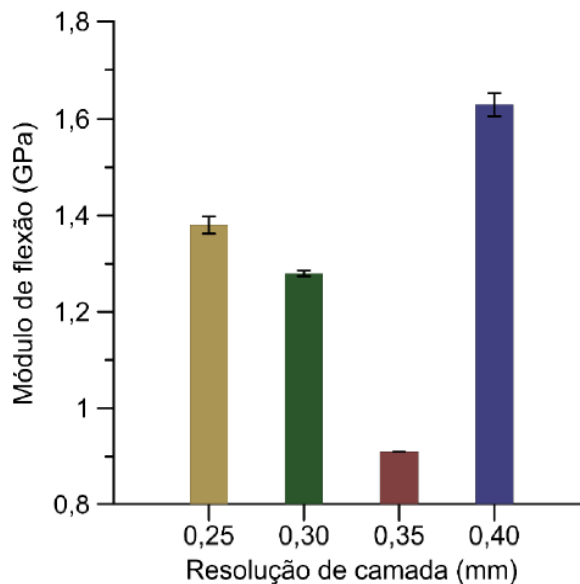


Figura 9. Comparativo entre resolução de camada e módulo de flexão.

A Figura 9 mostra um comparativo entre o módulo de flexão. O maior valor obtido foi com a resolução de 0,40 mm atingindo o valor de 1,63 GPa e, o menor valor foi de 0,91 GPa referente a resolução de 0,35 mm. Essa diferença de 79,12% entre o maior e o menor valor não condiz a respeito da propriedade mecânica de módulo de flexão, pois o mesmo é uma propriedade do

material e independe do processo de fabricação. Dentre os fatores analisados, não foi possível obter uma explicação plausível para tal comportamento, sendo necessário o uso da técnica de microscopia óptica (MO), por exemplo, para se chegar a uma conclusão.

Os valores obtidos neste trabalho são próximos aos encontrados por *Solis* [16] e *Belter e Dollar* [14], que também realizaram um estudo para quantificar essa propriedade mecânica com o material ABS e encontraram 1,18 e 2,07 GPa, respectivamente.

CONCLUSÕES

A geometria dos corpos de prova não sofreu mudanças quando se alterou os parâmetros de impressão.

A alteração da resolução de impressão resulta em maior ou menor quantidade de camadas nas peças produzidas, que interfere diretamente na adesão dos filamentos de cada camada e na quantidade de material disposto na orientação dos esforços sofridos pelas amostras, influenciando assim os resultados sob tração e flexão.

A partir dos corpos de prova, quando o material é submetido a esforços acima do limite elástico, ocorre o descolamento das camadas provocando o início de uma falha. Para explicar tais resultados, cita-se a possibilidade de existência de impurezas e imperfeições, como a falta de aderência e vazios de impressão, podendo designar baixa resistência mecânica.

O aumento gradativo na espessura de camada não gera variações dos valores de propriedades mecânicas na mesma proporção, o que leva a entender que devem ser realizadas outras análises para verificar os fatores que interferiram nos resultados.

Como trabalhos futuros, sugere-se avaliar a influência de outros parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas do ABS, realizar o estudo feito neste trabalho com outros materiais termoplásticos e alterar os ângulos de impressão.

REFERÊNCIAS

- [1] Dias F WR, “Comportamento mecânico do polímero PTFE sujeito a diferentes taxas de deformação”, Dissertação de Mestrado. Niterói. Rio de Janeiro, Brasil. Universidade Federal Fluminense, de 2011
- [2] Hunt E J, Zhang C, Anzalone N, Pearce, J M, *Resources, Conservation and Recycling*, **97**, 24 (2015).
- [3] Kurek A P, Sellin N, Gelsleichter M, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, **19(3)**, 248–254 (2009).
- [4] Galina DM, Garcia DP, Souza GG, Silva LRR, Maziero R, *Revista Iberoamericana de Polímeros*, **17(6)**, 303 (2016)
- [5] Koten J, *Advanced Manufacturing: The New Industrial Revolution – WSJ. The Wall Street Journal* (2013)
- [6] Wittbrodt BT, Glover AG, Laureto J, Anzalone GC, Oppliger D, Irwin JL, Pearce JM, *Mechatronics*, **23(6)**, 713 (2013)
- [7] Baumers M, Dickens P, Tuck C, Hague R, *Technological forecasting and social change*, **102**, 193 (2016)

- [8] ASTM D638–03, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003
- [9] ASTM D790–02, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [10] Ziemian S, Okwara M, Ziemian CW, *Rapid Prototyping Journal*, **21(3)**, 270 (2015)
- [11] Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM, *Materials & Design*, **58**, 242 (2014)
- [12] Lovo JFP, Fortulan CA “*Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM*”. Em 1º Simpósio do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (SiPGEM) 2016. São Carlos (Brasil): Escola de Engenharia de São Carlos, 2016
- [13] Perez ART, Roberson DA, Wicker RB, *J. Failure Analysis and Prevention*, **14(3)**, 343 (2014)
- [14] Belter JT, Dollar AM, *PloS one*, **10(4)**, e0122915 (2015)
- [15] Wu W, Geng P, Li G, Zhao L, Zhang H, Zhao J, *Materials*, **8(9)**, 5834 (2015)
- [16] Solis DM “*Análise de molde-protótipo fabricado em digital ABS por manufatura aditiva*”, Monografia. Curitiba, Brasil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, de 2015