



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Estudo do efeito do tipo de preenchimento no comportamento Mecânico de peças fabricadas por *fused deposition modelling* usando o compósito PLA-fibra de carbono

João Filipe de Rezende Martins

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGE) – Universidade Federal do Paraná

Fabiano Oscar Drozda

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGE) – Universidade Federal do Paraná

Aliny Kely Antonelo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGE) – Universidade Federal do Paraná

Marcel Mariano Correa Maceno

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGE) – Universidade Federal do Paraná

Resumo: A manufatura aditiva (MA) permite a produção de peças com geometria complexa, sendo amplamente aplicada em setores como automotivo, aeroespacial, biomédico e industrial. O processo mais acessível de impressão 3D é a modelagem por deposição de filamentos fundidos (FDM), que utiliza diversos materiais poliméricos, incluindo o ácido polilático (PLA) reforçado com fibra de carbono. Este estudo investigou as características mecânicas de 27 corpos de prova impressos em 3D, avaliando a tensão máxima, ductilidade, módulo elástico e tenacidade em diferentes densidades de preenchimento (25%, 50% e 75%) com padrões de preenchimento Octeto, Cúbico e Giróide. Os ensaios de tração, realizados conforme a norma ASTM D638, mostraram que os corpos de prova com 25% de preenchimento apresentaram fratura frágil, enquanto os com 50% e 75% romperam de forma dúctil, com tensão máxima de cerca de 18,5 MPa. O preenchimento Giróide com 75% teve o maior alongamento antes da ruptura, atingindo 6,89% de deformação. Além disso, as amostras com 50% de preenchimento obtiveram o maior valor de tensão máxima específica, evidenciando a importância da densidade e padrão de preenchimento nas propriedades mecânicas das peças impressas.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Efeitos de preenchimento. FDM.

Effect of the type of filler on the mechanical behavior of parts manufactured by fused deposition modeling using PLA-carbon fiber composite

Abstract: Additive manufacturing (AM) allows the production of parts with complex geometries and is widely applied in sectors such as automotive, aerospace, biomedical, and industrial. The most accessible 3D printing process is fused deposition modeling (FDM), which uses various polymer materials, including polylactic acid (PLA) reinforced with carbon fiber. This study investigated the mechanical properties of 3D-printed test specimens, evaluating maximum stress, ductility, elastic modulus, and toughness at different fill densities (25%, 50%, and 75%) with Octet, Cubic, and Gyroid fill patterns. Tensile tests, conducted according to ASTM D638 standards, showed that specimens with 25% infill exhibited brittle fracture, while those with 50% and 75% filled ductilely, with a maximum stress of around 18.5 MPa. The Gyroid fill with 75% infill had the highest elongation before fracture,

reaching 6.89% deformation. Additionally, specimens with 50% infill achieved the highest specific maximum stress value, highlighting the importance of infill density and pattern on the mechanical properties of printed parts.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D Printing. Filling effect. FDM.

1. Introdução

Com o avanço da globalização, a necessidade de escalabilidade e agilidade nos processos produtivos cresceu, e a impressão 3D, ou manufatura aditiva, emergiu como uma solução eficaz. Essa tecnologia está transformando a forma como produtos são projetados, fabricados e distribuídos, com a manufatura aditiva FDM se destacando devido ao seu baixo custo, facilidade de acesso a materiais e precisão na produção de peças (HÜSEYİN KÜRŞAD et al., 2017).

A impressão 3D foi introduzida na década de 1980 por Charles Hull, com a técnica de estereolitografia (SLA) (HULL; ARCADIA, 1986). Desde então, o desenvolvimento contínuo dessa tecnologia reduziu os custos das impressoras 3D, ampliando suas aplicações em escolas, residências e laboratórios. Impressoras 3D estão facilitando a transição de produção em massa para personalização, permitindo a fabricação de pequenos lotes de produtos complexos e personalizados, mesmo em ambientes de larga escala (SULAVIK; WALLER, 2016).

A impressão 3D utiliza dados de modelos tridimensionais para depositar material em camadas, contrastando com métodos tradicionais que removem material para criar peças (RODRIGUES et al., 2017). A modelagem por deposição de material fundido (FDM) utiliza filamentos poliméricos, onde cada camada recém depositada se solidifica e adere às anteriores. A escolha do material e os parâmetros de impressão são cruciais para garantir qualidade estética e mecânica das peças, que são consideradas estruturas compósitas laminadas, resultando em propriedades anisotrópicas (LOVO et al., 2017).

Um dos benefícios da impressão 3D é a capacidade de realizar preenchimentos parciais, o que reduz a densidade interna e o consumo de material (FERNANDEZ VICENTE et al., 2016). Este estudo caracteriza diferentes tipos de preenchimento e suas influências nas propriedades mecânicas, utilizando filamentos de PLA reforçados com fibra de carbono, escolhidos por sua alta resistência à tração (HÜSEYİN KÜRŞAD et al., 2019; PERTUZ et al., 2020). A pesquisa analisa três tipos de preenchimento em três porcentagens distintas, contribuindo para o entendimento das propriedades mecânicas das peças impressas.

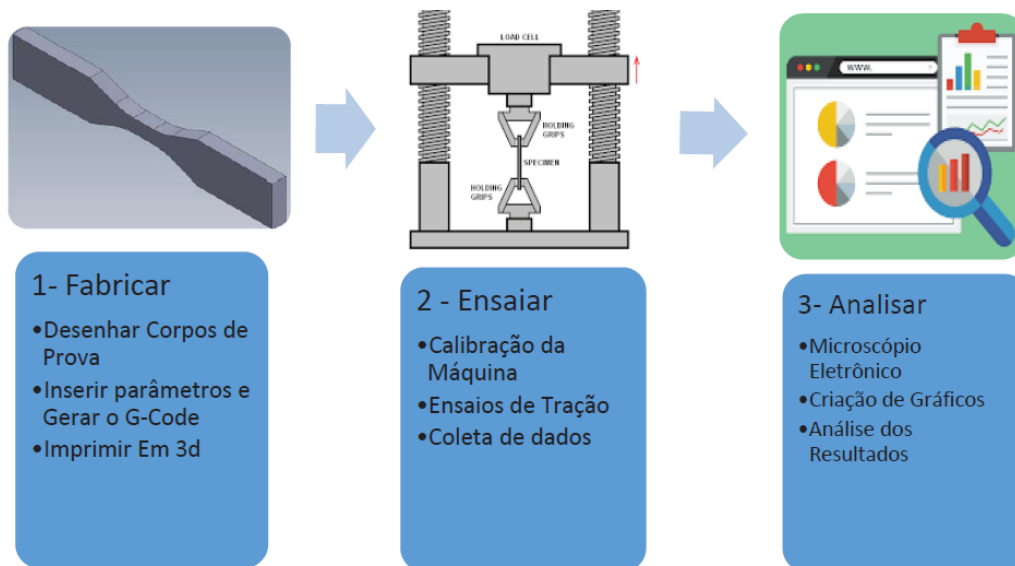
2. Metodologia

A figura 1 mostra as etapas executadas. Os procedimentos foram divididos em três etapas: fabricar, ensaiar e analisar.

Item 1. Fabricar: Na etapa de fabricação dos corpos de prova, os modelos foram primeiramente criados em 3D no software SolidWorks, seguindo a norma ASTM D618 e ASTM D638-14, Tipo III, com espessura de 10 mm. Isso assegurou que a influência dos diferentes tipos de preenchimento impactasse significativamente a resistência final. Os modelos foram salvos no formato STL e importados para o software slicer CURA, onde os parâmetros de impressão foram configurados. Foram utilizados três tipos de preenchimento: Cúbico, Octeto e Giróide, escolhidos por suas propriedades estruturais. Cúbico utiliza cubos empilhados, octeto combina pirâmides de base triangular em orientações alternadas, e giróide apresenta um padrão ondulado que oferece resistência em múltiplas direções. (Figura 2) As amostras foram impressas em três densidades

diferentes (25%, 50% e 75%), totalizando 27 corpos de prova, todos posicionados horizontalmente na mesa de impressão.

Figura 1 – Etapas da metodologia



Fonte: O Autor, (2024)

A impressão foi realizada com a impressora 3D CREALITY, calibrada e configurada para otimizar as propriedades mecânicas das peças, conforme indicado na literatura (CHACÓN et al., 2017). Cada corpo de prova foi impresso individualmente para evitar variações na resistência devido ao resfriamento desigual entre as camadas. Ao todo, foram impressos 27 corpos de prova. Após a impressão, todos os corpos foram medidos e pesados para assegurar a conformidade com as especificações, sem apresentar defeitos visíveis, como trincas ou porosidades. Por fim, as amostras foram hermeticamente embaladas para envio.

Figura 2 – Tipos de preenchimento dos corpos de prova



Fonte: O Autor, (2024)

- Item 2. Ensaiar os corpos de prova: Esta é a etapa em que os corpos de prova impressos serão submetidos a um ensaio de tração, e os dados coletados. É necessário fazer a calibragem da máquina de tração e ensaiar todos os corpos com os parâmetros pré-estabelecidos. A etapa de ensaios de tração foi realizada conforme os parâmetros da norma ASTM D638, iniciando-se pela fixação firme das amostras nas garras da máquina de testes. Os ensaios foram conduzidos a uma velocidade de 5 mm/min até a fratura, garantindo a repetitividade e confiabilidade dos resultados, aspectos essenciais para a análise das propriedades mecânicas das peças. Para assegurar a precisão dos ensaios, foi contratada a Tork Controle Tecnológico de Materiais, uma empresa especializada, localizada em Barra Funda, São Paulo. Todas as amostras foram testadas com sucesso, apresentando resultados convergentes, confirmando que o investimento em um laboratório especializado foi válido, apesar do custo mais elevado.

Para calcular a capacidade do processo de impressão em relação à seção transversal dos corpos de prova, foram utilizadas as equações de Capabilidade do Processo (CP e CPK)

(Equações 1 e 2) (KOTZ et al., 2007). Essas equações permitiram estabelecer a tolerância da seção transversal da peça, levando em consideração a capacidade do processo e da impressora. Os cálculos foram realizados para determinar o intervalo aceitável da seção transversal, assegurando que as amostras atendam às especificações necessárias para análises mecânicas detalhadas. Os detalhes dos cálculos são apresentados no link adicionado ao apêndice deste trabalho.

$$CP = \frac{LSE - LIE}{6 * \sigma} \quad (1)$$

$$CPK = \frac{Xmd - LIE}{3 * \sigma} \quad (2)$$

Onde:

CP = Capabilidade do processo

LSE = Limite superior especificado

LIE = Limite inferior especificado

σ = Desvio padrão das amostras

CPK = Capabilidade do processo K

Xmd = Mediana das amostras

A impressão 3D permite variar a densidade do preenchimento das peças, que pode ser ajustada de 0% (totalmente oca) a 100% (totalmente sólida). Essa flexibilidade é útil, pois permite criar peças parcialmente ocas quando a resistência estrutural não é necessária, economizando material. Por exemplo, peças decorativas podem ter densidade de preenchimento de 10-20%, enquanto itens que precisam de mais resistência devem ter entre 25-50%. A escolha da densidade depende da funcionalidade da peça (CHACÓN et al., 2017; POPESCU et al., 2018).

3. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a fabricação e ensaio das amostras.

Os ensaios de tração foram realizados para avaliar o comportamento mecânico de corpos de prova impressos em 3D, com foco nas variáveis de carga aplicada e alongamento resultante. Utilizou-se o software Excel para plotar os gráficos de Tensão x Deformação de cada amostra. Os ensaios foram conduzidos em um laboratório sem controle de temperatura, mas todos os testes ocorreram em um ambiente com temperatura média de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, conforme indicado nos laudos anexos.

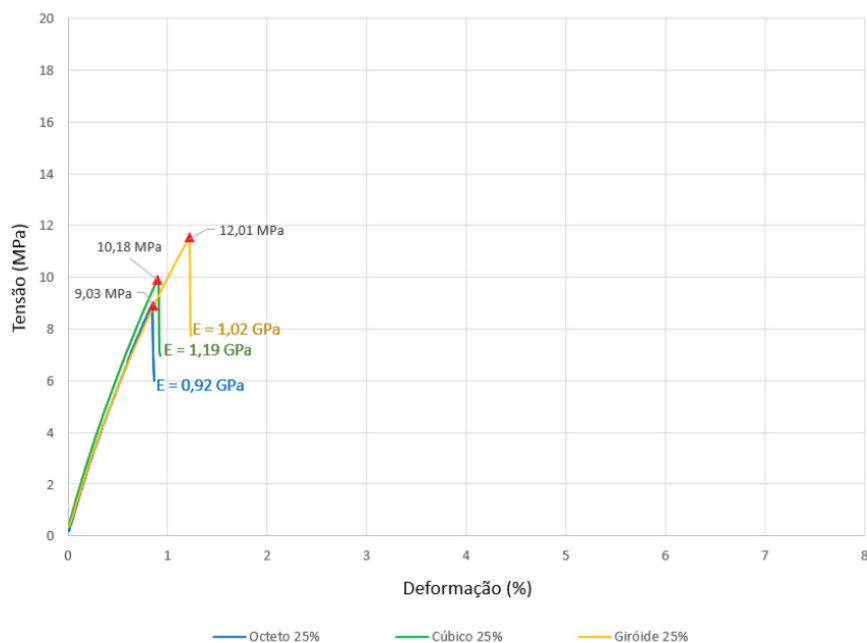
3.1 Comparação entre tipos de preenchimento com a mesma densidade (25% de densidade de preenchimento)

O Gráfico 1 apresenta os resultados das curvas médias de Tensão x Deformação para corpos de prova com 25% de densidade de preenchimento, comparando diferentes tipos de preenchimento: Giróide, Cúbico e Octeto. Notou-se que todos os corpos de prova romperam sob um regime frágil, o que indica uma baixa capacidade de deformação antes da falha. O preenchimento tipo Giróide destacou-se ao apresentar a maior tensão máxima, atingindo 12,01 MPa, enquanto o Cúbico e o Octeto apresentaram tensões máximas de 10,18 MPa e 9,03 MPa, respectivamente. Este resultado sugere que a geometria do preenchimento tem um impacto significativo na resistência à tração.

Um aspecto interessante observado foi a baixa deformação dos corpos de prova, com o Giróide apresentando uma deformação máxima até o rompimento de apenas 1,24%. Os módulos de elasticidade calculados foram de 0,92 GPa para Octeto, 1,19 GPa para Cúbico

e 1,02 GPa para Giróide, demonstrando que os valores são relativamente homogêneos entre os diferentes tipos de preenchimento com a mesma densidade.

Gráfico 1 - Comparativo dos preenchimentos com 25% de densidade

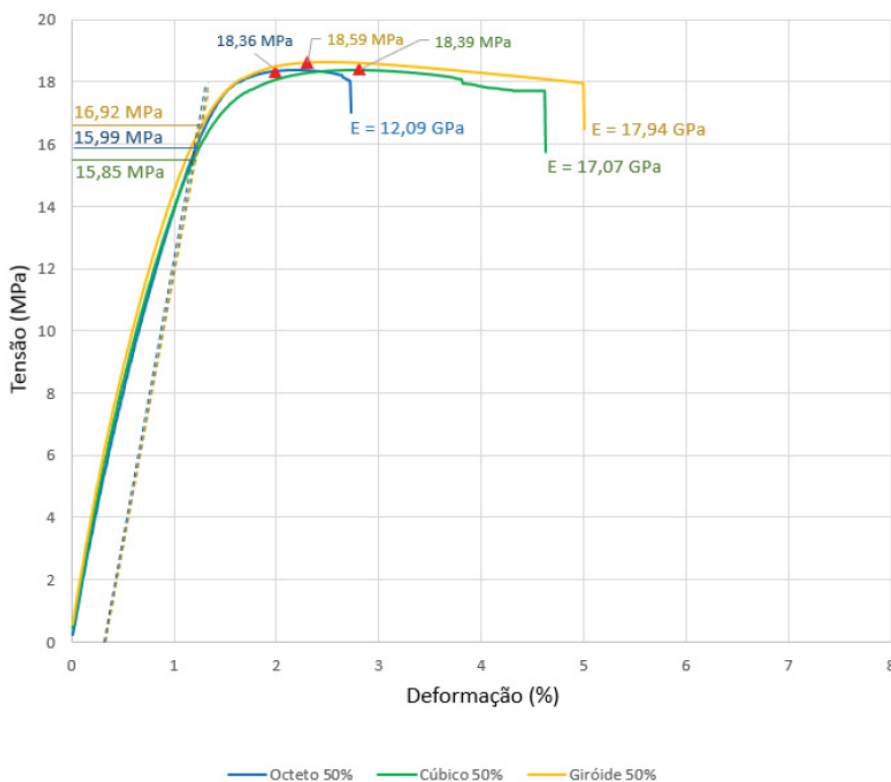


FONTE: O Autor, (2024)

3.2 Comparação entre tipos de preenchimento com a mesma densidade (50% de densidade de preenchimento)

Os resultados apresentados no Gráfico 2 referem-se aos ensaios realizados em amostras com 50% de densidade de preenchimento.

Gráfico 2 - Comparativo dos preenchimentos com 50% de densidade



FONTE: O Autor, (2024).

Observou-se que, nesta condição, todos os corpos de prova romperam de forma dúctil, evidenciando uma maior capacidade de deformação plástica em comparação com as amostras de 25%. As tensões de escoamento para os diferentes preenchimentos foram de 15,85 MPa (Cúbico), 15,99 MPa (Octeto) e 16,92 MPa (Giróide), mostrando resultados próximos entre si, com variações inferiores a 1%.

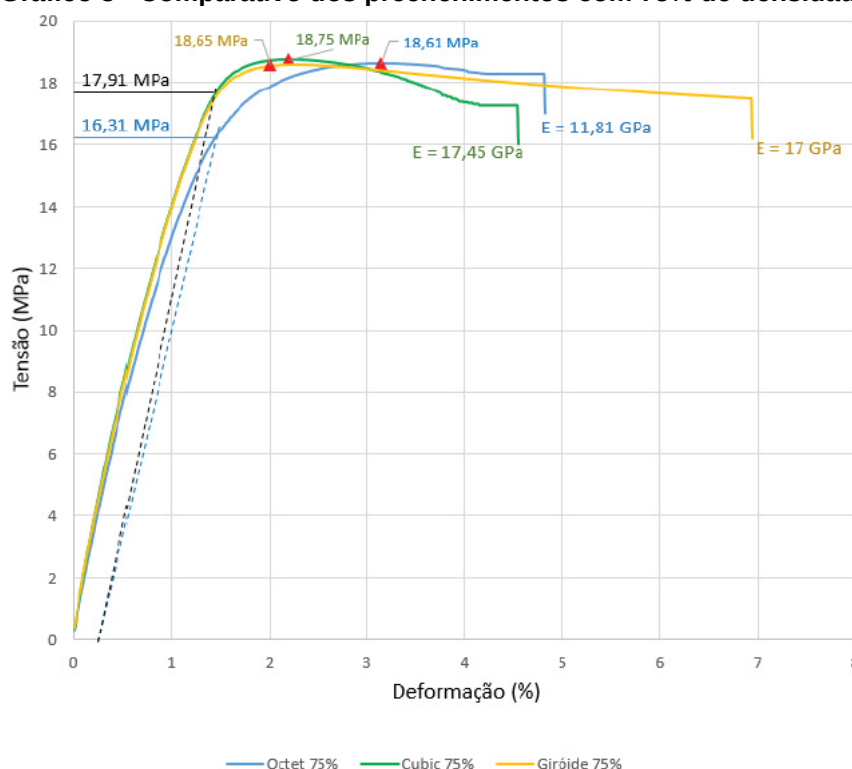
Além disso, as tensões máximas também aumentaram consideravelmente, atingindo 18,36 MPa para Octeto, 18,59 MPa para Giróide e 18,39 MPa para Cúbico. Este aumento representa aproximadamente 54% em relação às tensões máximas obtidas nas amostras com 25% de densidade de preenchimento, indicando uma relação direta entre a densidade do preenchimento e a resistência mecânica

O módulo de elasticidade para as amostras com 50% de densidade de preenchimento foi de 12,09 GPa para Octeto, 17,07 GPa para Cúbico e 17,94 GPa para Giróide. Aqui, a peça com preenchimento Octeto apresentou um valor de módulo de elasticidade cerca de 31% menor em comparação aos outros tipos de preenchimento. A deformação máxima nesta condição foi mais significativa, com o preenchimento Giróide apresentando 5% de alongamento antes da ruptura, seguido pelo Cúbico com 4,7% e o Octeto, que obteve o menor valor de 2,7%.

3.3 Comparação entre tipos de preenchimento com a mesma densidade (75% de densidade de preenchimento)

O Gráfico 3 ilustra os resultados médios para a curva de Tensão x Deformação obtidos para amostras com 75% de densidade de preenchimento.

Gráfico 3 - Comparativo dos preenchimentos com 75% de densidade



FONTE: O Autor, (2024).

Novamente, todos os corpos de prova romperam de forma dúctil, apresentando um comportamento mecânico semelhante ao observado nas amostras com 50% de densidade, mas com valores significativamente mais altos para Tensão de Escoamento, Tensão Máxima e Deformação Máxima.

As tensões de escoamento foram calculadas em 16,11 MPa para Octeto e 17,91 MPa para Cúbico e Giróide, evidenciando uma proximidade nos resultados em relação às amostras com 50% de preenchimento. Isso pode ser explicado pela natureza da deformação elástica, que, até o ponto de escoamento, se dá pela extensão das cadeias da fase amorfa. Após a remoção da tensão, as cadeias retornam à sua posição original, resultando em pouca variação nos dados para essas densidades e geometrias.

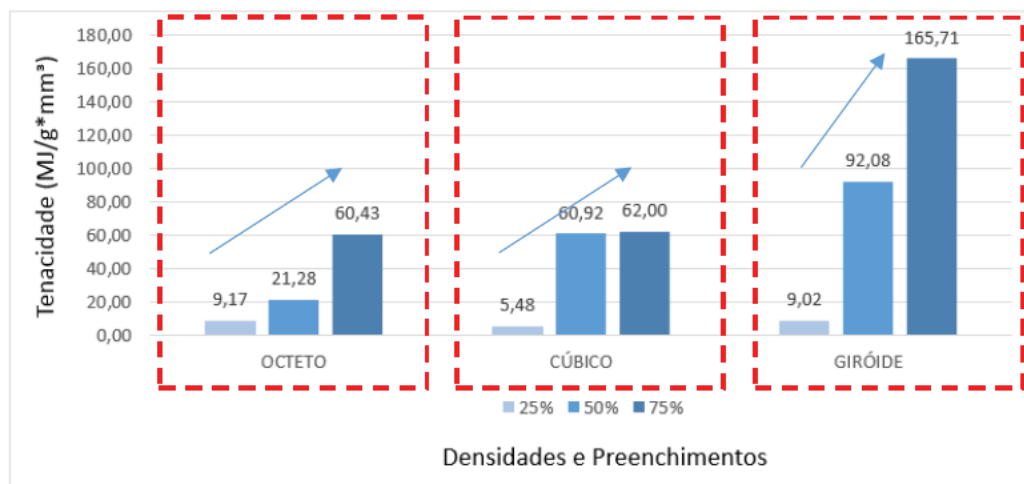
As tensões máximas obtidas foram de 18,61 MPa para Octeto, 18,65 MPa para Giróide e 18,75 MPa para Cúbico, apresentando valores mais elevados em comparação com as amostras de 25% e próximos aos resultados de 50% de densidade de preenchimento. O preenchimento Giróide novamente se destacou, apresentando o maior alongamento antes da ruptura, com uma deformação máxima de 6,92%. O Cúbico alcançou aproximadamente 4,8%, enquanto o Octeto obteve 4,4%.

3.4 Tenacidade

O módulo de tenacidade (valor numérico da energia absorvida pela peça até o rompimento) foi calculado para comparar as amostras com 25%, 50% e 75% de preenchimento. Os resultados são apresentados no gráfico 4.

Os dados mostram que a Tenacidade dos corpos de prova aumentou com a densidade de preenchimento. As amostras com 25% mostram baixos valores de Tenacidade mesmo com as diferentes geometrias de preenchimento. Para as amostras com 75% em relação a 25%, a Tenacidade aumentou aproximadamente em 7x para o Octeto, 11x para a Cúbica e 18x para a Giróide. A elevada Tenacidade do corpo de prova Giróide com 75% está associada ao alto valor de alongamento que a amostra sofreu até a ruptura em torno de 7%.

Gráfico 4 - Resultados numéricos da comparação da tenacidade entre as amostras de 25%, 50% e 75% de preenchimento



FONTE: O Autor, (2024).

4. Conclusões

Neste trabalho, foram caracterizadas as propriedades de corpos de prova impressos em 3D utilizando a tecnologia FDM, por meio de ensaios de tração conforme a norma ASTM D618 e ASTM D638. O objetivo foi determinar os valores de tensão máxima, alongamento máximo e limite de escoamento. Foram fabricados 27 corpos de prova em PLA com fibra de carbono, nas densidades de 25%, 50% e 75%, empregando os tipos de preenchimento Octeto, Cúbico e Giróide.

Os principais resultados obtidos revelaram que, nos corpos de prova com 25% de preenchimento, a fratura ocorreu de maneira frágil. Com o aumento da densidade para 50% e 75%, observou-se um aumento não linear da ductilidade do material. Além disso, a fratura da casca dos corpos de prova ocorreu ao atingir 1,18% de deformação. O maior alongamento, de 6,89%, foi obtido com o preenchimento Giróide, que se destacou devido ao seu formato ondulado, permitindo uma melhor dissipação das tensões.

Em relação à tensão máxima, as amostras com 50% de densidade apresentaram os maiores valores de tensão máxima específica [MPa/g]. Para 75% de densidade, os melhores resultados de tenacidade específica [MJ/g*mm³] foram observados no preenchimento Giróide. A tensão máxima alcançada foi de 18,5 MPa no corpo de prova com preenchimento Cúbico e 75% de densidade, com todas as amostras de 50% e 75% obtendo valores próximos, com menos de 2% de variação. Esses resultados podem orientar a seleção de parâmetros de impressão para peças sujeitas a esforços, como dispositivos de içamento ou ganchos.

Para a continuidade do trabalho, são sugeridas três abordagens. A primeira é a implementação de um sistema de aquecimento pré-deposição, que direcionaria ar quente à peça durante a impressão, melhorando a adesão entre os filamentos. A segunda abordagem envolve a alteração do *G-code* para alinhar os filamentos na direção das forças de tração, utilizando preenchimentos mais retos ou ondulados. Por fim, a terceira recomendação é testar perímetros em “zigue-zague” em vez de linhas retas, visando melhorar a resistência estrutural e minimizar rupturas.

Referências

CHACÓN, J.M.; Caminero, M.A.; García-Plaza, E.; Núñez, P.J. **Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection**. Mater. Des, 124, 143–157. 2017

FERNANDEZ-VICENTE, Miguel, Wilson Calle, Santiago Ferrandiz, and Andres Conejero. **Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing**. 3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING Volume 3, Number 3, 2016.

HULL, C. W.; ARCADIA, C. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. U.S. Patent Documents, 1986.

HÜSEYİN KÜRŞAD SEZER* , OĞULCAN EREN , HÜSEYİN RIZA BÖRKLÜ , VEYSEL ÖZDEMİR **Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties**. 2019. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 34(2), pp. 663-674. 2019

KOTZ Samuel; Norman L. Johnson. **Delicate Relations Among The Basic Process Capability Indices Cp, Cpk and Cpm, And Their Modifications**. Communications in Statistics - Simulation and Computation Volume 28, 1999 -Issue 3 Pages 849-866. 2007.

LOVO, João Fiore Parreira, Carlos Alberto Fortulan. **Estudo De Propriedades Mecânicas E Anisotropia Em Peças Fabricadas Por Manufatura Aditiva Tipo FDM**. Mechanical strength. Int J AdvManuf Technol 89(5–8):2175–2191. 2017

PERTUZ, A.D., Díaz-Cardona, S., González-Estrada. **Static and fatigue behaviour of continuous fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by fused deposition modelling technique**. International Journal of Fatigue v130, 105275. 2020

POPESCU, D.; Zapciu, A.; Amza, C.; Baci, F.; Marinescu, R. **FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review**. Polymeric Tests, 69, 157–166. 2018

RODRIGUES, V. P.; Zancul, De S.E.; Mançanares, G. C.; Giordano, M. C.; Salerno, S.M. **Additive manufacturing: state-of-the-art and application framework**, 2017. RHYS Jones, Patrick Haufe, Edward Sells, Pejman Iravani. **RepRap – the replicating rapid prototyper**. Robotica, volume 29 Special Issue 1. 2011

SULAVIK, C.; WALLER, T. **3D Printing comes of age in US industrial Manufacturing**. PwC and Manufacturing Institute, 2016.