



Análise da temperatura na região de união entre dois trechos de rasters na manufatura aditiva por extrusão de material polimérico

Temperature analysis in the contact region of two continuous raster paths in polymeric parts produced by material extrusion

Eduardo Burkot Hungria¹, Felipe Gonçalves Di Nisio², Rafael Voltolini³, Francisco Cano Silva Cezar⁴, Neri Volpato⁵

RESUMO

A extrusão de material, uma das tecnologias da manufatura aditiva, é bastante utilizada para a confecção de peças poliméricas. As camadas depositadas são formadas por trajetórias de contornos e de preenchimento interno, que pode ser obtido por um único raster contínuo (no caso de geometrias simples) ou por vários caminhos de raster (no caso de peças com cavidades ou geometrias complexas). Quando o bico extrusor permanece afastado do local de contato de dois preenchimentos por um certo período, ocorre uma fragilização da região devido ao gradiente térmico presente entre os filamentos depositados. Neste estudo, o comportamento térmico da região de união (ou contato) dos rasters foi analisado em amostras fabricadas em dois cenários distintos: com/sem aquecimento da plataforma de construção (mesa). As temperaturas em várias camadas foram capturadas utilizando uma câmera térmica. Os resultados mostraram que uma mesa aquecida mantém a energia térmica da região, havendo, portanto, pouca redução da temperatura, e para uma mesa não aquecida a redução da temperatura é maior, uma vez que não há uma fonte para manter o calor da região. Esses resultados podem servir de base para se entender os efeitos da variação de temperatura na resistência dessas regiões de união entre trechos.

PALAVRAS-CHAVE: extrusão de material; manufatura aditiva; polímeros; temperatura.

ABSTRACT

Material extrusion, one of the additive manufacturing technologies, is widely used to produce polymeric parts. The part's layers are formed by the contour(s) and the filling, which can be achieved by a single continuous raster (in the case of simple geometries) or by multiple raster paths (in the case of parts with cavities or complex geometries). When the extruder nozzle remains away from the contact point of two fillings for a certain period, the region becomes fragile due to the thermal gradient between the deposited filaments. In this study, the thermal behavior of the raster's adhesion (or contact) region was analyzed in samples manufactured in two different scenarios: with and without heating the build platform. Temperatures in several layers were captured using a thermal camera. The results showed that a heated table presents low temperature reduction, maintaining the thermal energy of the region. The temperature reduction is more accentuated for an unheated build platform since there is no source to maintain the heat in the region. These results can serve as a basis for understanding the effects of temperature variation on the resistance of these contact regions between paths.

KEYWORDS: material extrusion; additive manufacturing; polymers; temperature.

¹ Bolsista do PIBIT Eduardo Burkot Hungria. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: ehungria@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 1714731595236132.

² Doutorando no PPGEM Felipe Gonçalves Di Nisio. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: felipenisio@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 1309375784944006.

³ Doutorando no PPGEM Rafael Voltolini. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: voltolini@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5658360790989784.

⁴ Bolsista do PIBIT Francisco Cano Silva Cezar. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: franciscocezar@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 3682641248009135.

⁵ Docente Dr. Neri Volpato na Engenharia Mecânica/PPGEM/NUFER. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: nvolpato@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8414652619232683.



1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (AM) é um processo de fabricação que consiste na adição sucessiva de material em forma de camadas. Uma de suas etapas é o planejamento de processo, no qual diversas decisões impactarão na qualidade e nas propriedades mecânicas das peças. Uma dessas decisões é a estratégia de preenchimento, que define a trajetória da deposição do material do interior da geometria (Gibson, Rosen e Strucker, 2015; Volpato e Da Silva, 2017).

Na extrusão de material (MEX), uma das tecnologias mais utilizadas na AM, as camadas são formadas pela deposição de filamentos, geralmente contendo um ou mais contornos e o preenchimento. Para a construção de peças com maior resistência mecânica, uma técnica comum é a utilização do preenchimento do tipo raster (ou zigue-zague) com uma densidade de preenchimento igual a 100%, ou seja, um filamento contendo contato lateral com o seu vizinho (gap zero) (Gibson, Rosen e Strucker, 2015).

Para a fabricação de peças com cavidades ou geometrias complexas, é comum a necessidade de se gerar mais de um caminho de raster, fazendo com que haja regiões de contato (ou união) entre os filamentos de trechos vizinhos de preenchimento. Uma fragilização localizada pode ocorrer na região dessa união, uma vez que o filamento que está sendo depositado encontra-se na temperatura de fusão (polímero semicristalino) ou acima da transição vítrea (polímero amorfo), enquanto o filamento do preenchimento já depositado previamente apresenta uma temperatura consideravelmente menor (Volpato e Zanotto, 2018).

Nesse estudo, será realizada uma análise da variação da temperatura do contato entre filamentos de uma peça produzida por MEX. Para isso, a temperatura de uma região de união de dois rasters será monitorada variando-se o tempo que o bico extrusor fica afastado dessa região. Espera-se que os resultados permitam entender melhor como ocorre a variação da temperatura no preenchimento de peças complexas que envolvem dois ou mais rasters contínuos. Além disso, a análise procurará demonstrar a influência da temperatura da plataforma nessa variação térmica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foi utilizado para a impressão das amostras um ácido polilático (PLA) vermelho de 1,75 mm de diâmetro e a Impressora 3D Creality Ender-5 Pro. Para controlar a variação da umidade do material durante as impressões, foi utilizado um container Esun Ebox Lite para armazenar o rolo de filamento que o manteve aquecido a 50 °C. Os corpos de prova (CPs) foram modelados no Solidworks 2021 e seguem a norma ASTM D638-14 referente a ensaios mecânicos em polímeros. O software Cura, desenvolvido pela UltiMaker, foi utilizado para o planejamento da impressão. Os parâmetros básicos de impressão utilizados foram: temperatura do bico de 200 °C, largura de extrusão de 0,4 mm, altura de camada de 0,254 mm, velocidade de impressão de 50 mm/s e quantidade de contornos igual a um. A variação do ângulo de preenchimento do raster entre camadas foi definida como 0 e 90 graus em relação ao comprimento do corpo de prova.

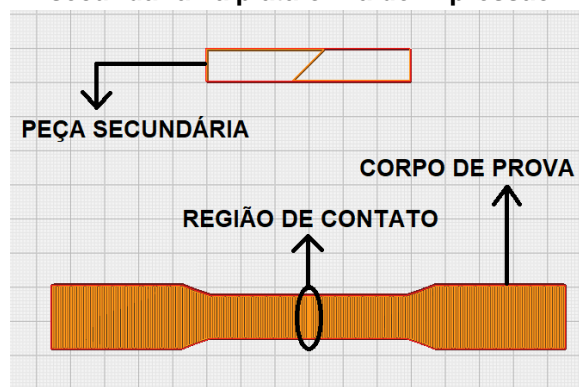
Para simular a união de dois caminhos de raster vizinhos, a fabricação dos corpos de prova foi interrompida exatamente no meio do processo nas camadas com o

preenchimento orientados a 90 graus, conforme a Figura 1. Foram impressos grupos de cinco amostras em que um parâmetro foi variado: o tempo de espera da união. Esse parâmetro faz referência ao tempo que o bico extrusor vai ficar afastado da região antes de realizar a união dos preenchimentos. Foram escolhidos quatro valores para o tempo de espera: 15 s (t15), 30 s (t30), 45 s (t45) e 60 s (t60). Para cada tempo de espera, foram fabricadas cinco amostras (20 amostras ao todo).

As uniões ocorreram apenas nas camadas pares, ou seja, aquelas em que os filamentos são depositados com ângulo de 90°. Para isso, os Gcodes gerados foram editados manualmente, adicionando linhas de código nessas camadas, no meio da peça. Como os CPs são constituídos de 12 camadas no total (3 mm de espessura), serão 6 pausas/uniões por amostra durante a impressão (nas camadas 2, 4, 6, 8, 10 e 12).

Para evitar que o tempo de espera pudesse afetar as características da união do contato, uma peça secundária foi fabricada junto com o corpo de prova (ver Figura 1). Esta decisão tem como objetivo trazer o cabeçote de extrusão ao regime normal de trabalho antes do bico retornar ao preenchimento do corpo de prova. Esta peça secundária tem duração de 15 s (menor tempo de espera). Assim, o tempo total de interrupção corresponde ao tempo de espera somado ao de fabricação da peça secundária. Esta tem também o intuito de limpar o bico de extrusão, uma vez que, para tempos de espera maiores, o extrusor ficaria parado no canto superior esquerdo da plataforma, e o material escorreria por ele, o que poderia prejudicar a união quando retornasse ao corpo de prova.

Figura 1 - Representação da impressão do corpo de prova com a região de contato e a peça secundária na plataforma de impressão



Fonte: Autoria própria (2023)

A fim de avaliar a influência da temperatura da mesa nos corpos de prova com as uniões, todos os grupos de amostras foram impressos de duas formas: com a utilização da mesa aquecida à 60 °C e sem a utilização de mesa aquecida (mantida na temperatura ambiente de 20 °C). Estes casos foram denominados mesa aquecida e mesa fria, respectivamente.

2.2 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DURANTE AS IMPRESSÕES

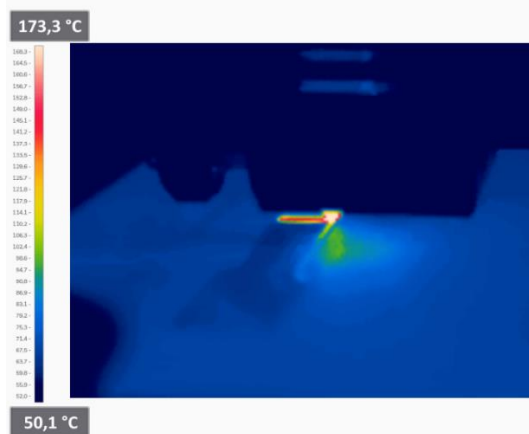
Para a medição das temperaturas antes e depois do afastamento do bico extrusor, foram feitas gravações com uma câmera térmica da marca FLIR, modelo T530. Cada filmagem foi iniciada no momento da realização da pausa de cada camada em 90° e encerrada quando o bico retorna ao corpo de prova. Ao todo, foram gravados seis vídeos



de cada amostra, referentes às seis camadas em que ocorrem o contato. O software FLIR Thermal Studio foi utilizado para a interpretação das imagens gravadas.

Neste projeto, foram adotadas duas escalas de temperatura para a análise das imagens provenientes dos dois tipos de mesas (quente e fria), já que a mesa aquecida interfere na leitura da temperatura pelo equipamento. Foram escolhidas uma escala mais abrangente, de 50 °C a 170 °C, que foi denominada de escala global, e uma escala mais restrita, de 50 °C a 120 °C, denominada de escala específica. Ambas as escalas foram utilizadas para a análise da mesa aquecida. Para a mesa fria, como esta não interfere na leitura, utilizou-se apenas a escala de 10 °C a 100 °C. Tais limites foram estabelecidos empiricamente, para uma melhor visualização das imagens. A Figura 2 mostra a escala global da mesa aquecida como exemplo. A amplitude térmica adotada nas escalas destaca a fonte térmica (bico extrusor) no centro da imagem, seguido pelo rastro térmico - calor remanescente da extrusão do filamento que perde energia térmica lentamente devido a presença da mesa aquecida.

Figura 2 - Escala global da mesa aquecida



Fonte: Autoria própria (2023)

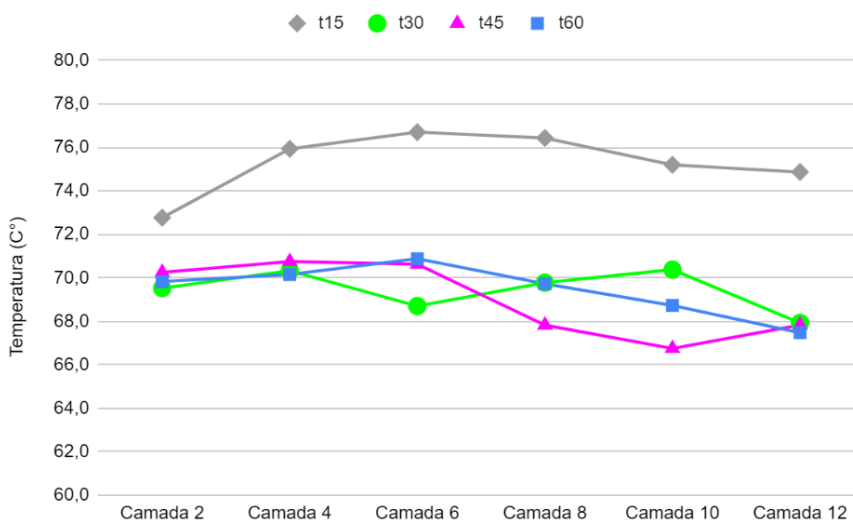
As temperaturas das seis camadas dos grupos de amostras (t15, t30, t45 e t60) foram obtidas através da média das temperaturas capturadas. Assim foi possível comparar o comportamento térmico em cada camada entre os diferentes tempos de espera do bico extrusor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As temperaturas de início da pausa foram todas próximas de 90 °C, pois a impressora trabalha com um valor fixo de temperatura no bico extrusor. Já as temperaturas após a interrupção variaram de acordo com o tempo de espera adotado, e comportamentos térmicos distintos foram observados nas amostras com e sem a mesa aquecida.

No gráfico da Figura 3 são apresentadas as temperaturas após a interrupção de cada camada das amostras fabricadas com a mesa aquecida. Nota-se que, apesar das curvas não manterem uma certa linearidade, a faixa de temperatura em que elas variam é pequena, com valores entre 67 °C e 77 °C. Esse comportamento era esperado, uma vez que a mesa aquecida colabora com a mantabilidade da energia térmica do CP polimérico ao longo da impressão da peça, mesmo variando o tempo de espera.

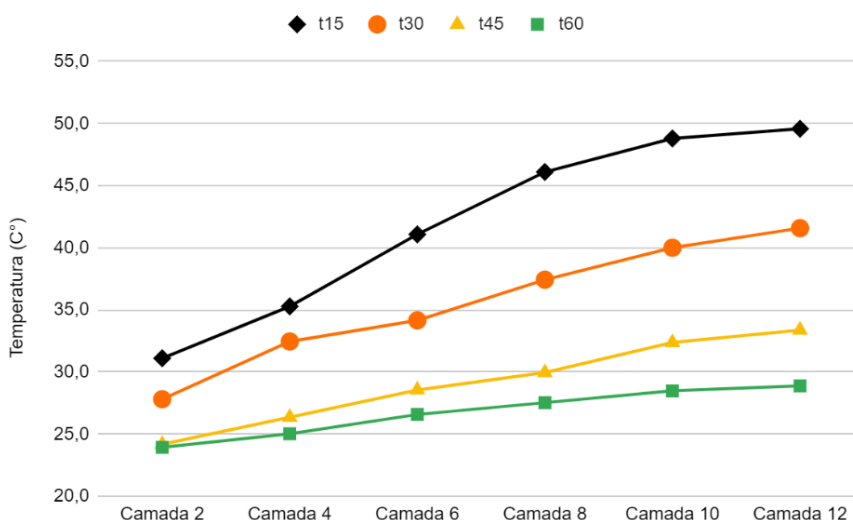
Figura 3 – Temperatura após a interrupção entre as camadas da mesa aquecida



Fonte: Autoria própria (2023)

A mesa fria, por sua vez, apresenta temperaturas após a interrupção distintas entre as camadas e os tempos de espera. Conforme o gráfico da Figura 4, percebe-se que para o tempo de 60 s (t60), a temperatura é menor do que nos casos anteriores, ficando em torno de 25 °C. No entanto, ela se mantém constante quando comparada entre as camadas. Isso se deve ao fato de que, como não há aquecimento na mesa, o calor fornecido para a região de contato consegue se dissipar até atingir o equilíbrio térmico com a temperatura ambiente ao longo desses 60 s.

Figura 4 – Temperatura após a interrupção entre as camadas da mesa fria



Fonte: Autoria própria (2023)

Nota-se também que, ao reduzir o tempo de pausa, a temperatura vai aumentando. Isto ocorre porque o calor fornecido ao corpo de prova tem uma janela de tempo mais curta para se dissipar pelo ambiente.



Além disso, conforme se progride no número de camada, ocorre um crescimento da temperatura após a interrupção. Essa temperatura do tempo de 15 s (t_{15}) é de aproximadamente 30 °C para a camada 2. Ao subir para a camada 12, obtém-se aproximadamente 50 °C, um aumento de 20 °C na temperatura após a interrupção. Isto acontece pois, em camadas mais distantes da mesa de vidro, a influência do polímero na dissipação térmica é mais significativa e, como materiais poliméricos são mais isolantes que o vidro, é previsível que essa temperatura seja maior em relação a camadas inferiores. Esse fenômeno é condizente com os resultados obtidos no artigo de Sun et al. (2008).

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelo monitoramento da temperatura durante a impressão dos corpos de prova possibilitam uma análise da dissipação térmica no material extrudado nos casos em que ocorre a união (contato) entre dois preenchimentos vizinhos. As maiores variações de temperatura foram observadas nas amostras fabricadas sem mesa aquecida, onde pode ocorrer uma maior fragilização na região da união. Já o uso da mesa aquecida pode garantir, pelo menos nas primeiras camadas, melhores propriedades mecânicas nas peças impressas, onde o efeito da plataforma aquecida reduz o gradiente térmico. Esses dados serão usados em um estudo mais abrangente, no qual está sendo analisada a influência dessas variações da temperatura nas regiões de união na resistência mecânica de peças impressas por MEX.

Agradecimentos

Agradeço aos departamentos e órgãos de fomento de estudos científicos, especialmente ao PIBIT da UTFPR. Também um agradecimento especial ao professor orientador Neri Volpato e aos colegas do laboratório NUFER pelo suporte e auxílio.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. ed. Springer, 2015.
- SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. **Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments**. Rapid Prototyping Journal. Vol. 14, 2008. Disponível em <<https://doi.org/10.1108/13552540810862028>>.
- VOLPATO, N.; DA SILVA, J. V. L. **Planejamento de processo para tecnologias de AM**. In: Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. [s.l.] Edgar Blucher, 2017.
- VOLPATO, N.; ZANOTTO, T. T. **Analysis of deposition sequence in tool-path optimization for low-cost material extrusion additive manufacturing**. Int J Adv Manuf Technol 101, 1855–1863, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-018-3108-1>>.