

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO NAS RESISTÊNCIAS AO IMPACTO E À TRAÇÃO DE PEÇAS PRODUZIDAS PELO PROCESSO FUSED FILAMENT FABRICATION

Thiago de Oliveira Santos
Kauã Ferreira de Almeida
Kenji Fabiano Ávila Okada
Felipe dos Anjos Rodrigues Campos
Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila 2121, Uberlândia, MG
thiago.de@ufu.br; kau Almeida2013@hotmail.com; kenji_okada09@hotmail.com; filipin_anjos@hotmail.com;
leonardo.rrs@gmail.com

Álison Rocha Machado

Pontifícia Universidade Católica-PUC/PR, avenida Imaculada Conceição 1155, Curitiba/PR
alisonr.machado@gmail.com

Resumo: A manufatura aditiva pelo processo Fused Filament Fabrication (FFF) é um processo de fabricação que apresenta grande potencial por facilitar a produção de peças complexas e personalizadas de forma rápida, com baixo custo de produção e pouco desperdício de material, e que, com avanços tecnológicos na engenharia, tem sido muito utilizada em diversas áreas, como na engenharia ou medicina para prototipagem e até mesmo para a confecção de peças finais, como próteses, implantes e peças que costumavam ser produzidas por processos de fabricação mais demorados e que gastam mais matéria prima. Nesse método de produção a peça é produzida camada por camada usando, diretamente, dados oriundos de um modelo 3D computacional, o que possibilita a fabricação de peças não maciças, ou seja, cascas que são preenchidas apenas de forma parcial de acordo com a necessidade de resistência da peça. Porém, as peças produzidas por esse método de fabricação apresentam forte anisotropia, possuindo pouca resistência mecânica na direção em que é impressa. Sendo assim, torna-se um assunto de necessidade o estudo de parâmetros de impressão que otimizam a resistência mecânica das peças, aumentando também as possíveis situações em que essas peças podem ser empregadas. Neste sentido, foi observado neste trabalho como a resistência mecânica de uma peça pode mudar de acordo como a espessura da casca, altura de camada impressa e o infill (preenchimento da peça), já que são parâmetros que alteram a resistência mecânica, sem necessariamente um aumento de massa da peça, devido ao aumento do momento de inércia da peça, que aumenta com uma maior espessura de casca mais do que com a porcentagem de infill, consumindo menos material na produção da peça. Dessa forma, para analisar e conhecer os efeitos dos parâmetros citados na resistência mecânica da peça, foram produzidos corpos de prova com variação desses parâmetros de acordo com um planejamento fatorial completo de 3 variáveis em 2 níveis, e então foi realizada análise de variância com os dados de testes de resistência à tração realizados de acordo com a norma ASTM D638 e de resistência ao impacto realizados de acordo com a norma ASTM D4508. Foi possível analisar o quanto significativo é cada um desses parâmetros para o aumento da resistência mecânica da peça e como cada um deles com o outro, sendo que a espessura de casca se mostrou mais influente tanto nos resultados de impacto quanto de tração, com efeito significativo da altura de camada para os ensaios de impacto também.

Palavras-chave: Espessura de casca, altura de camada, infill, resistência mecânica, momento de inércia.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o avanço da engenharia, a manufatura aditiva tem evoluído de forma que deixou de ser usada apenas para prototipagem rápida e para representação 3D de projetos, para ser usada como um método de fabricação capaz de produzir diretamente peças finais. Dessa forma, a manufatura aditiva vem beneficiando diversas áreas além da mecânica como a arquitetura (Haridy, 2017), odontologia (Bhargav et al., 2017) e medicina (Konta et al., 2017) com a sua capacidade de produção de peças em pequena quantidade de forma mais rápida, simples, barata e com menor desperdício de material do que outros meios de fabricação, o que a torna um método de fabricação com grande potencial para a produção de peças personalizadas e com alto nível de complexidade.

A manufatura aditiva pelo processo Fabricação por Filamento Fundido (FFF) ou *Fused Filament Fabrication*, consiste na fabricação por extrusão de filamento fundido por um bocal móvel responsável por desenhar a peça camada por camada usando como base os dados provenientes de um modelo computacional 3D. Os materiais mais utilizados nesse método

de produção são os polímeros termoplásticos devido ao seu ponto de fusão não muito altos e propriedades mecânicas satisfatórias em temperatura ambiente, sendo alguns exemplos de materiais muito usados o ABS, PLA e PETG.

Devido à essa forma de fabricação, onde a peça é impressa camada por camada, as propriedades mecânicas das peças construídas por manufatura aditiva estão diretamente relacionadas à adesão entre os filamentos depositados e entre as camadas formadas por eles, sendo que a falta de adesão entre os filamentos acaba facilitando a nucleação e propagação de trincas conforme apresentado por (Safari et al., 2021). Dessa forma as peças produzidas por manufatura aditiva possuem forte anisotropia, apresentando falhas em testes de propriedades mecânicas como o de tração na direção ortogonal as camadas (Cole et al., 2016; Fernandez-Vicent et al., 2016), torção (Rodríguez et al., 2001), compressão (Percoco et al., 2012; Sood et al., 2012) e flexão (Sun et al., 2008). Assim, essa falta de resistência mecânica devido à baixa adesão entre as camadas ainda é um dos principais obstáculos e temas de pesquisa sobre manufatura aditiva.

A adesão entre os filamentos poliméricos extrudados está ligada a difusão molecular das cadeias poliméricas de um filamento para o outro e o entrelaçamento entre elas, sendo que essa difusão está ligada ao histórico de calor na peça como é apresentado por (Sun et al., 2008). Quando uma parte do filamento é extrudado, ele perde energia térmica para o ambiente e para as outras camadas, sendo que quanto maior o tempo que ela permanece com temperatura próxima a de transição vítrea do material maior é o tempo disponível para que as cadeias poliméricas difundam entre os filamentos extrudados e se entrelacem. Além disso, uma maior temperatura induz uma maior fluidez e molhabilidade do material depositado, o que consequentemente gera maior área de contato entre os filamentos, assim como representado na Fig. 1a. Na Fig. 1b também pode-se observar o efeito do aporte térmico na impressão 3D com polímeros, nela pode-se observar como os espaços entre os filamentos depositados é menor nas camadas inferiores, que são as que recebem maior quantidade de calor da mesa, que é aquecida, garantindo mais tempo para difusão e adesão das camadas.

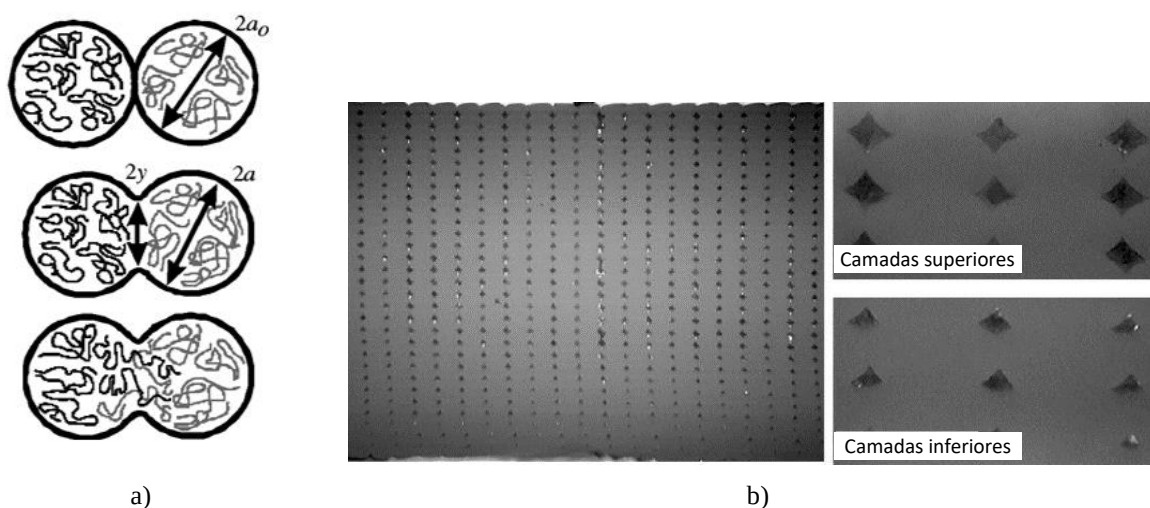


Figura 1. Mecanismo de adesão entre as camadas depositadas, dependente do entrelaçamento das cadeias poliméricas (Sun et al., 2008).

Assim, muitas das pesquisas que visam aumentar a resistência mecânica, ou reduzir a anisotropia das peças produzidas pelo processo FFF, analisam apenas os efeitos da variação de parâmetros que influenciam o histórico térmico da peça e a área de contato entre os filamentos extrudados. Entretanto, fatores como o momento de inércia também possuem importância para a resistência mecânica de uma peça, sendo necessário dar atenção a esse fator na hora de projetar uma peça e saber quais possuem maior influência no aumento da resistência mecânica.

Quando se projeta uma peça para ser impressa deve-se atentar ao preenchimento (*infill*) e a espessura da casca da peça pois um dos benefícios da impressão 3D é justamente a capacidade de produzir peças sem necessariamente serem maciças. Esses dois parâmetros influenciam diretamente no momento de inércia da peça uma vez que o momento de inércia é dado pelo somatório integral da massa de cada ponto da peça vezes o quadrado da distância ao centroide, ou seja, considerando a seção transversal retangular de um corpo de prova, teoricamente as regiões mais afastadas do centro são mais importantes para garantir uma maior resistência da peça. Sendo assim, uma maior espessura de casca maciça pode ser mais vantajosa do que um *infill* maior para o incremento de resistência mecânica.

Além desses dois parâmetros, um outro parâmetro importante de se avaliar ao projetar uma peça é a altura de camada, conforme observado na literatura (Percoco et al., 2021; Dey et al., 2019; Mahmood et al., 2017), sabe-se que uma menor altura de camada está relacionada a um aumento da resistência mecânica das peças fabricadas, além de resultar em um melhor acabamento da peça e diminuir os espaços intersticiais entre os filamentos, mostrados na Fig. 1b, o que consequentemente aumenta a densidade e resistência mecânica da peça. Mesmo que esses 3 parâmetros sejam atrativos, deve-se levar em conta que uma menor altura de camada assim como uma maior porcentagem de *infill* aumenta

consideravelmente o tempo de produção. Além disso, o *infill* gera um aumento de massa muito maior do que a espessura da casca.

Dessa forma, como cada um desses parâmetros possui suas vantagens e desvantagens, são necessários estudos para conhecer o quão influente cada um desses parâmetros pode ser para a otimização das propriedades mecânica de peças produzidas pelo processo FFF, levando em conta o tempo de impressão e a densidade da peça. Nesse sentido, utilizando um planejamento fatorial completo, de 3 variáveis em 2 níveis cada, para a produção dos corpos de prova, essa pesquisa visou estudar como esses parâmetros podem alterar a resistência mecânica de peças produzidas pelo processo FFF por meio da alteração da área de seção resistente, e entender qual desses fatores possui influência mais significativa na resistência à tração e ao impacto com o menor consumo de tempo de produção e material.

2. METODOLOGIA

2.1. Preparação das Amostras

Os ensaios de impacto e tração foram realizados com amostras de ácido polilático (PLA), sendo que o filamento utilizado foi um PLA comum da marca 3DFila. Os corpos de prova foram produzidos por manufatura aditiva utilizando uma impressora 3D Creality Ender 3. Nos dois tipos de teste os parâmetros de entrada avaliados foram altura de camada, espessura de casca e preenchimento da peça, enquanto os parâmetros de saída foram a energia absorvida pela amostra e o limite de resistência à tração. Os corpos de prova para cada um dos dois testes foram produzidos variando-se esses parâmetros de entrada de acordo com um planejamento fatorial completo, resultando nas 8 condições apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Planejamento experimental do tipo fatorial completo 2³.

Condição	Altura de camada [mm]	Espessura de casca [mm]	Preenchimento [%]
1	0,1	0,8	40
2	0,1	0,8	60
3	0,1	1,2	40
4	0,1	1,2	60
5	0,2	0,8	40
6	0,2	0,8	60
7	0,2	1,2	40
8	0,2	1,2	60

Os parâmetros foram escolhidos com uma diferença de 50 % (1,2 mm/0,8 mm de espessura de casca e 60 %/40 % de *infill*) pois já se sabe que um *infill* ou espessura de casca muito maior aumentariam a resistência mecânica. Sendo assim, a intenção foi observar se pequenas alterações nesses parâmetros afetariam os resultados, e a significância de um parâmetro em relação aos outros. Vale ressaltar que a altura de camada não teve uma mudança de 50 % porque deveria ser escolhido um valor de forma que não fossem geradas alterações dimensionais no corpo de prova, ou seja, a espessura do corpo de prova de 3,2 mm sugerida pela norma deveria ser um múltiplo de ambos valores de altura de camada escolhidos. Esse cuidado é necessário pois caso contrário, o software de fatiamento 3D poderia arredondar os valores e afetar a dimensão final do corpo de prova.

Para cada combinação de parâmetros apresentada na Tab. 1, foram produzidos 3 corpos de prova para cada condição nos dois ensaios mecânicos realizados, totalizando 48 corpos de prova produzidos. Embora as normas ASTM D256 e ASTM D638 recomendem a avaliação de pelo menos 5 amostras para cada condição de teste, houve restrições de tempo e recursos durante a fabricação das amostras.

Cada peça foi impressa individualmente para evitar que uma peça permanecesse recebendo calor da mesa após já ter sido impressa, enquanto as outras estivessem em processo de impressão, pois isso proporciona mais tempo para difusão das cadeias poliméricas em relação as outras peças podendo gerar imprecisão nos resultados. Além disso, outros parâmetros que não estavam sendo analisados foram fixados para todos os corpos de prova, sendo eles iguais às configurações padrões do software de fatiamento Ultimaker Cura configurado de acordo com a impressora utilizada e para o uso de PLA genérico. Dentre esses parâmetros que foram fixados, a temperatura do bico extrusor e temperatura da mesa de impressão foram, respectivamente, 200 °C e 50 °C.

2.2. Ensaios de Impacto

Os ensaios de impacto Izod tipo C foram realizados de acordo com as recomendações da norma ASTM D256, usando corpos de prova com as dimensões apresentados na Fig. 2. Também vale ressaltar que os corpos de prova de impacto foram impressos com orientação das camadas assim como apresentado na Fig. 3. O entalhe foi definido já no modelo

CAD, ou seja, não foi feito após a impressão da peça com algum processo de usinagem, sendo esse um parâmetro que afeta os resultados de resistência mecânica (Patterson et al., 2019) e por isso precisa ser fixado para todos os corpos de prova.

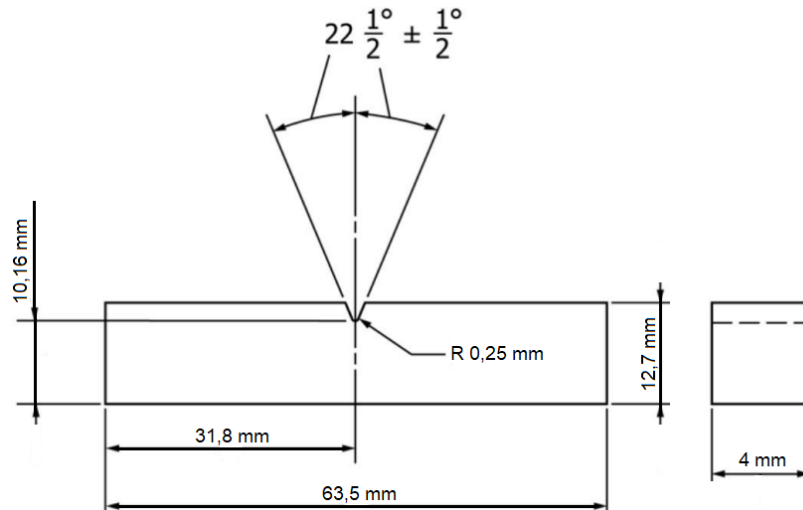


Figura 2. Exemplo de corpo de prova para ensaios IZOD tipo C (ASTM D256).

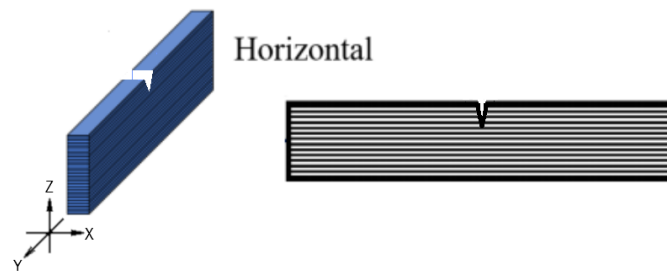


Figura 3. Orientação das camadas utilizadas nos corpos de prova de impacto (Patterson et al, 2019).

Os testes de impacto foram realizados em uma máquina de ensaios de impacto adaptada do trabalho de Tsuruta (2008), utilizando um pêndulo com massa de 0,99 kg e comprimento de 0,778 m, o que resultou numa energia do pêndulo de 1,79 J ao liberá-lo do repouso a partir de uma inclinação de -30° com a horizontal, para todos os ensaios. Nessas condições, a ponta da barra impactava as amostras com uma velocidade de aproximadamente 4 m/s, o que fornece uma ideia da taxa de cisalhamento do material.

2.3. Ensaios de Tração

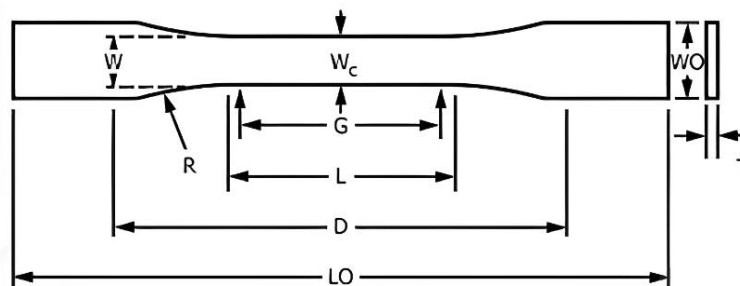


Figura 4. Exemplo de corpo de prova para tração do tipo V (ASTM D638-14).

Os ensaios de tração foram efetuados seguindo as recomendações da norma ASTM D638-14, com corpos de prova do tipo V com 4 mm de espessura, assim como apresentado na Figura 4. Entretanto, diferentemente dos corpos de prova de impacto, os corpos de prova de tração foram impressos com a sua face maior paralela à mesa de impressão. Ainda assim, ressalta-se que em ambos os ensaios as principais forças agem no sentido longitudinal da amostra, alinhadas com a direção das camadas depositadas. Isso é evidente no ensaio de tração, e também pode ser constatado no ensaio de impacto, onde a fratura decorre do efeito de flexão e estiramento das camadas.

Para a realização dos ensaios de tração foi utilizada uma máquina universal hidráulica Pavitest 5T I-4214 para testes uniaxiais, com controle elétrico e velocidade de teste de 0,1 mm/s. O sistema de aquisição utilizado se baseou em uma célula de carga digital adaptada a máquina, com faixa nominal de 0 a 50 kg e resolução de 0,01 kg.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaios de Impacto

Com os valores de energia absorvida pela amostra no impacto, foi montado o gráfico apresentado na Fig. 5, onde estão apresentados os valores das médias de energia de impacto por metro (EI), referente a cada combinação das variáveis de entrada analisadas.

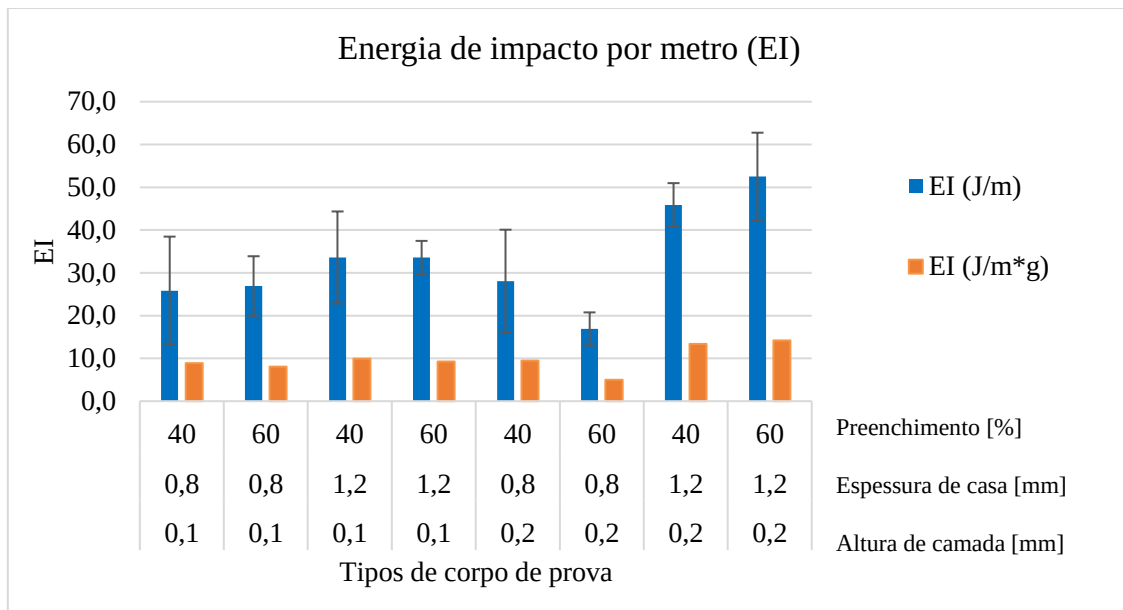


Figura 5. Variação dos resultados de energia absorvida pela amostra com cada combinação de variáveis.

Analisando a Figura 5, pode-se observar que os corpos de prova com espessura de casca maior absorveram maior energia de impacto em relação aos outros corpos de prova. Isso pode estar relacionado ao fato de que o aumento da casca gera um aumento da seção resistente, sendo as regiões externas mais importantes para a resistência mecânica da peça. Isso fica mais evidente ao observar que mesmo dividindo as resistências pelas massas dos corpos de prova, as peças com maior espessura de casca tiveram maior resistência comparada com as outras.

Também, pode-se observar que o *infill* não apresentou grandes alterações nos resultados em relação a espessura de casca. Esse resultado pode estar relacionado com a forma como a carga é distribuída ao ser aplicada ao corpo de prova, sendo que possivelmente o impacto do pêndulo gerou tensões e contrações maiores na parte externa da peça do que no centro tornando o preenchimento pouco relevante para uma maior resistência da peça.

Tabela 2. Tempo de impressão para cada combinação de parâmetros no ensaio de impacto.

Altura de camada [mm]	Espessura de casca [mm]	Infill [%]	Tempo de impressão [min]
0,1	0,8	40	52
0,1	0,8	60	59
0,1	1,2	40	59
0,1	1,2	60	66
0,2	0,8	40	26
0,2	0,8	60	30
0,2	1,2	40	30
0,2	1,2	60	33

A influência da altura de camada foi diferente do que se esperava, apesar de não ter sido tão significativa. Ao invés de aumentar a resistência mecânica com uma menor altura de camada, observa-se uma diminuição da resistência de algumas peças. Inicialmente esperava-se que uma menor rugosidade da peça juntamente com menores espaços intersticiais, provenientes de uma menor altura de camada, resultassem em menos concentradores de tensão na peça, além de uma

maior adesão entre camadas devido a exposição prolongada ao calor, considerando o maior tempo de produção dessas peças. Entretanto, pode ser que o calor tenha sido suficiente para tornar a peça menos dúctil devido a cristalização das cadeias poliméricas (Samy et al., 2021), sendo algo negativo para a resistência ao impacto, onde a ductilidade é importante. Pode-se observar que o tempo de produção das peças com menor altura de impacto é quase o dobro das outras, o que significa que o material passa muito mais tempo recebendo calor do bocal e da mesa aquecida, que podem ser suficientes para alterar as propriedades de um termoplástico de baixa temperatura de transição vítrea como o PLA (Sharafi et al., 2021).

Além disso, o fato de uma maior altura de camada não ter piorado a resistência ao impacto pode estar relacionado com a impressão da peça em camadas perpendiculares a direção de impacto, o que tornou o efeito da rugosidade pouco significativo, já que o entalhe já servia como um concentrador de tensões muito mais relevante. No gráfico também pode-se observar que em alguns casos com parâmetros semelhantes, onde o *infill* era a única diferença, peças com 40 % de *infill* tiveram melhor resultado, o que se afasta dos resultados encontrados na literatura e também pode ser explicado por esse maior tempo de exposição a temperatura, devido ao maior tempo de produção com *infill* mais longo. A Tab. 2 apresenta o tempo de impressão para cada combinação de parâmetros dos corpos de prova de impacto.

Essas observações estão de acordo com os efeitos observados na Fig. 6, obtidas pela análise de variância – ANOVA, feita por meio do software Statistica 12. Os dados apresentados mostram que a espessura de casca e a combinação da espessura de casca com altura de camada são os únicos fatores que foram significativos, para um índice de confiabilidade de 95 %, sendo que a espessura de casca possui uma significância muito maior que os outros parâmetros e combinações.

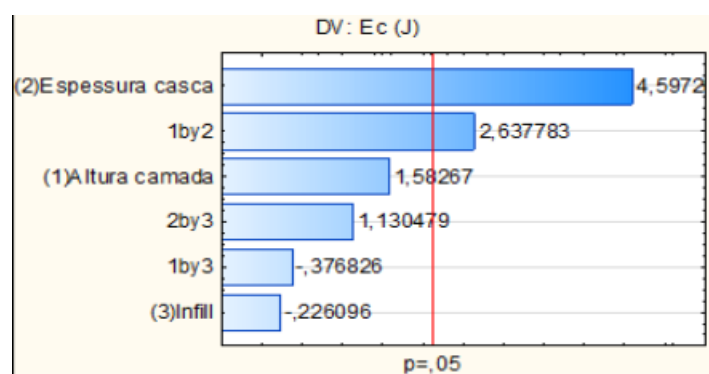


Figura 6. Gráfico de Pareto mostrando significância das variáveis de entrada para a resistência ao impacto (E_c), segundo ANOVA.

Ao comparar os resultados da Figura 5 com outros resultados encontrados na literatura, como o resultado de 113,21 J/m encontrado por (Patterson et al., 2019) em testes Izod realizados em corpos de prova também de PLA, observa-se que os resultados obtidos neste trabalho são menores. Entretanto, apesar de que o corpo de prova utilizado em sua pesquisa possuía menor espessura, o fato de que ele era maciço e que o teste Izod utilizado foi do tipo E, onde o pêndulo acerta o corpo de prova no lado oposto ao chanfro, pode ser uma explicação para essas diferenças nos resultados.

3.2. Ensaio de Tração

As variações dos valores de limite de resistência a tração para as diferentes combinações de variáveis de entrada utilizadas nos corpos de prova de tração estão apresentadas no gráfico da Fig. 7. Analisando o gráfico fica evidente que todos os corpos de prova com maior espessura de casca apresentaram maior tensão de ruptura em relação aos outros, assim como observado anteriormente com os ensaios de impacto. Isso pode ser explicado pelo fato de que os corpos de prova de tração foram impressos de forma que os filamentos da casca eram depositados paralelamente ao eixo de tração, o que aumenta a resistência independente da adesão entre camadas. Essa observação é reforçada com os resultados obtidos pela análise de variância – ANOVA, feita por meio do software Statistica 12, que estão apresentados na Fig. 8. Analisando esses resultados, pode-se observar que a espessura de casca realmente possui uma relevância muito maior que os outros parâmetros.

Pode-se perceber pela Fig. 8 que assim como a espessura de casca a sua combinação com a altura de camada também foi estatisticamente significativa para um nível de confiança de 95 %, sendo que os outros parâmetros não atingiram esse nível de confiança. Pelo gráfico da Figura 7 pode-se ser notado também que muitas peças com 40 % de *infill* apresentaram melhor resultado comparado a combinações onde só o *infill* era a diferente. Observando-se a Tab. 3 pode-se observar que o tempo de impressão foi ligeiramente menor para as peças mais resistentes, o que pode indicar que a exposição a temperatura pode ter novamente prejudicado os resultados nos ensaios de tração, assim como nos de impacto. É possível também que, uma vez que a espessura de casca seja mais importante para a resistência da peça, o *infill* possa ter um efeito contrário, com os pontos de contato entre preenchimento e casca servindo como concentradores de tensão e pontos de

nucleação e propagação de trincas quando a peça é mecanicamente solicitada. Isso explicaria porque mesmo nas peças com maior seção resistente, a tensão de ruptura normalizada pela massa pode ficar menor.

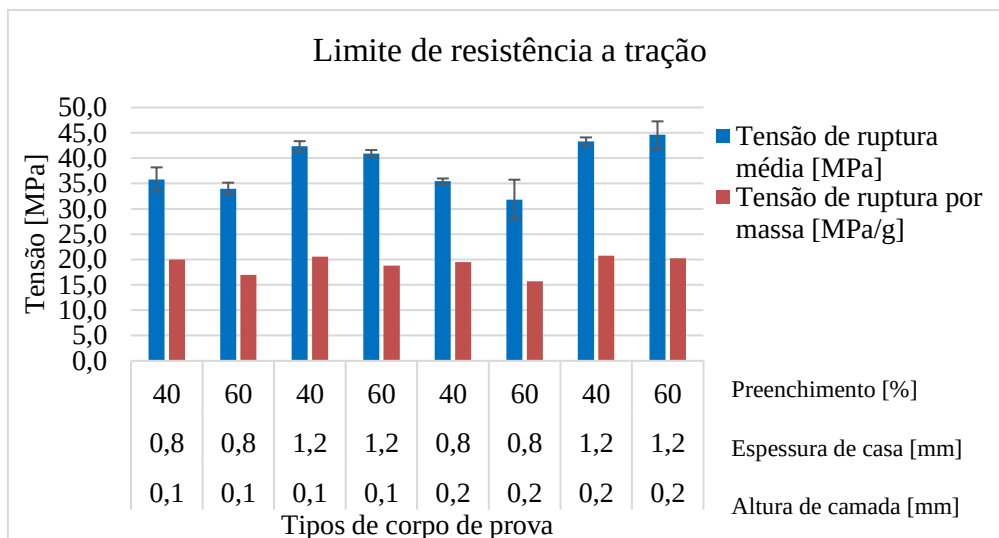


Figura 7. Variação dos resultados de limite de resistência a tração para cada combinação de variáveis.

Tabela 3. Tempo de impressão para cada combinação de parâmetros no ensaio de tração.

Altura de camada [mm]	Espessura de casca [mm]	Infill [%]	Tempo de impressão [min]
0,1	0,8	40	28
0,1	0,8	60	31
0,1	1,2	40	33
0,1	1,2	60	35
0,2	0,8	40	14
0,2	0,8	60	15
0,2	1,2	40	17
0,2	1,2	60	18

Comparando os resultados de limite de resistência à tração obtidos neste trabalho com os obtidos por (Hanon et al., 2021), que estuda o limite de resistência a tração para diferentes combinações de parâmetros de impressão, incluindo direção de impressão, pode-se observar que os valores encontrados neste trabalho estão dentro da faixa de valores esperada para impressões utilizando PLA.

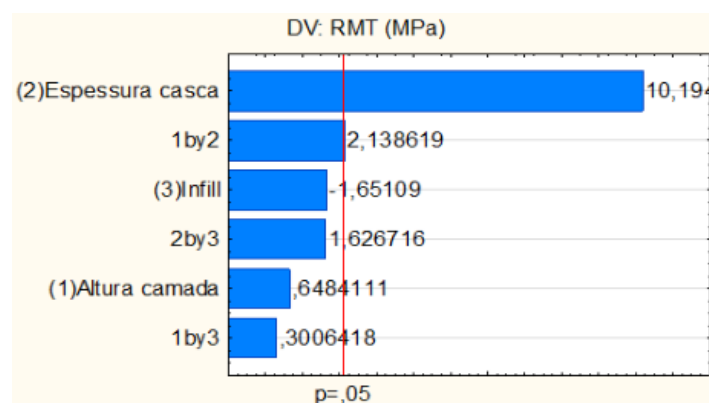


Figura 8. Gráfico de Pareto mostrando significância das variáveis de entrada para o valor da resistência máxima à tração (RMT), segundo ANOVA.

4. CONCLUSÃO

A análise de significância, feita com base nos resultados obtidos por meio da metodologia adotada, permite melhorar o entendimento sobre a importância da espessura de casca, altura de camada e preenchimento da peça quando se projeta

uma peça para ser produzida pelo processo FFF, podendo também servir como comparação para trabalhos futuros nessa área. Nos testes realizados, a resistência ao impacto e tração sofreu uma influência muito maior da espessura de casca do que para os outros parâmetros e combinações para casos em que as forças são aplicadas paralelamente ao plano das camadas da peça. Além disso, foi observado que a exposição à temperatura por maiores períodos pode acabar influenciando negativamente a resistência mecânica, indicando que é necessário a realização de mais estudos para encontrar uma combinação ideal de parâmetros de impressão. Além disso, foi levantada a possibilidade de que maiores valores de *infill* também podem criar mais pontos de concentração de tensão no contato com as paredes externas da peça, e que são mais importantes para a resistência mecânica. Consequentemente, esse fenômeno poderia explicar porque peças com maiores preenchimentos tiveram valores menores de resistência em alguns dos testes realizados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), ao Laboratório de Mecânica das Estruturas (LMEST-UFU) e ao Centro Universitário UNA de Uberlândia pelo apoio na realização dos experimentos.

6. REFERÊNCIAS

- Bhargav, A., Sanjairaj, V., Rosa, V., Feng, L. W., & Fuh YH, J. (2018). Applications of additive manufacturing in dentistry: A review. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 106(5), 2058-2064.
- Cole, D. P., Riddick, J. C., Iftexhar Jaim, H. M., Strawhecker, K. E., & Zander, N. E. (2016). Interfacial mechanical behavior of 3D printed ABS. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(30).
- Dey, A., & Yodo, N. (2019). A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 64.
- Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. *3D printing and additive manufacturing*, 3(3), 183-192.
- Hanon, M. M., Marczis, R., & Zsidai, L. (2021). Influence of the 3D printing process settings on tensile strength of PLA and HT-PLA. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 65(1), 38-46.
- Haridy, R. (2017). Get over it: Madrid gets world's first 3D printed footbridge.
- Konta, A. A., García-Piña, M., & Serrano, D. R. (2017). Personalised 3D printed medicines: which techniques and polymers are more successful?. *Bioengineering*, 4(4), 79.
- Mahmood, S., Qureshi, A. J., Goh, K. L., & Talamona, D. (2017). Tensile strength of partially filled FFF printed parts: experimental results. *Rapid prototyping journal*.
- Patterson, A. E., Pereira, T. R., Allison, J. T., & Messimer, S. L. (2019). IZOD impact properties of full-density FDM polymer materials with respect to raster angle and print orientation. *Proceedings of IMECHE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science XX (X)*, 1, 13.
- Percoco, G., Arleo, L., Stano, G., & Bottiglione, F. (2021). Analytical model to predict the extrusion force as a function of the layer height, in extrusion based 3D printing. *Additive Manufacturing*, 38, 101791.
- Percoco, G., Lavecchia, F., & Galantucci, L. M. (2012). Compressive properties of FDM rapid prototypes treated with a low cost chemical finishing. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(19), 3838-3842.
- Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E. (2001). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation. *Rapid Prototyping Journal*.
- Samy, A. A., Golbang, A., Harkin-Jones, E., Archer, E., Tormey, D., & McIlhagger, A. (2021). Finite element analysis of residual stress and warpage in a 3D printed semi-crystalline polymer: Effect of ambient temperature and nozzle speed. *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 389-399.
- Sharafi, S., Santare, M. H., Gerdes, J., & Advani, S. G. (2021). A review of factors that influence the fracture toughness of extrusion-based additively manufactured polymer and polymer composites. *Additive Manufacturing*, 38, 101830.
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2012). Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 81-90.
- Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., & Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid prototyping journal*.
- Tsuruta, K. M. (2008). *Monitoramento de integridade estrutural de materiais compostos sujeitos a impactos empregando a técnica da impedância eletromecânica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF PRINTING PARAMETERS ON IMPACT AND TENSILE RESISTANCE OF PARTS PRODUCED BY THE FUSED FILAMENT FABRICATION PROCESS

Thiago de Oliveira Santos
Kauã Ferreira de Almeida
Kenji Fabiano Ávila Okada
Felipe dos Anjos Rodrigues Campos
Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Federal University of Uberlândia, 2121, João Naves de Ávila avenue, Uberlândia, MG
thiago.de@ufu.br; kaulmeida2013@hotmail.com; kenji_okada09@hotmail.com; filipin_anjos@hotmail.com;
leonardo.rrs@gmail.com

Álison Rocha Machado

Pontifical Catholic University-PUC/PR, 1155, Imaculada Conceição avenue, Curitiba/PR
alissonr.machado@gmail.com

Resumo: Additive manufacturing by the Fused Filament Fabrication (FFF) process is a manufacturing process that has great potential for facilitating the production of complex and customized parts quickly, with low production costs and little material waste, and that, with technological advances in engineering, it has been widely used in several areas, such as engineering or medicine for prototyping and even for the manufacture of final parts, such as prostheses, implants and parts that used to be produced by longer manufacturing processes and that use more raw materials. In this production method, the part is produced layer by layer using, directly, data from a 3D computational model, which makes it possible to manufacture non-massive parts, that is, shells that are only partially filled according to the need for part resistance. However, the parts produced by this manufacturing method have strong anisotropy, having little mechanical resistance in the direction in which it is printed. Therefore, it becomes a matter of necessity to study printing parameters that optimize the mechanical resistance of the parts, also increasing the possible situations in which these parts can be used. In this sense, it was observed in this work how the mechanical resistance of a part can change according to the thickness of the shell, height of the printed layer and the infill (filling of the part), since they are parameters that alter the mechanical resistance, without necessarily a Mass increase of the part, due to the increase in the moment of inertia of the part, which increases with a greater thickness of shell more than with the percentage of infill, consuming less material in the production of the part. Thus, in order to analyze and know the effects of the aforementioned parameters on the mechanical strength of the piece, specimens were produced with variation of these parameters according to a complete factorial design of 3 variables at 2 levels, and then an analysis of variance was performed with the data from tensile strength tests performed according to ASTM D638 standard and impact resistance carried out according to ASTM D4508 standard, which made it possible to analyze how significant each of these parameters is for increasing the mechanical strength of the part and how each of them stands out in relation to the other, with coat thickness being the most influential.

Palavras-chave: Shell thickness, layer height, infill, mechanical strength, moment of inertia.

RESPONSIBILITY NOTICE

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