



ESTUDO DO EFEITO DA COMBINAÇÃO DE PREENCHIMENTO NA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE IMPACTO DE PEÇAS FABRICADAS EM PLA UTILIZANDO FABRICAÇÃO POR FILAMENTOS FUNDIDOS

STUDY OF THE EFFECT OF FILLING COMBINATION ON IMPACT ENERGY ABSORPTION OF PARTS MANUFACTURED IN PLA USING CAST FILAMENT MANUFACTURING

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA COMBINACIÓN DE LLENADO SOBRE LA ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE IMPACTO DE PIEZAS FABRICADAS EN PLA MEDIANTE FABRICACIÓN DE FILAMENTOS FUNDIDOS

Fabiano Oscar Drozda ^{1*}, Ricardo Junior de Oliveira Silva ², Davi Salvini Chixaro ³, & Dayane Perez Bravo ⁴

^{1 2 3} Universidade Federal do Paraná ⁴ UNINTER Centro Universitário Internacional

^{1*} fabiano.drozda@ufpr.br ² ricardojosilva@gmail.com ³ davisalvini@gmail.com ⁴ dayaneperezbravo@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 21.06.2024

Aprovado: 23.07.2024

Disponibilizado: 12.08.2024

PALAVRAS-CHAVE: Fabricação por Filamento fundido, mesoestrutura; preenchimento híbrido, teste Charpy.

KEYWORDS: Fused Filament Fabrication; Mesostructure; hybrid infill; Charpy test.

PALABRAS CLAVE: Fabricación de filamentos fundidos; mesoestructura; relleno híbrido; Prueba de Charpy.

*Autor Correspondente: Drozda, F. O.

RESUMO

A Fabricação por Fusão de Filamento (FFF) é uma das tecnologias de manufatura aditiva mais difundidas. No entanto, as peças impressas muitas vezes são menos confiáveis quando comparadas com aquelas produzidas por processos tradicionais de fabricação devido à variabilidade na qualidade das impressões e a possíveis imperfeições introduzidas durante o processo de impressão. Portanto, investigar o comportamento mecânico destas peças é um importante tópico de pesquisa e comum interesse entre acadêmicos e fabricantes. Este estudo propõe uma nova abordagem para projetar a estrutura interna das peças, combinando duas regiões distintas com diferentes preenchimentos. O objetivo deste estudo foi investigar o comportamento dessa nova mesoestrutura na tenacidade das peças. Para isto, dois conjuntos de corpos de prova em PLA foram fabricados. O primeiro construído com preenchimento único e o segundo com preenchimento híbrido. Os corpos de prova foram testados por Impacto Charpy conforme norma ASTM D6110-10. Os resultados foram analisados por ANOVA e a microestrutura avaliada por microscopia. Os resultados mostraram que o uso do recurso híbrido se mostrou eficiente no aumento da tenacidade para densidades de preenchimento de 20%. Para as amostras com densidade de preenchimento acima de 50%, o aumento na tenacidade não foi significativo, e houve considerável aumento no tempo de impressão e no consumo de material para fabricação também. Em situações em que se deseja estruturas mais leves e com maior resistência ao impacto, o uso do preenchimento híbrido tem significativa relevância.

ABSTRACT

Filament Fusion Manufacturing (FFF) is one of the most widespread additive manufacturing technologies. However, printed parts often have lower reliability compared to those

produced by traditional manufacturing processes. Therefore, investigating the mechanical behavior of these parts is an important research topic and common interest among academics and manufacturers. This study proposes a new approach to design the internal structure of parts, combining two distinct regions with different fillings. The objective was to investigate the behavior of this new mesostructure on the toughness of the parts. For this, two sets of PLA test specimens were manufactured. The first built with single fill and the second with hybrid fill. The specimens were tested by Charpy Impact according to ASTM D6110-10. The results analyzed by ANOVA and the microstructure by optical micrographs. The use of the hybrid resource proved to be efficient in increasing toughness for fill densities of 20%. For samples with fill density above 50%, the increase in toughness was not significant, as printing time and material consumption for manufacturing increased. In situations where lighter structures with greater resistance to impact are desired, the use of hybrid filling has significant relevance.

RESUMEN

Filament Fusion Manufacturing (FFF) es una de las tecnologías de fabricación aditiva más extendidas. Sin embargo, las piezas impresas suelen tener una fiabilidad menor en comparación con las producidas mediante procesos de fabricación tradicionales. Por tanto, investigar el comportamiento mecánico de estas piezas es un tema de investigación importante y de interés común entre académicos y fabricantes. Este estudio propone un nuevo enfoque para diseñar la estructura interna de piezas, combinando dos regiones distintas con diferentes rellenos. El objetivo era investigar el comportamiento de esta nueva mesoestructura sobre la tenacidad de las piezas. Para ello se fabricaron dos juegos de probetas de PLA. El primero construido con relleno simple y el segundo con relleno híbrido. Las muestras fueron ensayadas mediante Charpy Impact según ASTM D6110-10. Los resultados analizados por ANOVA y la microestructura por micrografías ópticas. El uso del recurso híbrido demostró ser eficiente para aumentar la tenacidad para densidades de relleno del 20%. Para muestras con una densidad de relleno superior al 50 %, el aumento de la tenacidad no fue significativo, ya que aumentaron el tiempo de impresión y el consumo de material para la fabricación. En situaciones donde se desean estructuras más ligeras y con mayor resistencia al impacto, el uso de relleno híbrido tiene gran relevancia.

INTRODUÇÃO

A fabricação por filamento fundido (FFF), também conhecida como impressão 3D, se destaca como uma opção atrativa para a manufatura de componentes com geometria complexa, única e ambientalmente amigáveis (Chyr et al., 2023; Reverte et al., 2020; Fico et al., 2022). Esta técnica se caracteriza pela utilização de um equipamento de baixo custo, fácil manuseio e sem necessidade de ferramentas dedicadas, fatores que contribuíram para sua grande popularidade nos últimos anos (Bhatia et al., 2023). No processo FFF, um filamento de material polimérico é extrudado através de um bico aquecido e depositado camada sobre camada na plataforma de construção para criar uma peça 3D (Zanjanijam et al., 2020).

A despeito da sua versatilidade e popularidade, as peças fabricadas por FFF se apresentam menos confiáveis comparadas aos componentes similares fabricados por processos tradicionais de fabricação para polímeros (Jatti et al., 2022; Hozdic et al., 2024). Isso, devido às limitações técnicas internas como a fraca adesão entre as camadas e uma microestrutura heterogênea que se não bem controladas, podem comprometer a durabilidade final do componente (Gao, et al., 2021). Portanto, a investigação do comportamento mecânico de peças impressas em 3D é um importante tema para pesquisa. Diversos estudos demonstram que a tenacidade de peças plásticas impressas pode variar significativamente em função dos parâmetros de impressão e das características do material utilizado. Tanveer et al., (2020) investigaram o efeito de diferentes combinações de porcentagens de preenchimento nas propriedades mecânicas de peças em PLA (ácido poliláctico). Os resultados mostraram que, para os ensaios de impacto, a porcentagem de preenchimento é diretamente proporcional à resistência ao impacto das peças.

Mishra et al., (2021) estudaram os efeitos de diferentes tipos de preenchimentos e densidades na resistência ao impacto de peças feitas de PLA e observaram que a resistência ao impacto depende da natureza da estrutura interna, ou seja, seu tipo de preenchimento tem papel fundamental em equilibrar a intensidade de tensão e a propagação de trincas. Patterson, et al., (2019) analisaram as propriedades de resistência ao impacto obtidas pelo teste de impacto tipo Izod, em relação às variáveis de processo raster angle e a orientação de impressão. Os autores relatam que a orientação e o raster angle foram os principais fatores na determinação das propriedades de impacto, pois influenciaram fortemente no comprimento da trinca e no caminho através do material durante a fratura. Já Mustafa et al., (2022) investigaram como materiais de reforço influenciam na tenacidade das peças de PLA e concluíram que a adição de materiais de reforço melhorou significativamente a resistência ao impacto das peças. Porém, a adição de materiais de reforço como fibras, muitas vezes dificulta o controle de processamento. Ansari et al., (2022) estudaram a otimização de parâmetros de processo para compósitos PLA reforçados com fibra de carbono impressos em 3D e concluíram que a velocidade de impressão e a densidade de preenchimento impactaram na resistência ao impacto Izod. Qualquer aplicação onde se espera que a peça plástica impressa em 3D esteja sujeita a cargas de impacto ou choque, pode ser beneficiada com uma maior tenacidade (Ahmed et al., 2016). Esta abordagem pode levar ao desenvolvimento de processos de impressão que podem produzir peças com propriedades mecânicas melhoradas e, expandir

as aplicações da FFF para as áreas que exigem maior confiabilidade e robustez (Messimer et al., 2019; Baptista, et al., 2020). Em equipamentos industriais, peças plásticas impressas em 3D com boa resiliência podem ser usadas em substituição as fabricadas em metal para aplicações de baixa carga e condições ambientais controladas (Sahin et al., 2021). O entendimento entre engenheiros e projetistas é que a resistência ao impacto é diretamente proporcional à densidade do preenchimento (Zisopol et al., 2023). Entretanto, estruturas com alta porcentagem de densidade de preenchimento tem reflexo no aumento tempo de impressão e consumo de material, tendo como consequência o aumento no custo final da peça (Tanveer et al., 2019; Giri et al., 2021; Ansari et al., 2022).

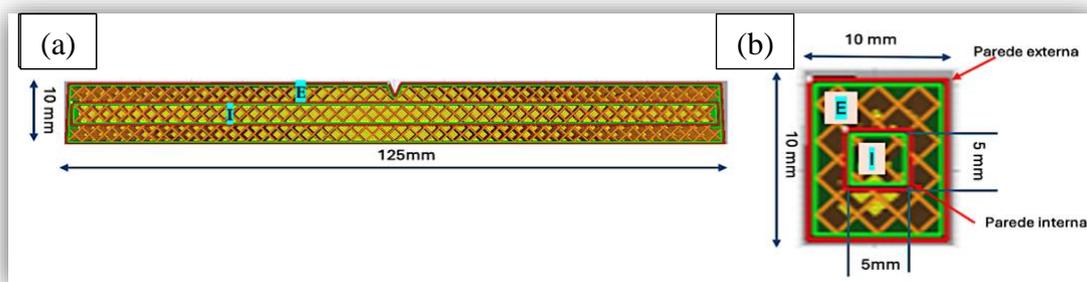
O objetivo deste estudo foi propor um novo modo de projetar a estrutura interna da peça combinando duas diferentes regiões de preenchimento de material. Para isto, foi incorporado na região central da peça um preenchimento incoerente ao preenchimento padrão. Como vantagem desta nova mesoestrutura, espera-se otimizar a tenacidade da peça pressupondo que esta nova estrutura possa dificultar o caminho da propagação da trinca. Para este desenvolvimento, amostras em material PLA comercial foram fabricadas e testadas em Ensaio Charpy e os resultados dos testes analisados estatisticamente por análise de variância (ANOVA). Os dados analisados mostraram que as peças com preenchimento híbrido tiveram significativa melhora na tenacidade à fratura das peças impressas com baixas densidades de preenchimento, entretanto, penalizando o tempo de impressão e o consumo de material.

METODOLOGIA

Utilizou-se impressora 3D (Ender Pro-5) e filamento de PLA comercial com diâmetro de 1,75 mm. Para criação digital do modelo dos corpos de prova usou-se o 3D *Autodesk Inventor Professional 2022* e o modelo 3D foi fatiado com *software Ultimaker CURA 5.1*. O ensaio de impacto realizado em máquina de testes Charpy (Pantec PW-4) e análise estatística dos resultados dos testes utilizou-se *software Minitab 2017*. Os corpos de prova foram pesados em balança digital com precisão de 0,001g e valores expressos em gramas.

O modelo 3D da amostra para o ensaio de impacto Charpy projetado de acordo com norma ASTM D6110-10. Dimensões da amostra de preenchimento único e para o preenchimento híbrido manteve-se em 10 × 10 × 125 mm. O preenchimento híbrido construído na região central interna do corpo de prova (dimensões 5 × 5 mm) e orientado por toda extensão da peça, sendo a letra E correspondente a região externa e onde fica localizado o entalhe Charpy e a letra I é a região modificada da peça pelo preenchimento híbrido (Figura 1).

Figura 1. Vistas (a) superior e (b) frontal do corpo de prova detalhando o preenchimento híbrido



Fonte: Autores (2024).

Após criado o modelo do corpo de prova foi feito o fatiamento da peça e convertido em código G que alimenta de informações de impressão a impressora 3D por meio do cartão SD. Os parâmetros de impressão foram mantidos constantes para todos os testes (Tabela 1).

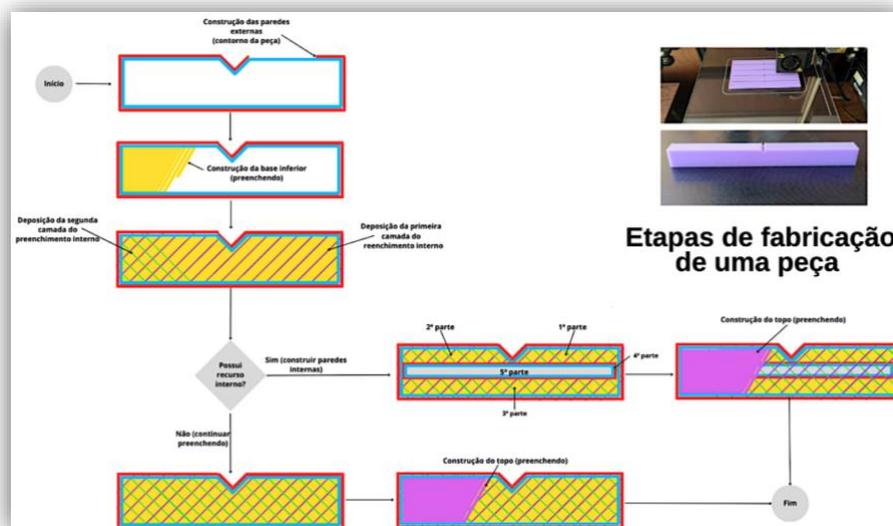
Tabela 1. Parâmetros fixos de processamento.

Parâmetros	Valores
Velocidade de impressão	50mm/s
Altura da camada	0,2mm
Temperatura de impressão	200°C
Temperatura da plataforma	60°C
Tipo de preenchimento	Line
<i>Raster angle</i>	45°/-45°
Número de linhas da parede do preenchimento híbrido	2
Orientação de impressão	Horizontal - X
Número de linhas da parede externa	2
Diâmetro do nozzle	0,4mm

Fonte: Autores (2024)

A construção de uma camada se inicia pela formação da parede externa, seguido pelo preenchimento interno. Nesta etapa, é definido pela adoção ou não do preenchimento híbrido. Caso a escolha seja feita pela presença do preenchimento híbrido é formada uma nova parede externa no centro da peça e então construído um novo preenchimento dentro dos parâmetros escolhidos. Este processo se repete por toda a altura da peça (Figura 2).

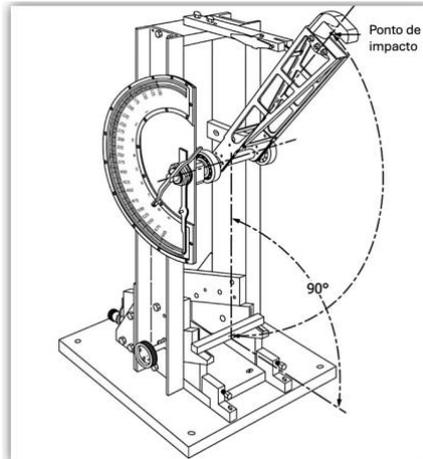
Figura 2. Fluxograma esquemático do processo das etapas de construção da peça 3D com preenchimento híbrido



Fonte: Autores (2024).

Os testes Charpy seguiram a norma ASTM-D6110 utilizando o pêndulo de 1 Joule. Para a realização do ensaio, a amostra é apoiada em posição horizontal e atingida no lado oposto ao do entalhe pelo impacto do pêndulo como mostra a Figura 3. A medida resultante do ensaio de impacto corresponde a energia absorvida para fraturar a amostra em Joules. O entalhe usado foi do tipo A com raio $rN = (0,25 \pm 0,05)$ mm e foi construído durante a impressão dos corpos de prova.

Figura 3. Representação do funcionamento do teste de impacto Charpy pela norma ASTM D6110-10



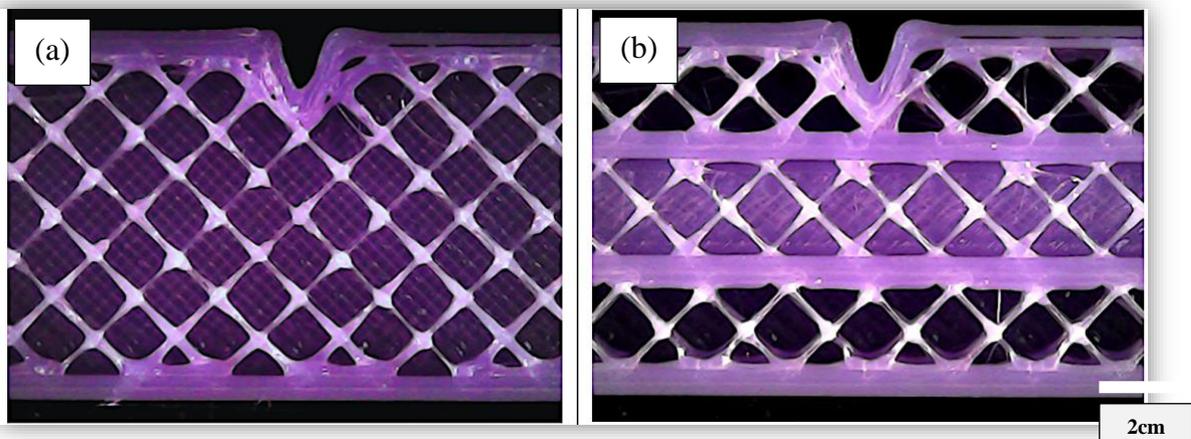
Fonte: ASTM (2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

a. Análise da micrografia das amostras

A primeira observação é que nas duas condições a região do entalhe se mostra íntegra e sem defeitos que possam reduzir a resistência mecânica nesta região. Os filamentos que integram o preenchimento apresentam uma desuniformidade no diâmetro próximos as regiões de cruzamento entre as camadas e podem servir como concentradores de tensão. Não é observado a presença de falhas nas camadas como ausência de material ou trincas (Figura 4).

Figura 4. Micrografia da seção transversal das peças com (a) preenchimento único com densidade de 20% e (b) preenchimento híbrido com combinação do de densidade de 20%-20h%). Aumento de 50X microscópio digital



Fonte: Autores (2024).

Na micrografia, observa-se a incoerência de alinhamento entre os filamentos que compõem o preenchimento externo e o preenchimento híbrido. Este desalinhamento pode gerar zonas de interfaces frágeis entre os filamentos. Isto pode ser relevante durante a propagação da trinca pela seção da peça, atuando como desviadores e alterando o caminho do dano. Neste caso, as trincas podem explorar essas interfaces, desviando-se ao longo das áreas de menor resistência, dificultando prever o seu comportamento durante a ruptura. Também é observado que a transição entre o preenchimento externo e o preenchimento híbrido gera uma descontinuidade na distribuição de material, ocupada pelo filamento que forma a parede externa do preenchimento híbrido.

b. Análise estatística dos dados – Efeito do Preenchimento híbrido

O objetivo desta etapa foi compreender se a presença do preenchimento híbrido teria efeito sob a absorção de energia a fratura das amostras quando comparado ao preenchimento único. Para esta análise foi feito um delineamento fatorial completo com dois fatores e dois níveis ($2^k=2^2$), sendo testados os fatores: preenchimento único (-) e preenchimento híbrido (+); e os níveis de densidade de preenchimento 20% (-) e 80% (+). Foram feitas 5 réplicas para cada configuração (correspondente a cada teste) num total de 20 peças para todos os testes.

A normalidade dos dados dos grupos foi verificada usando o teste Kolmogorov-Smirnov considerando como hipótese H_0 : que os dados seguem uma distribuição normal e H_1 : que os dados não seguem distribuição normal. O resultado estatístico foi 0,201 e p-valor: 0,150, portanto os dados são normais (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados dos testes Charpy de Energia Absorvida de Impacto (E.A.) Joules para os pontos extremos

Teste	X1	X2	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média E.A.	Desvio Padrão
1	-	-	0.120	0.130	0.130	0.120	0.130	0.126	0.005
2	+	-	0.280	0.280	0.300	0.280	0.300	0.288	0.011
3	-	+	0.230	0.240	0.230	0.230	0.230	0.232	0.004
4	+	+	0.290	0.290	0.290	0.300	0.300	0.294	0.005

Fonte: Autores (2024).

Além disso, para a análise da curvatura, foram realizados os testes para os pontos centrais com densidade de preenchimento de 50%, contabilizando mais 10 amostras (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados dos testes Charpy de Energia Absorvida de Impacto (E.A.) Joules para os pontos centrais

Teste	X1	X2	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média E.A.	Desvio Padrão
5	50	-	0.230	0.230	0.220	0.230	0.220	0.226	0.005
6	50	+	0.270	0.280	0.260	0.280	0.260	0.270	0.010

Fonte: Autores (2024).

Após a realização da análise de variância (ANOVA), os resultados são apresentados na Tabela 4 e foram utilizados para análise e interpretação estatística. A ANOVA permite fornecer uma avaliação das diferenças significativas entre as médias dos grupos para a compreensão dos efeitos dos fatores no experimento (Marques e Marques, 2005). Os resultados da ANOVA revelaram significância dos fatores: densidade de preenchimento e preenchimento híbrido, em relação à medida da energia de impacto, com um nível de significância de $p < 0,05$.

Tabela 4. Análise de Variância (ANOVA) para Energia de Impacto das peças

FV	GL	SQ	Valor F	Valor-p
Densidade de preenchimento	1	0,062720	1005,13	0,000
Preenchimento híbrido	1	0,020280	325,00	0,000
Interação	1	0,012500	200,32	0,000
Curvatura	1	0,001127	18,06	0,000
Erro	21	0,001560		
Total	29	0,098187		

Fonte: Autores (2024).

De acordo com o sumário do modelo, temos $R^2 = 98,41\%$ e $R^2(a_j) = 98,16\%$. Na análise dos resíduos foi constatado que eles seguem uma distribuição normal, são aproximadamente aleatórios e independentes. Ao calcular a contribuição dos fatores (Eq. 1), observou-se que o fator "Densidade de Preenchimento" exibiu a maior contribuição para o modelo com 63,87%, seguido pelo fator "Preenchimento híbrido" com 20,65%. Além disso, esta análise identificou uma interação estatisticamente significativa entre os fatores evidenciada pelo valor-p de interação.

$$P = \frac{SQ_{factor}}{SQ_{Total}} \times 100 \quad [Eq.1]$$

A partir dos dados foi encontrado o modelo de regressão que oferece uma descrição matemática da relação entre os fatores estudados e a energia de impacto, fornecendo assim uma ferramenta valiosa para a compreensão e predição do comportamento do sistema. A equação modelada para a estimativa de absorção de energia ao impacto dentro das condições deste estudo é apresentada na Equação 2.

$$\hat{E} = 0,14167 + 0,001867 P + 0,06767 W - (0,000833 P) * W + 0,01300 C \quad [Eq.2]$$

Em que \hat{E} é o valor da energia de absorção de impacto estimada pela equação Eq.2, P é a porcentagem de preenchimento (em %), W é o fator parede (0 para amostras com preenchimento único e 1 para amostras com preenchimento híbrido) e C é o ponto central. O modelo foi desenvolvido ajustando os dados experimentais em um modelo de interação de dois fatores (2FI) com parâmetros significativos e insignificantes e interação entre fatores, identificados pela técnica ANOVA.

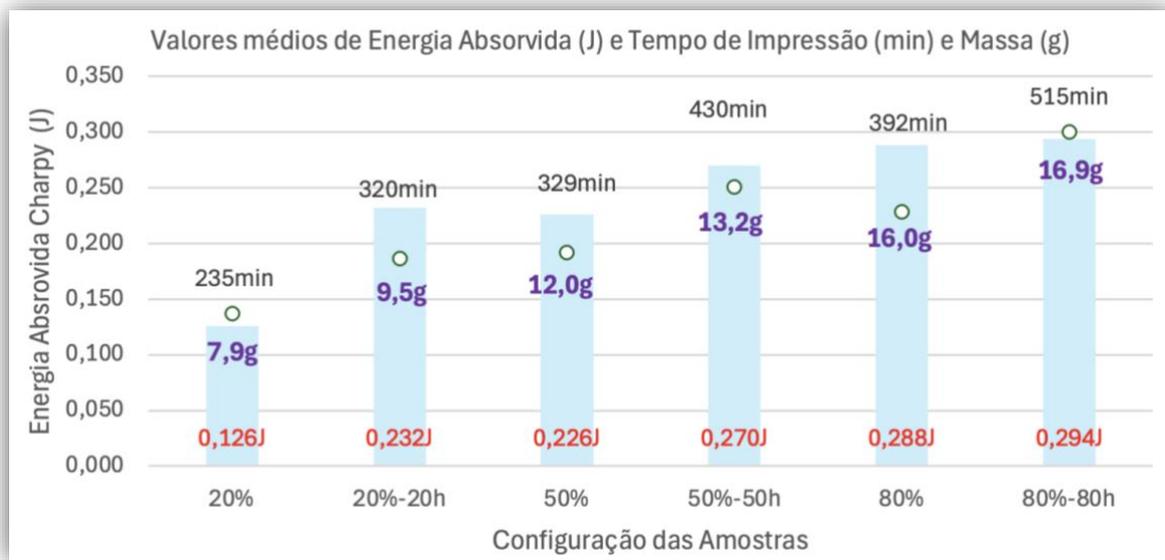
$$P = \frac{SQA + SQB + SQAB + SQ_{curvatura}}{SQ_{Total}} \times 100 \quad [Eq.3]$$

Por meio da análise realizada com a Equação 3 foi constatado que o modelo de regressão desenvolvido usando a ANOVA possui uma significativa capacidade de explicação de 98,41% na variação observada na energia de impacto sob a variável resposta em estudo.

c. Efeito do aumento da densidade de preenchimento na região híbrida sobre a resistência ao impacto das peças

Nesta análise foi avaliado como as diferentes configurações da amostra em relação a densidade de preenchimento influenciam na energia ao impacto (Joules), no tempo de impressão (min) e na massa consumida (g) de material para fabricar o corpo de prova. Para ter mais informações para comparação, as amostras com densidade de preenchimento de 50% (preenchimento único) e 50-50h (preenchimento híbrido) de densidade de preenchimento foram incluídas nesta análise.

Figura 5. Comparação dos resultados de teste de impacto Charpy com massa da peça (gramas) e tempo de impressão (minutos) da amostra



Fonte: Autores (2024).

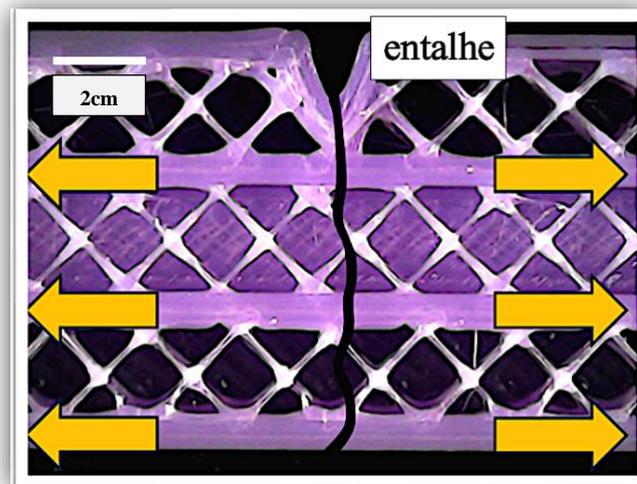
O gráfico da Figura 5 mostra os resultados do teste de impacto para combinações com 20%, 50% e 80% de preenchimento normal e híbrido. Observa-se que, à medida que a densidade de preenchimento aumenta de 20% para 80% para o preenchimento único, a energia de impacto também aumenta de 0,126 para 0,288 Joules. Isso sugere que peças com maior densidade de preenchimento podem exigir mais energia para romper o corpo de prova. Conforme a densidade de preenchimento aumenta, a massa do modelo impresso também aumenta, passando de 7,9 gramas para 20% para 16,0 gramas para 80%. Isso é esperado, pois modelos com maior densidade de preenchimento necessitam mais material e, portanto, resultam em uma massa maior. A mesma avaliação é feita com o tempo de impressão, que aumenta de 235 minutos para 20% para 392 minutos para 80%, onde modelos com maior densidade de preenchimento levam mais tempo para serem impressos, o que é consistente com a ideia de que é necessário mais material e, portanto, mais tempo para impressão dos corpos de prova.

Ao adicionar um preenchimento híbrido, houve aumento na energia de impacto, tempo de impressão e massa da peça. As configurações com densidade de preenchimento híbrido (20%-20h, 50%-50h e 80%-80h) tem a energia de rompimento ao impacto mais alta em comparação com as configurações com densidade de preenchimento único (20%, 50% e 80%). Isso sugere que a inclusão do preenchimento híbrido aumenta a resistência ao impacto da peça. No entanto, o aumento na resistência ao impacto não tem a mesma razão (84,1%, 19,4% e 0,2% respectivamente), indicando que a quantidade de preenchimento pode influenciar de forma variável o desempenho da peça para esta propriedade mecânica. Para densidades de preenchimento acima de 50%-50h, o preenchimento híbrido mostrou-se pouco eficaz no cumprimento de sua função em aumentar a tenacidade da peça, somente aumentando o tempo de impressão e consumo de material.

d. Análise da fratura dos corpos de prova

A análise micrografia das peças após o rompimento, permitiu avaliar como ocorreu a fratura quando usado o recurso do preenchimento híbrido. A figura 6 apresenta uma amostra da configuração 20%-20h após o rompimento no teste Charpy mostrando o percurso da trinca pela seção da amostra.

Figura 6. Trajeto da trinca na seção da peça e forças atuantes. Foto realizada usando microscópio digital com ampliação de 50x

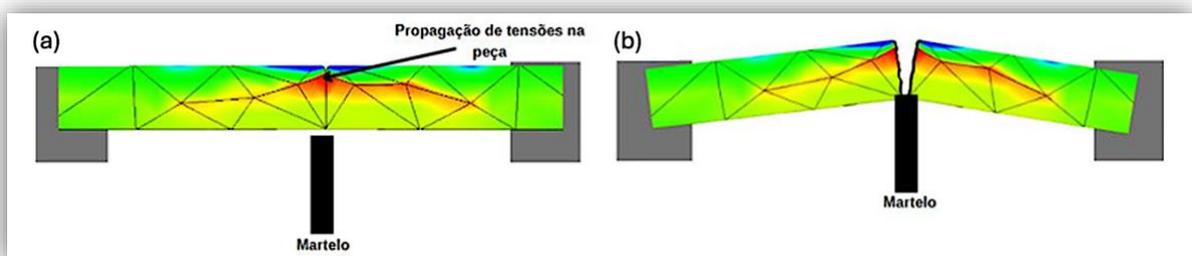


Fonte: Autores (2024).

O aspecto é típico de uma fratura frágil como esperada para este material. O material PLA tem temperatura de transição vítrea (T_g) na faixa de 55 a 60 °C (Farah, et al., 2016), ou seja, acima da temperatura ambiente da realização dos testes, isto favorece uma fratura frágil do material. Também não é observável uma deformação plástica na região da propagação do entalhe, corroborando com a inferência de uma fratura frágil.

A imagem da micrografia mostra que os filamentos que constroem as paredes externas estão em posição perpendicular ao impacto do martelo no momento do choque. Isto sugere que o rompimento destes filamentos ocorre por um esforço de tração. No entanto, os filamentos que compõem o preenchimento da peça mostram um outro tipo de comportamento da fratura, aspecto de rompimento por cisalhamento nas regiões onde o filamento apresenta um afinamento em seu diâmetro (Figura 7).

Figura 7. Representação esquemática do corpo de prova no equipamento e as distribuições de tensões na peça (a) antes e (b) depois do choque do martelo modelada pelo software *Autodesk Inventor Professional 2022*



Fonte: Autores (2024).

Na ilustração, o corpo de prova está apoiado pelas extremidades na garra. O deslocamento do martelo é em direção a região do centro da peça. O martelo ao chocar-se ao corpo de prova exerce uma flexão na região central no lado contrário ao entalhe. Este impacto provoca o início e crescimento da trinca que percorre a seção transversal da peça. Os filamentos que constituem a parede interna do preenchimento híbrido e da externa onde está o entalhe atuam como regiões de reforço, cuja sentido do rompimento é transversal ao contato do martelo por um esforço de tração.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como objetivo principal melhorar a resistência ao impacto Charpy de peças fabricadas em PLA por impressão 3D a partir de um novo design interno da peça. Para isso, foram analisados dois conjuntos de corpos de prova, um com preenchimento único e outro com preenchimento híbrido, e os resultados avaliados quanto à propriedade mecânica de impacto, ao tempo de impressão e à massa final da peça.

Observou-se que o aumento da densidade de preenchimento resultou em um aumento na energia de absorção de impacto, tanto nas peças com preenchimento único quanto nas peças com preenchimento híbrido. Contudo, o aumento da densidade de preenchimento também levou a um maior tempo de impressão e à maior massa da peça.

Em relação ao efeito do preenchimento híbrido, verificou-se um aumento na energia de absorção de impacto em comparação ao preenchimento único, especialmente em baixas densidades de preenchimento, até 20%. Além disso, o preenchimento híbrido resultou em um aumento do tempo de impressão e da massa da peça em comparação ao preenchimento único com o mesmo valor de densidade de preenchimento. A parede externa e o desalinhamento dos filamentos do preenchimento híbrido parecem atuar como reforço, desviando o movimento da trinca e dificultando sua propagação.

Os resultados apresentados neste estudo fornecem dados valiosos para compreender e prever o comportamento das peças em situações nas quais as solicitações mecânicas de impacto são requisitos técnicos para o projeto a ser desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- Chyr, G. & DeSimone, J. M. (2023). Review of high-performance sustainable polymers in additive manufacturing. *Green Chemistry*, 25(2), 453-466. <https://doi.org/10.1039/D2GC03474C>
- Reverte, J. M., Caminero, M. Á., Chacón, J. M., García-Plaza, E., Núñez, P. J., & Becar, J. P. (2020). Mechanical and geometric performance of PLA-based polymer composites processed by the fused filament fabrication additive manufacturing technique. *Materials*, 13(8), 1924. <https://doi.org/10.3390/ma13081924>
- Fico, D., Rizzo, D., Casciaro, R., & Esposito Corcione, C. (2022). A review of polymer-based materials for fused filament fabrication (FFF): focus on sustainability and recycled materials. *Polymers*, 14(3), 465. <https://doi.org/10.3390/polym14030465>
- Bhatia, A. & Sehgal, A. K. (2023). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 81, 1060-1067. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.379>
- Zanjanijam, A. R., Major, I., Lyons, J. G., Lafont, U., & Devine, D. M. (2020). Fused filament fabrication of peek: A review of process-structure-property relationships. *Polymers*, 12(8), 1665. doi: 10.3390/polym12081665
- Jatti, V. S., Sapre, M. S., Jatti, A. V., Khedkar, N. K., & Jatti, V. S. (2022). Mechanical properties of 3D-printed components using fused deposition modeling: optimization using the desirability approach and machine learning regressor. *Applied System Innovation*, 5(6), 112. <https://doi.org/10.3390/asi5060112>
- Hozdić, E. (2024). Characterization and Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM-and SLA-Printed ABS Materials. *Applied Sciences*, 14(2), 649. <https://doi.org/10.3390/app14020649>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101658>
- Tanveer, M. Q., Suhaib, M., & Haleem, A. (2020). A New 3D Benchmarking Artifact to Evaluate Dimensional Accuracy and Geometric Tolerancing of Additive Manufacturing Technique. In *Recent Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of NCAME 2019* (pp. 261-273). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1071-7_22
- Mishra, P. K., Senthil, P., Adarsh, S., & Anoop, M. S. (2021). An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts. *Composites Communications*, 24, 100605. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100605>
- 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. J. Mech. Eng. Sci.*, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1177/0954406219840385>
- Mustafa, M. S., Muneer, M. A., Zafar, M. Q., Arif, M., Hussain, G., & Siddiqui, F. A. (2022). Process parameter optimization for Fused Filament Fabrication additive manufacturing of PLA/PHA biodegradable polymer blend. *International Polymer Processing*, 37(1), 1-14. <http://dx.doi.org/10.1515/ipp-2021-4115>
- Ansari, A. A. & Kamil, M. (2022). Izod impact and hardness properties of 3D printed lightweight CF-reinforced PLA composites using design of experiment. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 5(3), 369-383. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.04.006>
- Ahmed, M., Islam, M. R., Vanhoose, J., Hewavitharana, L., Stanich, A., & Hossain, M. (2016, November). Comparisons of Bending Stiffness of 3D Printed Samples of Different Materials. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 50633, p. V009T12A023). *American Society of Mechanical Engineers*. <http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2016-65119>
- Messimer, S. L., Rocha Pereira, T., Patterson, A. E., Lubna, M., & Drozda, F. O. (2019). Full-density fused deposition modeling dimensional error as a function of raster angle and build orientation: Large dataset for eleven materials. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(1), 6. <https://doi.org/10.3390/jmmp3010006>
- Baptista, R., Guedes, M., Pereira, M. F. C., Maurício, A., Carrelo, H., & Cidade, T. (2020). On the effect of design and fabrication parameters on mechanical performance of 3D printed PLA scaffolds. *Bioprinting*, 20, e00096. <https://doi.org/10.3390/jmmp3010006>
- Şahin, İ., Top, N., & Bülbül, R. (2021). Effect of Infill Density and Infill Pattern on Mechanical Properties in Fused Deposition Modeling (FDM). *Innovative Approaches in Additive Manufacturing Congress (IA4AM)*, Ankara, Türkiye, ss.65-74.
- Khan, S., Joshi, K., & Deshmukh, S. (2022). A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2119-2127. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.433>
- Zisopol, D. G., Ion, N., & Portoaca, A. I. (2023). Comparison of the Charpy Resilience of Two 3D Printed Materials: A Study on the Impact Resistance of Plastic Parts. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(3), 10781-10784. <https://doi.org/10.48084/etasr.5876>
- Tanveer, M. Q., Haleem, A., & Suhaib, M. (2019). Effect of variable infill density on mechanical behaviour of 3-D printed PLA specimen: an experimental investigation. *SN Applied Sciences*, 1, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1744-1>
- Giri, J., Chiwande, A., Gupta, Y., Mahatme, C., & Giri, P. (2021). Effect of process parameters on mechanical properties of 3d printed samples using FDM process. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5856-5861. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.283>
- Ansari, A. A. & Kamil, M. (2022). Izod impact and hardness properties of 3D printed lightweight CF-reinforced PLA composites using design of experiment. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 5(3), 369-383. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.04.006>
- Marques, J. M. & Marques, M. A. M. (2005). *Estatística básica para os cursos de engenharia*. Curitiba: Domínio do Saber.
- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>