

ANÁLISE DOS EFEITOS DO RECOZIMENTO NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE PEÇAS POLIMÉRICAS IMPRESSAS POR FFF

Kauã Ferreira de Almeida
Pedro Henrique Veiga-Oliveira
Thiago Oliveira Santos
Lucas Oliveira Borges
Pedro Augusto Souza da Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, av. João Naves de Ávila 2121, 38408-100, Uberlândia/MG

kaua.almeida@ufu.br; pedroh.veiga.o@gmail.com; thiago.de@ufu.br; lobchute@gmail.com; pedrosouza2390@gmail.com

Rafael Rodrigues Mariano

Centro Universitário-UNA, alameda Paulina Margonari 59, Uberlândia/MG
rafa.rodrigues.mariano@gmail.com

Resumo: A manufatura aditiva pelo processo FFF (Fused Filament Fabrication) é uma das técnicas de impressão 3D mais utilizadas atualmente, a qual consiste na extrusão de um filamento termoplástico, alimentado continuamente a partir de um carretel, através de um bocal extrusor aquecido para deposição do material em camadas. Nesse processo, o polímero depositado sofre resfriamento rápido para solidificação da camada, e depois é reaquecido com a deposição das camadas superiores, tornando importante o estudo das propriedades do termoplástico de acordo com a história térmica da peça, sobretudo em relação a temperatura de transição vítrea (T_g) e a temperatura de cristalização (T_c). A primeira indica a temperatura a partir da qual as cadeias poliméricas ganham mobilidade, e se relaciona com a adesão entre as camadas depositadas. Já a segunda marca a tendência de organização das macromoléculas em cristais, que normalmente tornam o material mais resistente, porém menos dúctil. Por conta desse fenômeno, as propriedades mecânicas das peças impressas por FFF se tornam dependentes de parâmetros como a velocidade de impressão, temperatura do bocal, da mesa, e altura de camada, além de operações de pós-processamento como o recozimento. Nesse sentido, este trabalho buscou avaliar a influência dos parâmetros de impressão citados e do recozimento na resistência ao impacto de peças de ácido polilático (PLA) fabricadas por FFF. Foi utilizado um planejamento experimental do tipo fatorial completo com 2 níveis e 3 variáveis (2^3), que permitiu uso da análise de variância (ANOVA) para identificar quais os fatores mais significativos para a resistência ao impacto avaliada segundo a norma ASTM D4508. O recozimento foi identificado como o parâmetro mais influente, uma vez que apenas 20 minutos de recozimento foram suficientes para aumentar a resistência média das peças em mais de 300 %. A mudança de cristalinidade ficou evidente pela opacidade das peças recozidas em comparação às peças translúcidas obtidas por impressão. A análise da superfície de fratura por microscopia óptica também mostrou que o recozimento foi eficiente em aumentar a adesão entre camadas, reduzindo os defeitos típicos dessa técnica de impressão. Os resultados demonstraram notável eficácia do processo de recozimento na melhoria das propriedades das peças, assinalando uma estratégia de ótimo custo-benefício para os segmentos industriais e de consumidores profissionais relacionados a impressão por FFF

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Recozimento; Resistência ao impacto; Cristalinidade

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, devido à facilitação do acesso a softwares de modelagem e impressoras 3D, a manufatura aditiva por extrusão tem ganhado destaque em pesquisas, visto seu custo relativamente baixo, curto tempo de produção e boa precisão geométrica das peças. Essa tecnologia é denominada de Fabricação por Filamento Fundido (FFF) ou *Fused Filament Fabrication*, processo que ocorre por meio de um filamento termoplástico extruído por um bocal aquecido até o ponto de fusão do polímero, o qual deposita o material em camadas e formas conforme indicadas por um modelo tridimensional digital, até se chegar ao resultado desejado (Sood et al, 2010). Existem diversos polímeros que podem ser utilizados para a realização de tais impressões, sendo os mais usuais o ABS e o PLA, o qual foi utilizado nesta pesquisa.

Apesar das vantagens do processo, um dos principais aspectos negativos da manufatura aditiva por FFF é com relação a porosidade do sólido final, pois como a peça é fabricada por camadas de filamentos, o processo de deposição deixa uma quantidade considerável de regiões não preenchidas, e tal fator contribui para uma menor resistência do produto final. Esse fenômeno pode ser verificado na Figura 1, na qual fica evidente também que a falta de contato entre as camadas depositadas impede o entrelaçamento entre as cadeias poliméricas, que é o principal mecanismo de adesão interfacial nas peças impressas (Sun et al, 2008).

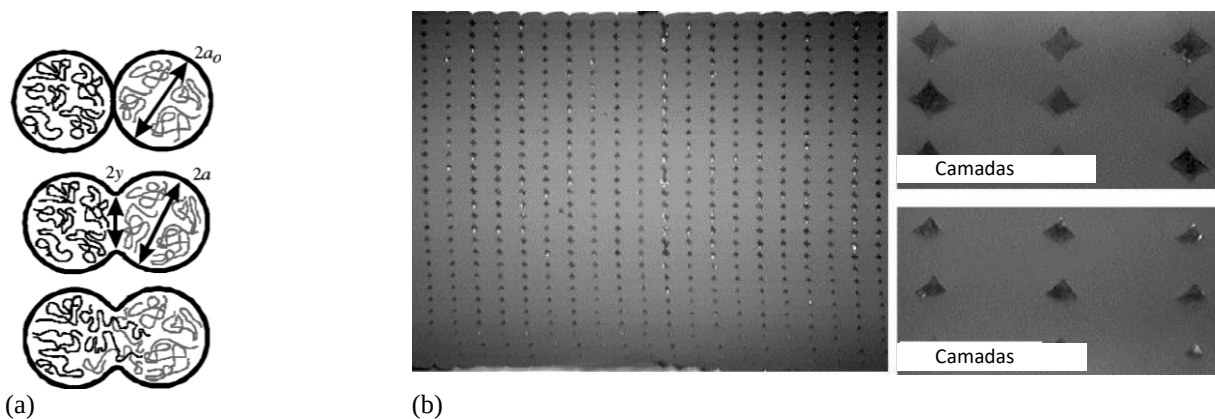


Figura 1. (a) Mecanismo de sinterização e difusão molecular. (b) Análise dos interstícios entre as fileiras e camadas, revelando maior adesão na parte inferior da peça que passou mais tempo acima da temperatura de transição vítrea.

Adaptado de Sun et al (2008)

A resistência da peça produzida por FFF também depende diretamente do seu histórico térmico, visto que quando o material é extrudado pelo bocal, o mesmo sofre perdas de sua energia térmica para o meio e para as demais camadas, resfriando-se até valores próximos à temperatura ambiente. Nesse período em que o material permanece acima da sua temperatura de transição vítrea (T_g), as cadeias poliméricas têm alta mobilidade rotacional e podem tanto entrelaçar-se com as cadeias das camadas adjacentes (aumentando a adesão) ou cristalizar-se, dependendo do tipo de polímero (Hart et al, 2020). No caso do PLA, geralmente impresso em torno de 200 °C e com T_g próxima de 50°C segundo Vaes e Puyvelde (2021), as cadeias estão inicialmente desordenadas após saída do bico, caracterizando o estado amorfo, e tendem a cristalizar à medida que a temperatura diminui. O teor de cristalização depende da velocidade de resfriamento e/ou do tempo em que o polímero permanece acima da sua T_g , sendo influenciado, portanto por parâmetros de impressão como a temperatura de mesa, temperatura de bocal, potência de resfriamento da ventoinha (Torres et al, 2016). Isso se torna importante para as características finais porque o nível de cristalinidade se relaciona com as propriedades mecânicas, com a resistência química e térmica, e com a translucidez das peças impressas (Gao et al, 2021).

Considerando esse déficit com relação à resistência das amostras, diversas pesquisas buscam avaliar quais parâmetros mais contribuem para melhorar essa propriedade. Muitos estudos já demonstraram por exemplo como o maior preenchimento e espessura de parede são benéficas para a resistência mecânica (Aliheidari et al, 2017). Entretanto, tais critérios de impressão elevam os gastos de material e tempo significativamente, de modo que o custo de uma peça com essas condições seria menos viável. Ao mesmo tempo, vários trabalhos também já exploraram possibilidades de otimização dos parâmetros térmicos para melhoria da resistência da peça, inclusive com a utilização de pós-tratamento por recozimento (Bhandari et al, 2019). Nesses casos, geralmente os pesquisadores empregam intrincados modelos analíticos e computacionais junto de análises de tenacidade à fratura em equipamentos de alto custo para explicar a mudança de comportamento do material.

Nesse sentido, este trabalho buscou abordar, de maneira menos complexa e por equipamentos mais baratos, como os fenômenos térmicos alteram as propriedades das peças impressas. Assim, utilizando um planejamento experimental do tipo fatorial completo, foi avaliado como as temperaturas de bocal e mesa, e o processo de recozimento dos sólidos após a impressão alteram a resistência ao impacto e a cristalinidade da amostra. Para tal, foi aplicado o ensaio do tipo Izod nas amostras de PLA, analisando-se a energia absorvida na fratura, a superfície de fratura e a opacidade das amostras a um feixe de luz. A análise estatística dos dados permitiu a determinação de quais parâmetros são estatisticamente significativos para mudanças das propriedades da peça, e fornecem uma alternativa interessante ao estudo do comportamento dos materiais impressos.

2. METODOLOGIA

2.1 Preparo das Amostras

As peças utilizadas nos ensaios de impacto foram impressas a partir de filamentos de ácido polilático (PLA) natural, de 1,75 mm, da marca 3DFila. As amostras dos testes foram produzidas por manufatura aditiva pelo método Fused Filament Fabrication (FFF) através de uma impressora 3D Creality Ender 3 e foram divididas em 8 tipos de corpos de prova, cada tipo impresso em diferentes parâmetros segundo um planejamento experimental do tipo fatorial completo em 2 níveis e 3 variáveis (2^3), conforme exposto na Tab. 1, para avaliação da influência da temperatura de mesa, temperatura de bocal e pós-tratamento nas características de resistência das peças impressas. Ressalta-se que durante as impressões, todos os outros parâmetros mantiveram-se constantes, como a altura de camada (0,2 mm), a velocidade de impressão (50 mm/s), o tamanho de bocal (0,4 mm), entre outros.

Tabela 1. Planejamento experimental do tipo fatorial completo 2^3

Teste	Tmesa (°C)	Tbocal (°C)	Recozimento
A	85	215	SEM
B	85	200	SEM
C	50	215	SEM
D	50	200	SEM
E	85	215	COM
F	85	200	COM
G	50	215	COM
H	50	200	COM

2.2 Recozimento

A influência do pós-tratamento por recozimento foi estudada submetendo as peças a aquecimento controlado em forno elétrico. Metade das peças impressas foram recozidas em um forno elétrico de tamanho 10 L, da marca Britânia, com potência de 1050 W e um timer que permite o desligamento automático. As amostras foram colocadas dentro do equipamento antes do seu acionamento, e recozidas por 20 minutos em uma faixa de temperatura em torno de 100 °C a 120 °C como demonstrado no gráfico da Fig. 2. A temperatura interna do forno foi medida através de 4 termopares tipo K associados a módulos MAX31855 conectados a um microcontrolador do tipo Arduino Uno com processador ATmega 328. Os dados foram obtidos utilizando o Arduino como placa de aquisição de sinais conectada a um notebook, com registro dos dados pelo software CoolTerm 2.0. Após a finalização do recozimento e do desligamento do forno, as peças foram mantidas em seu interior por 20 minutos para resfriamento antes da manipulação.

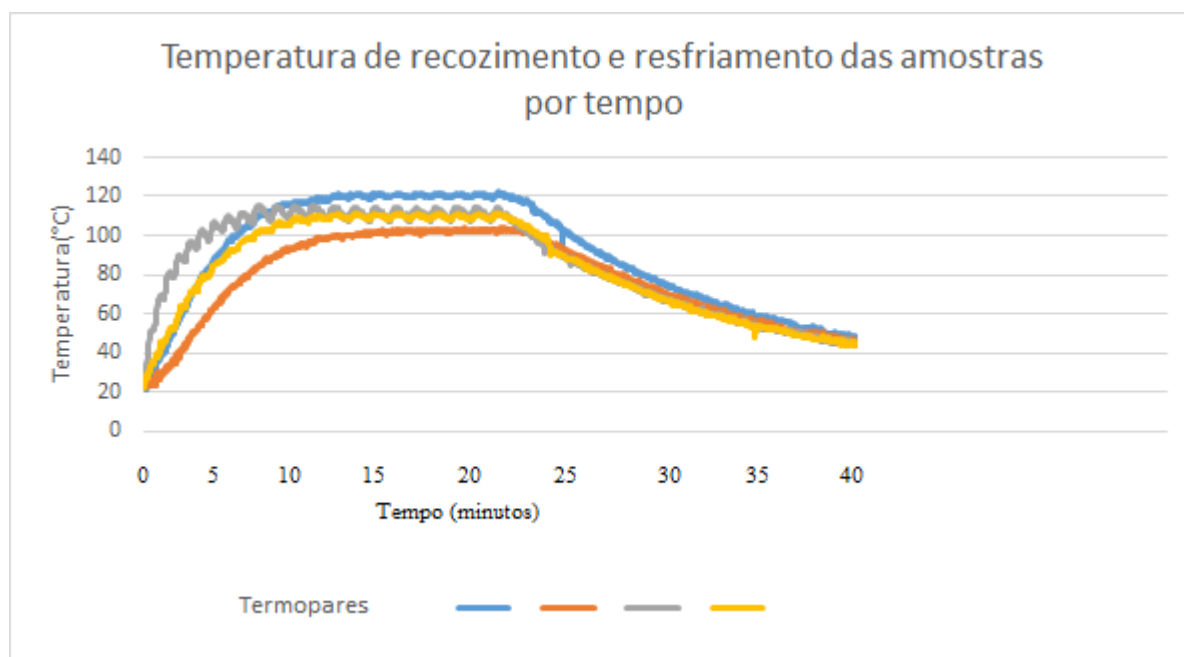


Figura 2. Gráfico da temperatura de recozimento e resfriamento da amostra por tempo.

2.3. Ensaio de impacto

Os ensaios de impacto do tipo Izod foram realizados segundo a norma ASTM D4508 com o intuito de obter dados da energia absorvida pela amostra durante sua fratura, a fim de avaliar a influência dos parâmetros térmicos na resistência das peças a cargas dinâmicas. Os corpos de prova têm o formato de um paralelepípedo reto com comprimento, altura e largura de, respectivamente, 19 mm, 12 mm e 3 mm, de forma que o tamanho reduzido permitiu a impressão mais rápida das amostras e configurou uma vantagem desta norma em relação às outras utilizadas para avaliação de resistência ao impacto. O pêndulo utilizado tem o comprimento de 0,778 m (distância da ponta do pêndulo ao centro de rotação), com massa total de 0,992 kg e centro de massa a 0,378 m do centro de rotação. O pêndulo foi levantado a 90° de inclinação em relação a peça, ficando paralelo à base horizontal da máquina de teste de impacto, resultando numa energia total de 3,68 J e numa velocidade de impacto de 5,6 m/s ao atingir a amostra. Todos os ensaios seguiram esses padrões e, no

cálculo final da energia absorvida pelo corpo de prova, foi descontada a parcela de energia do pêndulo convertida em energia cinética da parte fraturada da amostra, arremessada após impacto do pêndulo.

A calibração do pêndulo foi feita utilizando a função de gravação de vídeo no modo de câmera lenta, que tem a capacidade de registrar 240 frames por segundo (FPS), analisando a distância percorrida por ele entre um frame e outro, com um papel milimetrado que se posicionava de trás do pêndulo. Assim, foi possível descobrir a velocidade de impacto do pêndulo na amostra, e conhecendo sua massa, pôde-se calcular a energia utilizada no seu movimento, quando este não impacta com nenhum outro corpo.

Para a captura de dados da absorção de energia do pêndulo pela amostra, foi utilizado um sensor do tipo encoder preso ao eixo da barra, para medição da inclinação máxima atingida pelo pêndulo. O encoder consiste em um disco de diâmetro aproximado 220 mm com 360 furos de largura 1 mm igualmente espaçados em 1 mm na borda do disco, associados a um módulo ótico de maneira semelhante a indicada na Figura 3a. O módulo LM393 utilizado pode ser visto na Figura 3b, enquanto a montagem na máquina foi feita conforme exemplificado na Figura 3c, com o disco do encoder substituindo a escala de ponteiros. O sinal do sensor também era verificado num microcontrolador tipo Arduino, que se conectava por cabo USB a um celular. A programação utilizada informava ao operador o ângulo deslocado pelo pêndulo com uma precisão de 0,5°, possibilitando calcular a altura máxima atingida pelo pêndulo em comparação com a altura inicial no momento da soltura.

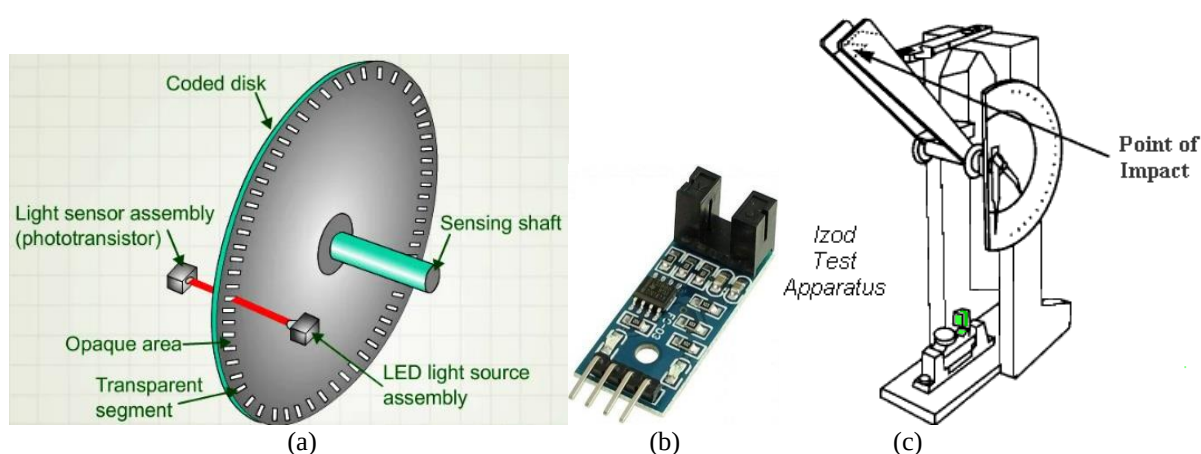


Figura 3. (a) Esquema representativo do sensor do tipo encoder (adaptado de Instrumentation Tools, 2022). (b) Sensor ótico LM393 compatível com Arduino usado no encoder. (c) Exemplo da montagem do encoder na máquina de ensaio de impacto tipo Izod (adaptado de MatWeb, 2022)

2.4. Opacidade das amostras

O sensor ótico do encoder também foi utilizado para medição da opacidade das amostras avaliadas, introduzindo o pedaço fraturado manualmente entre o LED e o fotorreceptor. A passagem do feixe de luz pelo material altera o sinal eletrônico fornecido pelo módulo conforme a translucência da amostra. No caso dos polímeros semicristalinos como o PLA, a formação de cristais geraria estruturas mais compactas que não permitem a passagem da luz entre as cadeias poliméricas. Nesse sentido, este método pode ser utilizado como uma ferramenta para estimativa da cristalinidade, embora o cálculo correto dessa propriedade deva ser feito através de ensaios mais confiáveis (Piorkowska e Rutledge, 2013), como a calorimetria exploratória diferencial (também conhecida como DSC, do inglês *Differential Scanning Calorimetry*) e a análise mecânica dinâmica (denominada DMA, do inglês *Dynamic Mechanical Analysis*).

Adicionalmente, as superfícies de fratura também foram analisadas em estereomicroscópio com câmera digital da fabricante Olympus, modelo SZ61, com ampliação de 4,5x. Essa verificação permite observação da translucência da amostra a partir de um feixe de luz direcionado, de forma que as amostras transparentes provocam refração e dispersão da luz, gerando uma imagem mais escura. Já nas amostras opacas a luz apresenta maior reflexão, criando uma imagem mais clara por padrão.

3. RESULTADOS

A resistência ao impacto do tipo Izod das amostras pode ser vista na Fig. 4, na qual as letras A até H indicam as condições de impressão e pós-tratamento que as peças foram submetidas, conforme explicado anteriormente na Tab. 1. É perceptível que os corpos de prova submetidos ao processo de recozimento absorveram uma energia superior quando comparada à dos outros corpos de prova não recozidos, com aumento da ordem de 300 %. Tal resultado pode estar associado ao fato de que durante o recozimento, que mantém as peças em temperatura acima da Tg do polímero, a maior mobilidade das macromoléculas permite melhor entrelaçamento das cadeias poliméricas, melhorando a adesão entre os filamentos depositados (Seppala et al, 2017). Outra possibilidade é a mudança da configuração dos vazios, que podem

coalescer e formar estruturas de menor concentração de tensão, ou ainda facilitar o contato entre as camadas, tal como observado por Hart et al (2017). Outra possibilidade de aumento das propriedades mecânicas advém do próprio processo de cristalização, uma vez que os cristais atuam como barreiras ao estiramento das cadeias amorfas, sendo este o mecanismo inicial da deformação elastoplástica observada em polímeros termoplásticos (Callister, 2006).

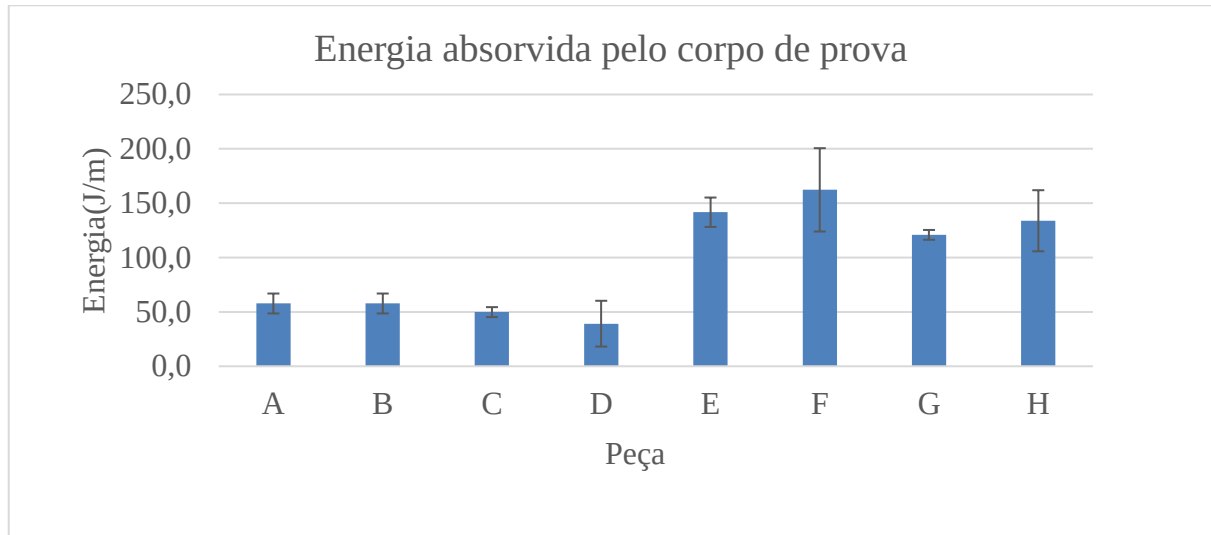


Figura 4. Gráfico da energia absorvida pelo corpo de prova

De fato, a análise estatística indicou um grande efeito do processo de recozimento na resistência ao impacto das peças, como pode ser visto na Fig. 5, com um fator positivo de 11,37, que é quase cinco vezes maior que o fator de 2,43 encontrado para a temperatura de mesa, o segundo fator significativo encontrado. Nesse caso, o fator negativo para a temperatura de mesa indicou que ao reduzir a temperatura de 85 °C para 50 °C na mesa de impressão, a resistência das peças diminuiu. Isso corrobora que a manutenção das camadas impressas acima da Tg favorece a resistência do material. No caso do recozimento, seu efeito é ainda muito maior porque mantém a peça na faixa entre 100 e 120 °C, que contém a temperatura mais propícia a formação de um dos tipos de cristais do PLA (Bhandari et al, 2019).

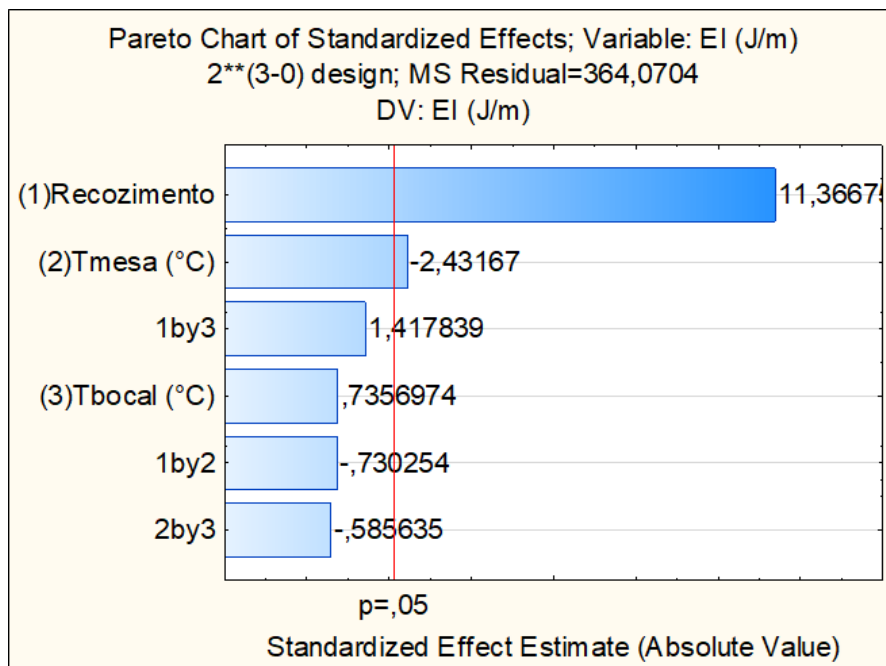


Figura 5. Diagrama de Pareto com a estimativa de influência para a absorção de energia

No caso da opacidade, o gráfico de Pareto da Figura 6, obtido após análise de variância, indica que o único fator significativo foi o recozimento, sem a temperatura de mesa neste caso. Esse fenômeno sugere que o aumento de resistência relacionado a temperatura de mesa está mais provavelmente associado aos mecanismos de entrelaçamento das moléculas das camadas depositadas e a mudança geométrica e estrutural dos vazios. Neste caso, como a manutenção do material

impresso acima da T_g não teve efeito significativo na cristalinidade, é possível que a mudança de cristalinidade só seja significativa durante o recozimento, que acontece em temperaturas mais altas. Este resultado estaria de acordo com a teoria do comportamento térmico dos polímeros, na qual as macromoléculas têm maior mobilidade acima da T_g , porém com efeitos pequenos em temperaturas mais baixas (Ebewe, 2000).

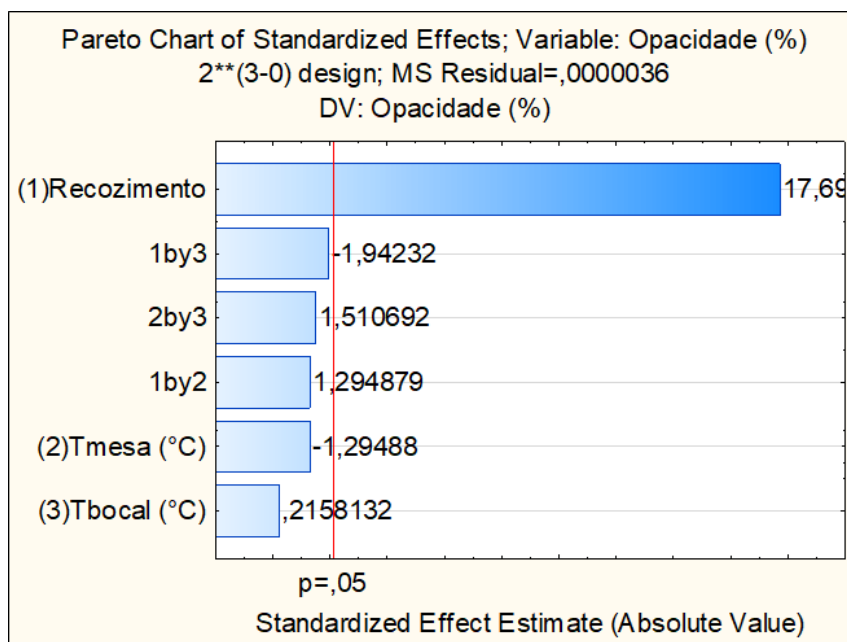


Figura 6. Diagrama de Pareto com a estimativa de influência para a opacidade

A variação de opacidade das amostras também fica evidente na análise das superfícies de fratura, apresentadas na Fig. 7 abaixo. A primeira peça não sofreu o processo de recozimento e se apresenta mais transparente, uma vez que os raios de luz atravessaram a superfície são desviados, não retornando para a câmera, deixando a imagem formada mais escura. Já a amostra recozida é nitidamente mais opaca, em detrimento das formações cristalinas proporcionadas pelo recozimento, de modo que a luz refletida em maior quantidade torna a imagem mais clara. Na placa não recozida percebe-se mais nitidamente também os limites das camadas depositadas, a partir de padrões lineares na direção vertical, que são os sítios preferenciais para a propagação da fratura. Já na peça recozida, como existe um preenchimento dos vazios após o aquecimento, a fratura se propaga em direção planar.

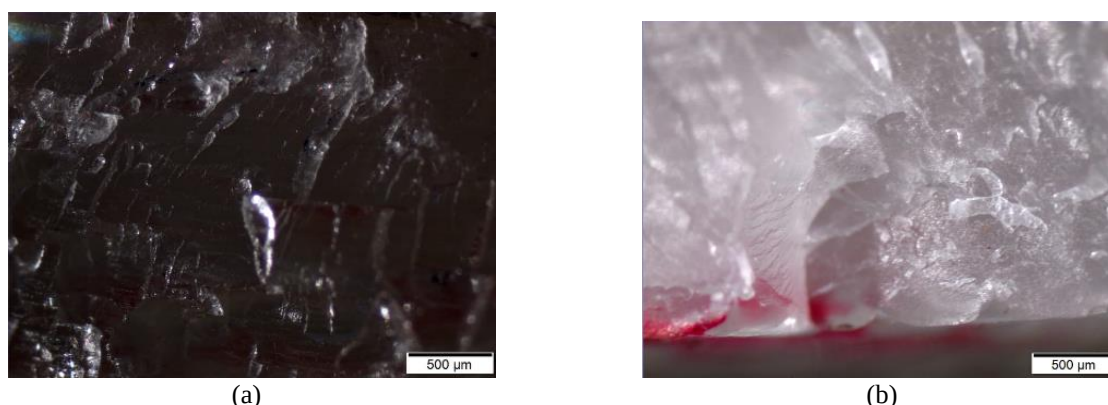


Figura 7. Fotografias por microscopia ótica de (a) amostra não recozida e (b) recozida.

Conforme os gráficos apresentados na Fig. 5 e Fig. 6, verifica-se também que a temperatura de bocal não proporciona alterações significativas nos resultados. Isso pode estar relacionado ao fato de que após a deposição do filamento, tanto para 200 quanto para 215 °C as temperaturas de impressão baixam rapidamente, para níveis que dependerão mais fortemente da temperatura da mesa. Isso está em concordância com os resultados encontrados por Samy et al (2021) e Sun et al (2008) em experimentos e simulações numéricas. É necessário ressaltar também que nos ensaios realizados utilizou-se o filamento de PLA recém-tirado da embalagem, evitando o efeito da umidade nas propriedades do material. Este tipo de filamento é altamente higroscópico e pode sofrer degradação química por hidrólise, alterando a resistência do material (Pokrovskii, 2009). Inclusive, nos pré-testes feitos com filamento exposto às condições ambientais, as

resistências ao impacto obtidas após recozimento foram consideravelmente inferiores, mantendo valores muito semelhantes aos encontrados para as peças sem pós-tratamento.

3. CONCLUSÃO

Com a maior acessibilidade aos processos de Fabricação por Filamento Fundido, seu uso em pesquisas e aplicações na indústria se torna mais usual, tornando importante avaliar condições simples e de baixo custo que melhorem a resistência das peças finais. Neste caso, foi encontrado uma melhoria de 300 % na resistência ao impacto ao fazer o recozimento das peças, além de ter sido encontrada também uma melhoria estatisticamente significativa apenas com o aumento da temperatura da mesa durante a impressão. Esses resultados demonstram uma boa eficácia da técnica de recozimento, e mostra que a estratégia de otimização dos parâmetros de impressão também constitui uma forma simples e barata de melhorar a peça final.

Outro ponto interessante foi a verificação da translucência e seu efeito na cristalinidade do material. Embora essa correlação seja extensivamente estudada na literatura, a medição direta da cristalinidade ainda é um fator de difícil aferição e há poucos resultados na bibliografia que correlacionam o teor de cristalinidade com a resistência mecânica do material. Neste trabalho, embora a cristalinidade não tenha sido medida, a opacidade do material pode ser facilmente avaliada e mostrou um efeito significativo do recozimento. Isso valida a estratégia utilizada como um método barato e eficaz de verificar os efeitos térmicos do processamento nas características microestruturais e ópticas do polímero. De forma geral, espera-se que a metodologia proposta possa exemplificar um caminho acessível nas próximas pesquisas com manufatura aditiva de polímeros semicristalinos pelo processo FFF, sobretudo ao utilizar o pós-tratamento por recozimento.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio na realização dos experimentos.

5. REFERÊNCIAS

- Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Ameli, A., & Nadimpalli, S. (2017). Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers. *Polymer Testing*, 60, 94-101.
- Bhandari, S., Lopez-Anido, R. A., & Gardner, D. J. (2019). Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. *Additive Manufacturing*, 30, 100922.
- Callister, W. D. (2006). *Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada*. LTC.
- Ebewele, R. O. (2000). *Polymer science and technology*. CRC press.
- Gao, X., Qi, S., Kuang, X., Su, Y., Li, J., & Wang, D. (2021). Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing*, 37, 101658.
- Hart, K. R., & Wetzel, E. D. (2017). Fracture behavior of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS) materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 177, 1-13.
- Hart, K. R., Dunn, R. M., & Wetzel, E. D. (2020). Increased fracture toughness of additively manufactured semi-crystalline thermoplastics via thermal annealing. *Polymer*, 211, 123091.
- Instrumentation Tools (2022). Encoder Working Principle. Disponível em: <<https://instrumentationtools.com/encoder-working-principle/>>. Acesso em 08/11/2022
- MatWeb (2022). Izod Impact Strength Testing of Plastics. Disponível em: <<https://www.matweb.com/reference/izod-impact.aspx>>. Acesso em 08/11/2022.
- Piorkowska, E., & Rutledge, G. C. (Eds.). (2013). *Handbook of polymer crystallization*. John Wiley & Sons.
- de Oliveira, L.P.R. e Melo, F.X., 2013. TPA as a tool for the design of active noise control. *Proceedings of the International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics - DINAME2013*. Buzios, Brazil.
- Pokrovskii, V. N. (2009). *The mesoscopic theory of polymer dynamics* (Vol. 95). Springer Science & Business Media.
- McConnell, K.G. e Varoto, P.S., 2008. *Vibration Testing: Theory and Practice*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2ª edição.
- 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.
- Seppala, J. E., Han, S. H., Hillgartner, K. E., Davis, C. S., & Migler, K. B. (2017). Weld formation during material extrusion additive manufacturing. *Soft matter*, 13(38), 6761-6769.
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, 31(1), 287-295.
- 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*.

Torres, J., Cole, M., Owji, A., DeMastry, Z., & Gordon, A. P. (2016). An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. *Rapid Prototyping Journal*.
Vaes, D., & Van Puyvelde, P. (2021). Semi-crystalline feedstock for filament-based 3D printing of polymers. *Progress in Polymer Science*, 101411.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF ANNEALING EFFECTS ON THE IMPACT RESISTANCE OF POLYMERIC PARTS PRINTED WITH FFF

Kauã Ferreira de Almeida
Pedro Henrique Veiga-Oliveira
Thiago Oliveira Santos
Lucas Oliveira Borges
Pedro Augusto Souza da Silva

Federal University of Uberlândia, Laboratory for Machining Teaching and Research, 2121 João Naves de Ávila Avenue, 38408-100, Uberlândia/MG

kaua.almeida@ufu.br; pedroh.veiga.o@gmail.com; thiago.de@ufu.br; lobchute@gmail.com; pedrosouza2390@gmail.com

Rafael Rodrigues Mariano

UNA University Center, 59 Paulina Margonari Street, Uberlândia/MG
rafa.rodrigues.mariano@gmail.com

Abstract: The additive manufacture through the FFF (Fused Filament Fabrication) process is one of the most utilized techniques of 3D printing nowadays, which consists of the extrusion of a thermoplastic filament, provided continuously from a reel, through a nozzle extruder heated for the material deposition in layers. In this process, the deposited polymer cools rapidly for the layer solidification, and then it is reheated with the deposition of the upper layers, making important the study of the thermoplastic properties in accord to the pieces thermal history, especially in relation to the glass transition (T_g) temperature and the crystallization temperature (T_c). The first indicates the temperature from which the polymeric chains gain mobility and relates with the adhesion between the deposited layers. The second marks the organization tendency of the macromolecules in crystals, that normally make the material more resistant, though less ductile. Due to this phenomenon, the FFF printed piece's mechanical properties become dependent on parameters such as the printing speed, nozzle and table temperatures, and layer height, in addition to post-processing operations like reheating. In this sense, this research aimed to evaluate the influence of the printing parameters mentioned and reheating on the FFF fabricated polylactic acid (PLA) piece's impact resistance. It utilized a complete factorial type experimental planning with 2 levels and 3 variables (2^3), that allowed use of variance analysis (ANOVA) to identify which are the most significant factors for the impact resistance evaluated according to the norm ASTM D4508. The reheating was identified as the most influential parameter, since only 20 minutes reheating was enough to increase the piece's average resistance by more than 300%. The crystallinity change became evident by the reheated piece's opacity when compared to the translucent pieces obtained through printing. The results demonstrated notable efficacy of the reheating process on improving the piece's properties, pointing to a great cost-benefit strategy for the industrial segments and for professional consumers attributed to the FFF printing.

Keywords: Additive manufacture; Annealing; Impact resistance; Crystallinity

RESPONSIBILITY NOTICE

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