

FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE PEÇAS CILÍNDRICAS OBTIDAS POR MEIO DA MANUFATURA ADITIVA

Leonardo Munhoz

Armando Ítalo Sette Antonialli

Rafael Vidal Aroca

Flávio Yukio Watanabe

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Rod. Washington Luís, km 235 - SP-310 - São Carlos - SP

CEP 13565-905

leo.munhoz21@gmail.com, antonialli@ufscar.br, aroca@ufscar.br, fywatanabe@ufscar.br

Resumo: A Manufatura Aditiva (MA) é considerada um processo produtivo moderno, mas ainda enfrenta grandes desafios na produção de peças com qualidade, resistência mecânica e produtividade adequadas. Uma das técnicas mais conhecidas e populares de manufatura aditiva é o FFF (Fused Filament Fabrication) ou FDM (Fused Deposition Modeling) de materiais poliméricos, nas quais as peças são produzidas em impressoras 3D de coordenadas cartesianas, por meio da deposição de camadas sucessivas de filamento polimérico previamente fundido. Contudo, as características de rigidez e resistência das peças produzidas por manufatura aditiva sofrem a influência da direção de deposição do material e da adesão entre as camadas. Esses problemas tornam-se críticos quando se imprime corpos com perfil de revolução submetidos posteriormente a esforços de flexão lateral. O presente trabalho apresenta uma alternativa para a impressão de corpos cilíndricos, empregando um dispositivo rotativo que corresponde um quarto eixo horizontal em uma impressora 3D convencional e o princípio empregado é o de produção de tubos de fibra de carbono, conhecido como filament winding. O dispositivo desenvolvido possibilita a fabricação de corpos de provas (CPs) utilizando o método de deposição de camadas sucessivas sobre uma matriz rotativa, controlando-se o ângulo de deposição e o sentido de rotação. Com este método de impressão é possível realizar o “trançamento” dos fios, gerando uma conexão entre as camadas, buscando-se garantir maior resistência mecânica. Para a comunicação com a impressora 3D, foi utilizado o software Repetier-Host, por meio de leitura de códigos do tipo G (G-code). Com o objetivo de se realizar a análise da resistência dos CPs, foram empregados dois diferentes tipos de materiais (ABS - Acrilonitrila butadieno estireno e PLA - Ácido polilático) e 3 diferentes ângulos de hélice de deposição do filamento fundido (30°, 45° e 60°). Para fins de comparação, foram produzidos também CPs cilíndricos sem ângulo de hélice e outros a impressos de forma convencional. No total, 24 CPs foram produzidos e ensaiados em flexão a 3 pontos, com base na norma ASTM D790, mas com algumas adaptações devido ao formato, tamanho e materiais dos CPs. Os resultados dos ensaios de flexão evidenciam a eficácia da estratégia de impressão adotada por meio da análise da influência do ângulo de hélice e do tipo material na resistência mecânica à flexão.

Palavras-chave: Impressão 3D; Eixo Rotativo; 4º Eixo; FDM; FFF.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos manufaturados e o desenvolvimento industrial e tecnológico impulsionam o surgimento de diferentes técnicas e métodos na área de manufatura avançada, de modo que cada vez mais setores possam ser supridos com mais facilidade e rapidez. Um exemplo deste avanço é a tecnologia de Impressão 3D, também conhecida como Manufatura Aditiva - MA (Additive Manufacturing - AM), que se tornou uma realidade no mercado industrial nos últimos anos e diferentes técnicas foram desenvolvidas, empregando materiais fundidos, em pó ou no estado líquidos (Bikas et al., 2016).

Segundo Gibson et al. (2015), originalmente, este processo era conhecido como Prototipagem Rápida (Rapid Prototyping - RP), uma vez que sua aplicação estava restrita apenas à finalidade de fabricação de protótipos de pequenas dimensões, ou um modelo de base para o desenvolvimento de uma peça final.

Atualmente, esta tecnologia está presente em áreas diversas como aeronáutica, biomedicina e automotiva (Dhinakaran et al., 2020) e a aplicação da MA na produção de peças finais, levou à necessidade de se aprimorar a qualidade e as propriedades mecânicas dos elementos produzidos por meio da análise e controle dos parâmetros do processo de fabricação associados, como os processos de fusão, solidificação e adesão do material empregado, a fim de se minimizar os efeitos negativos da deposição por camadas, inerente ao processo de manufatura aditiva, e que podem acarretar problemas de delaminação de camadas, anisotropia de propriedades mecânicas e fratura frágil (Gibson et al., 2015). Particularmente, essas características da MA implicam em um desafio quando se trata da necessidade de produção de elementos de revolução com resistência elevada à flexão e cisalhamento.

O objetivo principal do presente trabalho foi desenvolver um novo método de impressão de peças cilíndricas por revolução, permitindo, assim, obter peças com resistência à flexão mais elevadas. Para isso, foi desenvolvido um dispositivo com eixo rotativo e matriz cilíndrica, em substituição a um dos movimentos de translação da mesa plana de uma impressora 3D convencional.

O método de fabricação empregado é similar ao de produção de peças cilíndricas com materiais compósitos como fibra de carbono, conhecido como enrolamento filamentar (*filament winding*) que realiza, através do entrelaçamento dos fios em uma mesma camada ou em camadas sucessivas, corpos de revolução com maiores resistências mecânicas nas direções radial, circunferencial e axial (Daniel e Ishai, 2006).

2. MANUFATURA ADITIVA E PROPRIEDADES MECÂNICAS

O processo de manufatura aditiva convencional requer-se a criação de um modelo digital tridimensional do objeto a ser produzido, utilizando de softwares de CAD (*Computer Aided Design*). Posteriormente, o arquivo do modelo CAD é transformado em um arquivo no formato STL (*Standard Triangle Language*), no qual a superfície do modelo é discretizada em um conjunto de triângulos interconectados. A partir do arquivo STL, são gerados cortes planos sucessivos, dividindo o modelo em diversas camadas, de modo que a impressora 3D adicionará material em cada uma delas separadamente, correspondente a cada seção transversal da peça, o que resultará em um modelo tridimensional Gibson *et al.* (2015).

Com a rápida expansão do mercado da manufatura aditiva, diversos processos começaram a aparecer, com algumas peculiaridades que determinam características específicas do material que se pretende produzir. De forma geral, os processos de MA são similares entre si, diferindo apenas no material de deposição (polimérico, metálico, cerâmico ou compósito), formato ou estado do material (filamento, pó ou líquido), forma de adição de camada (extrusão ou deposição), processo de solidificação (microfusão, polimerização ou aglutinação) e forma de ativação (radiação, ultravioleta ou laser). Dependendo das características do processo empregado, pode-se controlar as propriedades que se esperam do material, como, por exemplo, acabamento superficial (rugosidade), precisão das medidas, propriedades mecânicas (elasticidade, resistência à tração, cisalhamento, porosidade), dentre outros (Gibson *et al.*, 2015).

Gibson *et al.* (2015) indicam que os principais processos de AM são à base de lasers, por extrusão, por injeção de material, processo adesivo e por feixe de elétrons. Dentro destes grupos, as impressoras 3D mais utilizadas são as de Processamento Digital de Luz (*Digital Light Process - DLP*), Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering - SLS*), Jato de Tinta (*Inkjet*), Estereolitografia (*Stereolithography - SLA*) e de Modelagem por Deposição de Material Fundido (*Fused deposition modeling - FDM*) ou Fabricação por filamento fundido (*Fused Filament Fabrication - FFF*)

A Figura 1a ilustra uma impressora 3D básica para FDM, na qual o filamento de material polimérico é fundido em um cabeçote térmico e extrudado através de um bico de deposição que se movimenta sobre uma mesa plana horizontal (direções x e y) em uma trajetória previamente estabelecida, formando uma camada de impressão. Posteriormente, o cabeçote movimenta-se na vertical (direção z) para a deposição de uma nova camada da peça, entretanto, se a adesão entre as camadas não for adequada, são gerados planos com baixa resistência à tração e cisalhamento.

Considerando a anisotropia de propriedades mecânicas de peças fabricadas por FDM, a norma F2971-13 da ASTM (2013) estabelece configurações variadas para a fabricação de corpos de prova (CPs) obtidos por este método, conforme ilustrado na Fig. 1b.

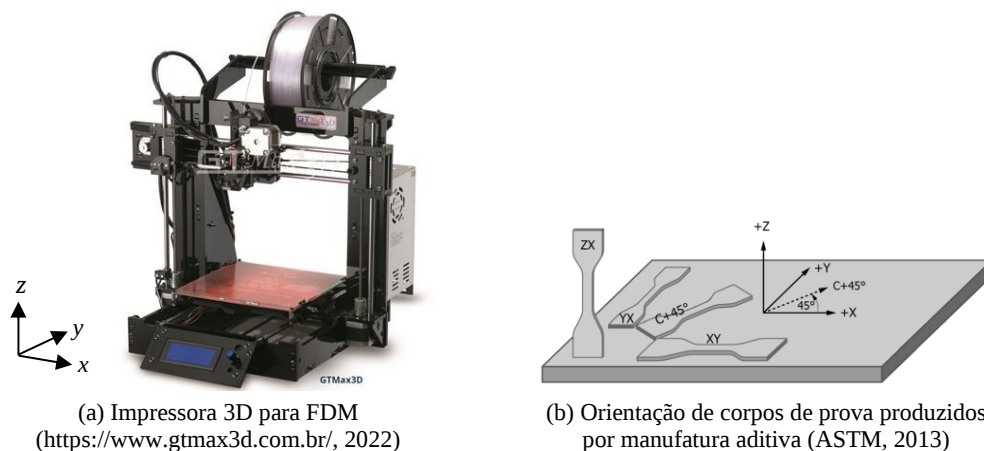


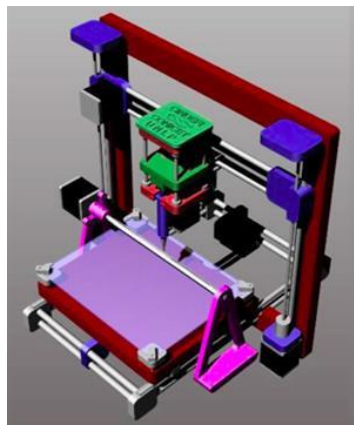
Figura 1. Impressora 3D para FDM e orientação de CPs

Ahn *et al.* (2002) e Bagsik e Schöppner (2011) indicam que tanto as propriedades mecânicas de resistência quanto de elasticidade são influenciadas pelas direções das linhas de deposição do material fundido pelo processo FDM. Sendo assim, ao se planejar a fabricação de peças finais por manufatura aditiva, é necessário conhecer os esforços e suas respectivas direções com o objetivo de definir uma configuração de proporcione a resistência adequada.

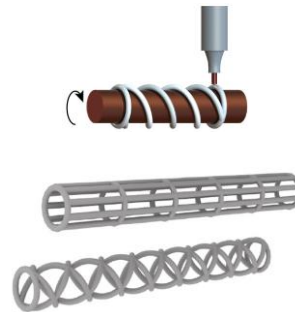
3. MANUFATURA E ENSAIOS DE ELEMENTOS DE REVOLUÇÃO

Elementos de revolução, como tubos ou cilindros fabricados em impressoras 3D de forma convencional, a resistência à flexão é relativamente baixa. Com o objetivo de se aumentar a resistência à flexão, pode-se incorporar um 4º eixo a uma impressora convencional, sendo este eixo rotativo, a exemplo centros de usinagem de controle numérico. Esta técnica de impressão, representada na Fig. 2a, foi desenvolvida inicialmente por pesquisadores da Universidade Nacional de La Plata, na Argentina, cujo objetivo foi fabricar elementos com biomateriais de formatos cilíndricos complexos, tubulares ou malhas helicoidais (Tess, 2017). Esse eixo rotativo possui uma matriz cilíndrica acoplada e que substitui um dos eixos de translação da mesa de impressão.

Recentemente, van Kampen *et al.* (2021) empregaram esta técnica na fabricação de estruturas tubulares complexas, conforme ilustrado na Fig. 2b, visando a substituição de trechos de órgãos lesionados, como vasos sanguíneos e traqueia, por órgãos sintéticos. Ensaios de resistência à compressão radial, tração axial e flexão a três pontos foram realizados com o objetivo de levantar as características elásticas e de resistência das estruturas fabricadas.



(a) Impressora 3D com 4º eixo
(Tess, 2017)

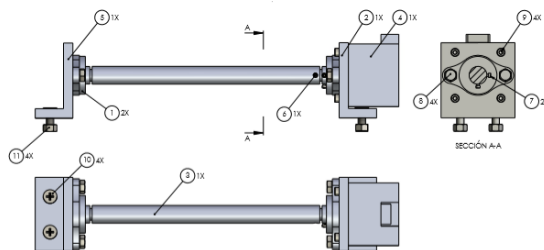


(b) Fabricação de elementos de revolução (van Kampen *et al.*, 2021)

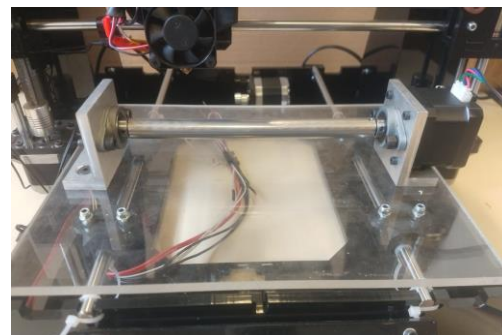
Figura 2. Impressora 3D com 4º eixo e fabricação de elementos de revolução

3.1. Desenvolvimento do dispositivo com 4º eixo rotativo

No presente trabalho foi empregada uma impressora 3D da marca GTMax 3D, modelo Graber I3 (Fig. 1a), com disponibilidade de impressão em um volume cúbico de 200 x 200 x 190 mm. O modelo foi selecionado por seu baixo custo relativo e por possuir uma região de impressão acessível, facilitando a implantação do dispositivo com 4º eixo rotativo, representado na Fig. 3a, e cujos elementos básicos são: ③ matriz cilíndrica (inox 304, diâmetro de ½" ou 12,7 mm), ① mancais de rolamento (modelo Kfl08), ② e ⑤ cantoneiras de suporte (alumínio) e ④ motor de passo NEMA 17 (12V), além de elementos de fixação. A Figura 3b mostra que a mesa de impressão foi substituída por uma base fixa de acrílico na qual foi instalado o dispositivo com 4º eixo rotativo.



(a) Dispositivo com 4º eixo rotativo



(b) Dispositivo instalado na impressora 3D

Figura 3. Projeto e implantação do dispositivo com 4º eixo rotativo (Munhoz, 2022)

O sinal de acionamento do motor que movimentava a mesa de impressão na direção y foi redirecionado para o motor que aciona o dispositivo com 4º eixo rotativo. Além disso, sistemas de controle físico e virtual de fim de curso da impressora foram desabilitados, permitindo maior versatilidade na programação da trajetória para a impressão de CPs sobre a matriz cilíndrica.

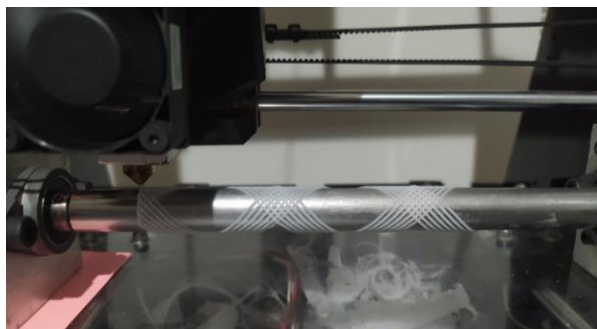
3.2. Produção dos corpos de prova

Conforme mencionado anteriormente, o processo de fabricação de peças sobre a matriz cilíndrica do dispositivo com 4º eixo rotativo é similar ao de produção de peças cilíndricas com materiais compósitos, conhecido como enrolamento filamento. Para a produção dos CPs, foram utilizados filamentos com 1,75 mm de diâmetro de PLA - Ácido polilático (cor branca, temperatura de processamento de 180° a 200° C) e ABS - Acrilonitrila butadieno estireno (cor marfim, temperatura de processamento de 210° a 225° C).

Convencionalmente, o *software* utilizado na impressão 3D, que neste caso foi o Repetier-Host, possui uma função chamada “Fatiamento”. Neste processo, o *software* recebe um desenho tridimensional e realiza a divisão da peça em camadas sobrepostas, gerando automaticamente o G-Code que será interpretado pela impressora com um conjunto de coordenadas nas direções *x*, *y* e *z*.

Contudo, com a adoção do 4º eixo rotativo, houve a alteração do sistema de coordenadas da impressora e por este motivo a geração do G-Code de impressão dos CPs cilíndricos precisou ser inteiramente desenvolvido. Para tanto, foi utilizado o *software* de programação Force 2.0 e a linguagem Fortran. Os parâmetros básicos de entrada para a geração do G-Code foram: ângulo de hélice θ em relação à direção axial, comprimento do CP, número de camadas, espessura da camada e quantidade de material extrudado.

A Figura 4a ilustra o processo de fabricação de um CP com camadas entrelaçadas sobre a matriz cilíndrica e CPs prontos são apresentados na Fig. 4b. Foram produzidos conjuntos de 3 CPs 100 mm de comprimento e 3 camadas entrelaçadas ($\pm \theta$), combinando os parâmetros de material (PLA e ABS) e ângulos de hélice $\theta = \pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$. Além disso, foram produzidas também CPs de referência na matriz cilíndrica, mas com entrelaçamento nulo ($\theta = 90^\circ$), e CPs cilíndricos impressos de forma convencional (I/C) na direção vertical em uma impressora Sethi3D, modelo AiP A3 não modificada. No total, foram produzidos 30 CPs, sendo 15 em PLA e 15 em ABS que foram medidos e pesados para se verificar a uniformidade resultante dos processos de fabricação empregados.



(a) Fabricação de corpos de prova



(b) Corpos de prova

Figura 4. Fabricação e corpos de prova cilíndricos (Munhoz, 2022)

3.3. Ensaio de flexão dos corpos de prova

Os CPs produzidos foram submetidos ao ensaio de flexão a 3 pontos em uma máquina Shimadzu, modelo AG-IC, para o levantamento de suas características de resistência mecânica e elasticidade, tendo como referência a norma D790-17 da ASTM (2017) que estabelece procedimentos de teste de flexão de materiais plásticos. Entretanto, devido ao formato e dimensões dos CPs, foi necessário realizar algumas adaptações, dentre estas a utilização de roletes de aço em formato de carretel para o apoio das extremidades dos CPs e a aplicação do carregamento central, conforme ilustrado na Fig. 5a. Uma carga progressiva foi aplicada na região central de cada CP e a intensidade da força e o deslocamento vertical associado foram registrados até a fratura dos elementos ensaiados, que ocorreu em seções transversais da região central dos CPs (Fig. 5b).



(a) Ensaio de flexão a 3 pontos



(b) Corpos de prova ensaiados

Figura 5. Ensaio de flexão a 3 pontos (Munhoz, 2022)

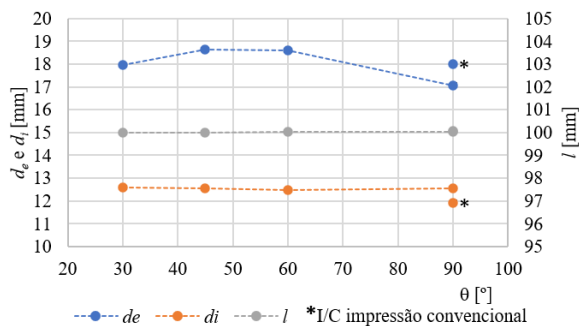
4. RESULTADOS

As dimensões e os parâmetros físicos básicos identificados dos 30 CPs foram: diâmetro externo (d_e), diâmetro interno (d_i), comprimento (l), massa (m) e densidade (ρ). Os valores médios e os respectivos desvios padrões de cada conjunto de CPs são apresentadas na Tab. 1 e de forma gráfica nas Fig. 7 e 8.

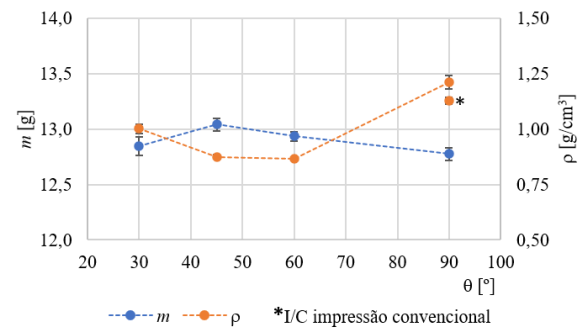
Tabela 1. Características físicas dos corpos de prova em PLA e ABS (Munhoz, 2022)

	θ	d_e [mm]	d_i [mm]	l [mm]	m [g]	ρ [g/cm ³]
PLA	$\pm 30^\circ$	$17,95 \pm 0,05$	$12,60 \pm 0,04$	$99,99 \pm 0,03$	$12,85 \pm 0,08$	$1,00 \pm 0,02$
	$\pm 45^\circ$	$18,63 \pm 0,06$	$12,55 \pm 0,02$	$100,01 \pm 0,02$	$13,04 \pm 0,06$	$0,87 \pm 0,01$
	$\pm 60^\circ$	$18,61 \pm 0,03$	$12,49 \pm 0,01$	$100,02 \pm 0,02$	$12,93 \pm 0,04$	$0,87 \pm 0,01$
	90°	$17,08 \pm 0,09$	$12,54 \pm 0,01$	$100,04 \pm 0,01$	$12,77 \pm 0,06$	$1,21 \pm 0,03$
	I/C	$18,00 \pm 0,04$	$11,93 \pm 0,08$	$100,06 \pm 0,01$	$16,11 \pm 0,15$	$1,13 \pm 0,01$
ABS	$\pm 30^\circ$	$17,57 \pm 0,07$	$12,63 \pm 0,03$	$99,97 \pm 0,01$	$9,88 \pm 0,05$	$0,84 \pm 0,01$
	$\pm 45^\circ$	$17,95 \pm 0,57$	$12,57 \pm 0,05$	$99,98 \pm 0,02$	$9,98 \pm 0,08$	$0,78 \pm 0,10$
	$\pm 60^\circ$	$18,29 \pm 0,08$	$12,59 \pm 0,03$	$99,99 \pm 0,03$	$9,73 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,01$
	90°	$17,11 \pm 0,11$	$12,60 \pm 0,03$	$100,05 \pm 0,01$	$9,95 \pm 0,10$	$0,95 \pm 0,02$
	I/C	$18,11 \pm 0,11$	$12,02 \pm 0,03$	$100,04 \pm 0,01$	$12,65 \pm 0,05$	$0,88 \pm 0,02$

90° sem entrelaçamento I/C impressão convencional

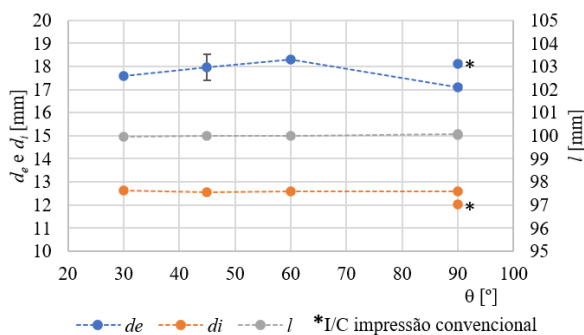


(a) Dimensões dos CPs em PLA

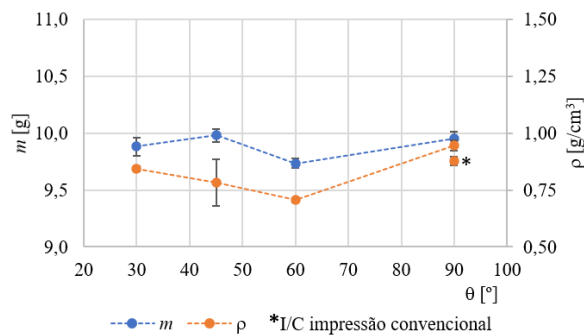


(b) Massa e densidade dos CPs em PLA

Figura 7. Características físicas dos corpos de prova em PLA (Munhoz, 2022)



(c) Dimensões dos CPs em ABS



(d) Massa e densidade dos CPs em ABS

Figura 8. Características físicas dos corpos de prova em ABS (Munhoz, 2022)

De um modo geral, as dimensões e parâmetros dos CPs são uniformes, com exceção do diâmetro externo (d_e) dos elementos produzidos em ABS com ângulo de hélice $\theta = \pm 45^\circ$, devido a um problema que ocorreu no processo de fabricação e que refletiu também na densidade (ρ) deste conjunto de CPs. Além disso, os CPs produzidos por meio da impressão convencional apresentam dimensões e parâmetros físicos distintos dos produzidos sobre a matriz cilíndrica com $\theta = 90^\circ$, com exceção do comprimento (l).

Após o levantamento das características físicas dos CPs, estes foram submetidos ao ensaio de flexão a 3 pontos e os diagramas força aplicada x deslocamento vertical obtidos são apresentados nas Fig. 9 e 10 para os materiais PLA e ABS,

respectivamente, e nas diferentes configurações de impressão: (a) $\theta = 90^\circ$, (b) impressão convencional (I/C), (c) $\theta = \pm 30^\circ$, (d) $\theta = \pm 45^\circ$ e (e) $\theta = \pm 60^\circ$.

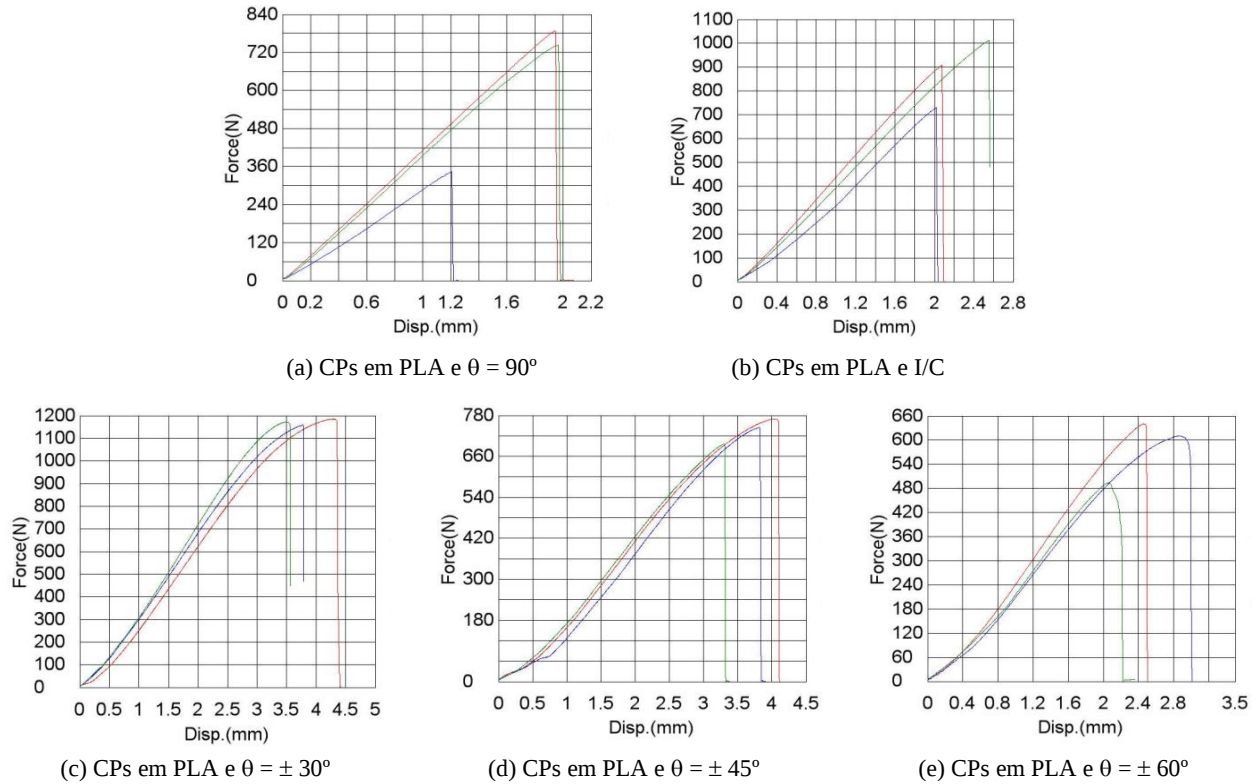


Figura 9. Diagramas de força aplicada x deslocamento vertical dos CPs em PLA (Munhoz, 2022)

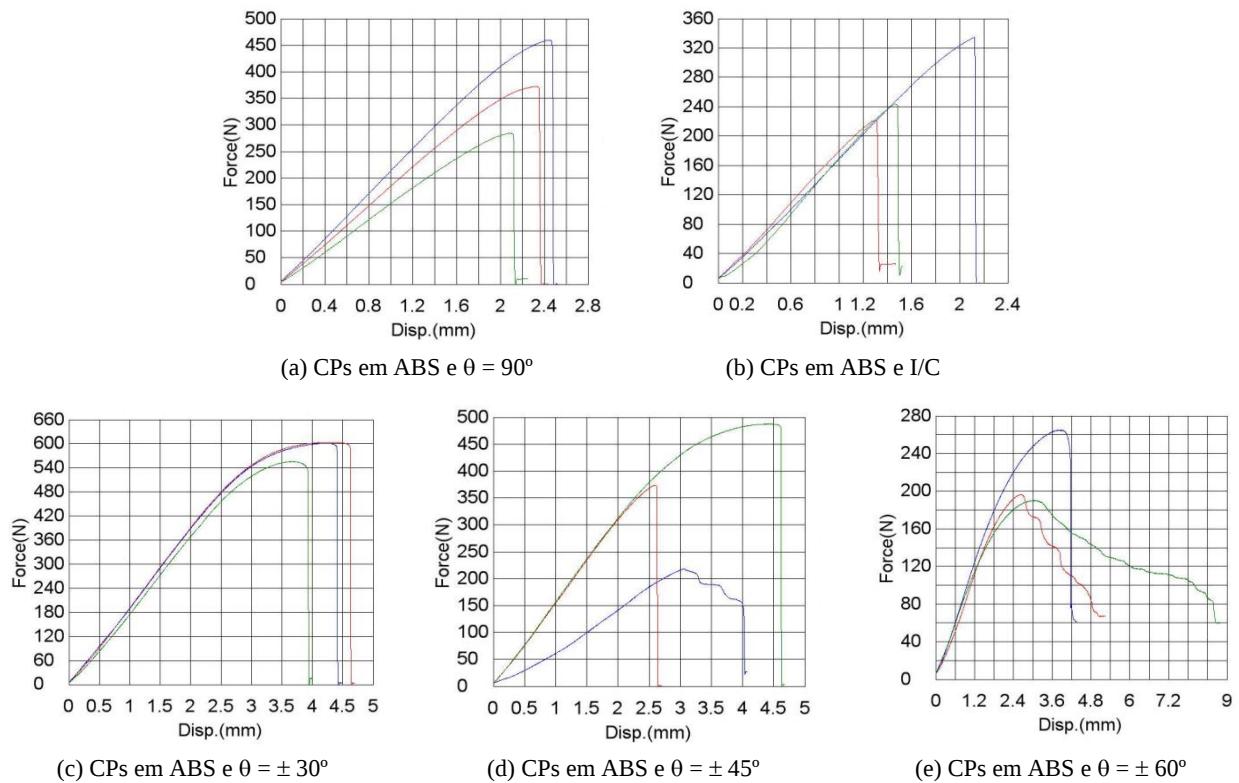


Figura 10. Diagramas de força aplicada x deslocamento vertical dos CPs em ABS (Munhoz, 2022)

Para os CPs em PLA, nota-se que para $\theta = 90^\circ$ e impressão convencional os diagramas apresentam comportamento predominantemente linear com fratura abrupta, ao passo que para $\theta = \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$ observa-se trechos iniciais não lineares, seguidos de trechos relativamente lineares e finalizados com novos trechos não lineares que precedem a fratura.

No caso dos CPs em ABS, para $\theta = 90^\circ$ e impressão convencional os diagramas também apresentam comportamento predominantemente linear, mas com trecho não linear que precede a fratura. Para os casos de $\theta = \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$ observa-se trechos iniciais não lineares mais discretos, seguidos de trechos relativamente lineares e finalizados com novos trechos não lineares de grande deformação que precedem a fratura.

Em ambos os casos de CPs em PLA e ABS, são identificados alguns grupos com discrepâncias entre as curvas características e valores máximos de força e deslocamento que serão analisados em termos de parâmetros estatísticos (valor médio e desvio padrão).

Além disso, com base nos resultados dos ensaios de flexão a 3 pontos e das dimensões dos CPs foi determinada a intensidade da força máxima suportada individualmente ($F_{m\acute{a}x}$) e foi calculada a tensão normal máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) na seção transversal média do CP, decorrente do momento fletor aplicado, por meio da expressão dada na Eq. (1)

$$\sigma_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} \cdot I / (4 \cdot W) \quad (1)$$

sendo, W o módulo de resistência à flexão de seção transversal circular vazada: $W = \pi \cdot (d_e^4 - d_i^4) / (32 \cdot d_e)$

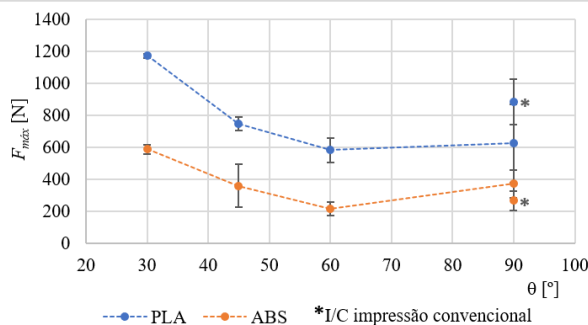
Os valores médios e respectivos desvios padrões dos resultados dos ensaios de flexão a 3 pontos são apresentados na Tab. 2 e de forma gráfica na Fig. 11.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de flexão a 3 pontos dos corpos de prova (Munhoz, 2022)

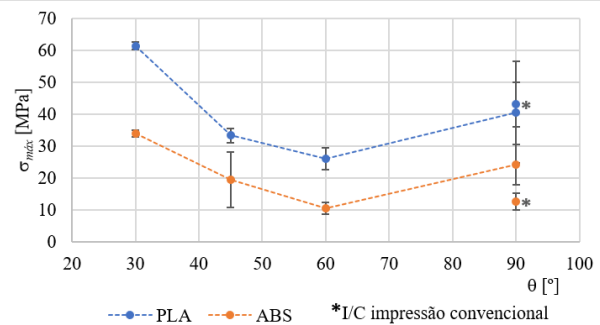
θ	Carga máxima - $F_{m\acute{a}x}$ [N]		Tensão normal máxima - $\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	
	PLA	ABS	PLA	ABS
$\pm 30^\circ$	1171,77 $\pm$ 13,57	586,75 $\pm$ 27,15	61,36 $\pm$ 1,14	33,80 $\pm$ 1,04
$\pm 45^\circ$	746,78 $\pm$ 43,92	359,82 $\pm$ 135,56	33,31 $\pm$ 2,17	19,44 $\pm$ 8,73
$\pm 60^\circ$	581,62 $\pm$ 77,56	217,16 $\pm$ 41,56	25,97 $\pm$ 3,46	10,47 $\pm$ 1,82
90°	624,72 $\pm$ 243,66	372,00 $\pm$ 87,75	40,55 $\pm$ 15,90	24,20 $\pm$ 6,21
I/C	883,42 $\pm$ 142,91	266,41 $\pm$ 59,67	43,03 $\pm$ 6,97	12,72 $\pm$ 2,66

90° sem entrelaçamento

I/C impressão convencional



(a) Força máxima $F_{m\acute{a}x}$



(b) Forças normal máxima $\sigma_{m\acute{a}x}$

Figura 11. Forças e tensões normais máximas resultantes dos ensaios de flexão (Munhoz, 2022)

De um modo geral, pode-se notar que os CPs em PLA apresentam níveis de resistência à flexão mais elevados que os fabricados em ABS para as mesmas características de impressão. Esse comportamento está associado à resistência mecânica mais elevada do PLA em relação ao ABS.

Os CPs em PLA e ABS com ângulo de hélice $\theta = \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$ apresentam queda progressiva na resistência à flexão. Já os resultados dos CPs com ângulo $\theta = 90^\circ$ e impressos na vertical e de forma convencional apresentam resistência à flexão mais elevados, mas inferiores aos impressos com $\theta = \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$. Cabe ressaltar que os CPs impressos com $\theta = 90^\circ$ acaba tendo uma porcentagem de preenchimento mais elevada do que os CPs com $\theta = \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$ devido às características do processo de deposição desenvolvido e isso reflete diretamente nas propriedades mecânicas dos CPs.

Além disso, os desvios padrões maiores os casos de CPs em PLA ($\theta = 90^\circ$, I/C e $\theta = \pm 60^\circ$) e em ABS ($\theta = 90^\circ$, IC e $\theta = \pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$) refletem as variações dimensionais dos CPs e o problema de fabricação de um CP em ABS ($\theta = \pm 45^\circ$), e que acarretaram em discrepâncias nos resultados dos ensaios de flexão a 3 pontos, representadas nas Fig. 9 e 10.

5. CONCLUSÕES

O dispositivo com um eixo rotativo, desenvolvido para ser adaptado a uma impressora 3D convencional, mostrou-se adequado para a produção de peças cilíndricas tubulares empregando-se o processo de deposição de material fundido em camadas sucessivas e com um ângulo de hélice controlável. Para tanto, houve a necessidade de se desenvolver o dispositivo eletromecânico, bem como um *software* específico para a impressão dos CPs sobre a matriz cilíndrica de forma similar ao processo de *filamento winding* empregado na fabricação de elementos tubulares em materiais compósitos, como os de fibra de carbono.

Os ensaios de flexão a 3 pontos indicam que a resistência dos CPs com $\theta = \pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$ apresentam queda progressiva na resistência com o aumento do ângulo de hélice. Além disso, os CPs impressos com $\theta = \pm 30^\circ$ apresentam resistência à flexão mais elevada que os impressos sem ângulo de hélice ($\theta = 90^\circ$), ou ainda em relação aos elementos impressos na vertical em uma impressora convencional não modificada.

Corpos de prova impressos sem ângulo de hélice ($\theta = 90^\circ$) ou impressos na vertical e de forma convencional apresentam resistência à flexão relativamente próximas, indicando que os produtos resultantes desses dois processos de fabricação se assemelham nestas condições de ensaio.

Alguns pontos de melhoria do dispositivo rotativo foram identificados, tais como: inclusão de um sistema térmico embutido no interior da matriz cilíndrica e que proporcione um pré-aquecimento que incremente a adesão do material fundido na superfície da matriz e entre as camadas; adoção de uma caixa protetora para impressora que terá a função adicional de manter a temperatura interna mais elevada, incrementando a adesão entre as camadas; e a adoção de um mecanismo ou material auxiliar entre a matriz cilíndrica e o CP que facilite o processo de desmoldagem.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de estudo do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - PIBITI (2018 - 2019).

7. REFERÊNCIAS

- Ahn, S.-H.; Montero, M.; Odell, D.; Roundy, S. e Wright, P.K., 2022. Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 4, p. 248-257.
- ASTM, 2013. F2971-13: *Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing*.
- ASTM, 2017. D790-17: *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Material*.
- Bagsik, A. e Schöppner, V., 2011. Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts Manufactured With ULTEM®9085. *Proceedings of the 69th Annual Technical Conference of the Society of Plastic Engineers - ANTEC 2011*, Boston, USA, p. 1294-1298.
- Bikas, H.; Stavropoulos, P. e Chrysosolouris, G., 2016. Additive Manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 1-4, p. 390-394.
- Daniel, I. M. e Ishai, O., 2006. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 2nd ed. Oxford University Press
- Dhinakaran V.; Kumar, K. P. M.; Ram, P. M. B.; Ravichandran, M. e Vinayagamoorthy, M., 2020. A review on recent advancements in fused deposition modeling. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 27, p. 752–756.
- Gibson, I.; Rosen, D. e Stucker, B., 2015. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. Springer, Nova York, 2nd edition.
- van Kampen, K.A.; Olaret, E.; Stancu, I.-C.; Moroni, I. e Mota, C., 2021. Controllable four axis extrusion-based additive manufacturing system for the fabrication of tubular scaffolds with tailorable mechanical properties. *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 119, 111472.
- Munhoz, L., 2022. *Fabricação e Caracterização da Resistência à Flexão de Peças Cilíndricas obtidas por meio da Manufatura Aditiva*. Monografia de graduação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- Tess, 2017. Argentinian researchers add rotating 4th axis to 3D bioprinter for tubular scaffold meshes. 25 Aug. 2017. <<http://www.3ders.org/articles/20170825-argentinian-researchers-add-rotating-4th-axis-to-bioprinter-for-tubular-scaffold-meshes.html>>.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

MANUFACTURING AND BENDING STRENGTH CHARACTERIZATION OF CYLINDRICAL PARTS OBTAINED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Leonardo Munhoz

Armando Ítalo Sette Antonialli

Rafael Vidal Aroca

Flávio Yukio Watanabe

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Rod. Washington Luís, km 235 - SP-310 - São Carlos - SP

CEP 13565-905

lmunhoz@estudante.ufscar.br, antonialli@ufscar.br, aroca@ufscar.br, fywatanabe@ufscar.br

Abstract. Additive Manufacturing (AM) is considered a modern production process, but it still faces great challenges in producing parts with adequate quality, mechanical strength and productivity. One of the best known and most popular additive manufacturing techniques is FFF (Fused Filament Fabrication) or FDM (Fused Deposition Modeling) of polymeric materials, in which parts are produced in Cartesian coordinate 3D printers, through the deposition of successive layers of previously fused polymeric filament. However, stiffness and strength characteristics of parts produced by additive manufacturing are influenced by the direction of material deposition and adhesion between the layers. These problems become critical when printing bodies with a vertical profile of revolution and subsequently subjected to lateral bending forces. This work presents an alternative for the printing of cylindrical bodies, using a rotating device that corresponds to a fourth horizontal axis in a conventional 3D printer and the principle employed is the same as in the process of producing carbon fiber tubes, known as filament winding. The developed device enables the fabrication of specimens using the method of deposition of successive layers on a rotating matrix, controlling the deposition angle and the rotation direction. With this printing method it is possible to perform the “braiding” of the wires, generating a connection between the layers, seeking to guarantee greater mechanical resistance to the produced cylinders. For communication with the 3D printer, the Repetier-Host software was used, by reading a G-code. This, in turn, was developed by building a '.exe' file, using the Fortran programming language as a base, in which input parameters are provided and this returns the G code to be recognized by the printer. In order to analyze the resistance of the specimens, two different types of materials were used (ABS – Acrylonitrile butadiene styrene and PLA – Polylactic acid) and 3 different helix angles of deposition of the fused filament (30°, 45° and 60°). For comparison purposes, cylindrical specimens without helix angle and others printed in conventional mode were also produced. In total, 30 specimens were produced and tested in three-point flexural test, based on the ASTM D790 standard, but with some adaptations due to the shape, size and materials of the specimens. Analyzing the graphs resulting from the test, the tensional stress values were obtained for each case and compared, using the tensional stress/density ratio. It was observed that samples with entanglement at 30° presented the highest results, followed by samples with 45° and 60°. The samples with a circumferential profile, that is, 90°, presented inferior results, with the exception of the conventionally printed PLA specimens. Furthermore, the values of the modulus of elasticity for each group of samples were compared with values obtained in the literature and it was observed that, even distant from the theoretical values, the data obtained did not present great dispersion, which does not influence the analyzes about the profiles of fill.

Keywords: 3D Printing; Rotary Axis; 4° Axis; FDM; FFF.

RESPONSIBILITY NOTICE

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