



DESAFIOS NA CORRELAÇÃO ENTRE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO PARA PEÇAS DE IMPRESSÃO 3D: PROPRIEDADES MECÂNICAS PODEM SER PREVISTAS?

Tessaro, E.B.; Boeira, J.O.; Bischoff, E.; Simon, D.A.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Rio Grande do Sul – IFRS - Campus Farroupilha
Av. São Vicente, 785 | CEP: 95174-274 | Farroupilha/RS
Autor correspondente: douglas.simon@farroupilha.ifrs.edu.br

RESUMO

Este estudo investiga a discrepância entre Análise de Elementos Finitos (FEA) e ensaios mecânicos em peças impressas por Manufatura Aditiva por Extrusão de Material, projetadas por Design Generativo. Sugere-se a necessidade de um fator de correção para alinhar resultados simulados e experimentais. Diferenças significativas foram observadas na tensão e deformação, com variações de -44,34% e +127,03%, respectivamente. A simulação FEA identifica com precisão as áreas suscetíveis à falha, confirmadas em ensaios físicos. Propomos estratégias para otimizar a correlação entre simulação e realidade, abordando variáveis complexas inerentes ao processo FDM e aumentando a confiabilidade em aplicações exigentes.

Palavras-chave: manufatura aditiva, análise de elementos finitos, design generativo, ensaios mecânicos

INTRODUÇÃO

Para poder viabilizar de uma forma mais eficiente a fabricação de componentes, as tecnologias de manufatura aditiva surgiram. A mais popularizada é por meio da impressão 3D por filamento, conhecida como Manufatura Aditiva por Extrusão de Material ou Fabricação por Filamento Fundido (FDM) [1, 2]. Consiste em um processo produtivo que apresenta características especiais, não observadas em outros métodos tradicionais, com diversas variáveis que podem afetar no resultado do processo [3] [4]. Por isso, existe uma comunidade ampla de pesquisadores nessa área, que trazem

novidades de aplicação aumentando a eficiência de fabricação de peças [5, 6]. Inicialmente aplicada com foco em prototipagem rápida, atualmente também é amplamente usada na fabricação de componentes especiais [7, 8].

Ao longo dos anos, vem-se acelerando o desenvolvimento de softwares de modelagem computacional, tornando-se ferramentas essenciais de engenharia. O desenho auxiliado por computador (CAD) possibilita a criação de modelos tridimensionais altamente precisos de componentes mecânicos, sistemas e máquinas, além da elaboração de desenhos detalhados com uma precisão notável. Sua influência é observada em diversas áreas da engenharia, desde o projeto de máquinas complexas até a otimização de estruturas e sistemas [9, 10] [11]. A colaboração entre equipes de engenheiros é facilitada, pois os arquivos digitais podem ser compartilhados e editados de maneira síncrona, proporcionando uma comunicação mais eficaz e uma tomada de decisão mais assertiva, além de proporcionar a aplicação em outras ferramentas de engenharia [12].

Em contraste com abordagens tradicionais do desenho CAD, o Design Generativo (DG) permite que a inteligência artificial (IA) crie soluções de modelo de maneira iterativa, explorando múltiplas variáveis, como esforços, tensões, restrições de espaço, custos de fabricação e até mesmo critérios estéticos. O design generativo é frequentemente utilizado em conjunto com simulações e análises de engenharia, possibilitando iterações contínuas e refinamento das soluções geradas [5, 7, 10].

Entretanto, ainda são escassos os testes de validação das simulações geradas por DG para objetos produzidos por FDM. Este processo enfrenta limitações significativas no que diz respeito à confiabilidade mecânica das peças fabricadas, especialmente devido à variabilidade das propriedades mecânicas em função dos parâmetros de máquina [13]. Fatores como temperatura de extrusão, velocidade de impressão, e padrão de preenchimento podem causar variações consideráveis na adesão entre camadas, resultando em inconsistências estruturais que comprometem a integridade e o desempenho mecânico das peças [5-7]. Além disso, a orientação das camadas durante a impressão pode influenciar drasticamente a resistência final, gerando anisotropias indesejadas. Essa variabilidade torna desafiadora a predição por

meio da simulação, em especial em situações que exigem alta confiabilidade mecânica, limitando seu uso em contextos industriais [8, 11, 12, 14].

Dessa forma, este estudo visa investigar a discrepância entre os resultados de simulação CAE e os ensaios mecânicos, especificamente no contexto da fabricação de peças por impressão 3D projetadas por técnica de Design Generativo. A hipótese levantada sugere que há a necessidade de um fator de correção para alinhar os resultados simulados com os obtidos experimentalmente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelamento e simulação

Para o modelamento da peça por Design Generativo foi utilizado o programa Fusion 360 com o módulo de Generative Design ativado. Para as análises estáticas foi utilizado o Solidworks Simulation 2021. A geometria de referência consiste no formato de fixação, apresentado na Figura 1a, composto por quatro pontos de apoio das cabeças de parafuso e a região da haste que terá contato durante o ensaio mecânico. Já a geometria de restrição consiste nos limitantes físicos para geração do modelo, apresentado na Figura 1b. A partir disso, foi gerado o seguinte modelo demonstrado na Figura 2, após 33 iterações, identificado como f).

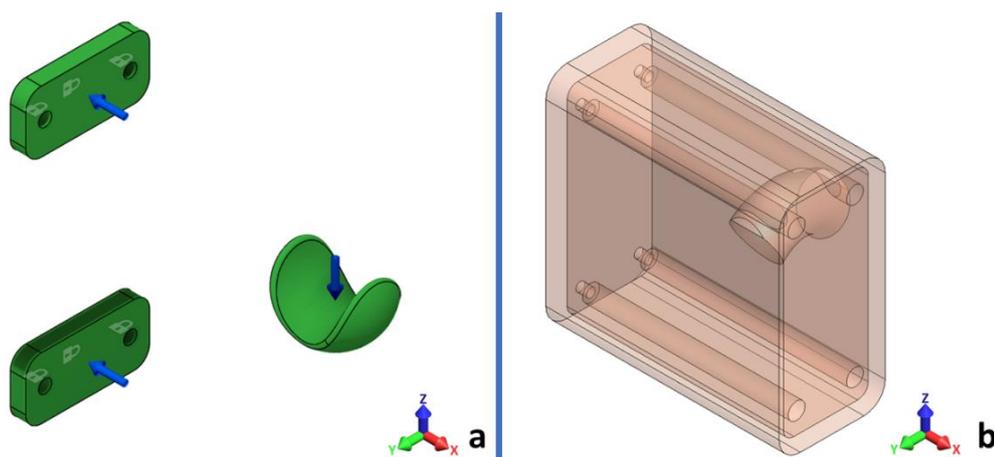


Figura 1. Modelamentos base para criação de DG: a) referência e b) restrição

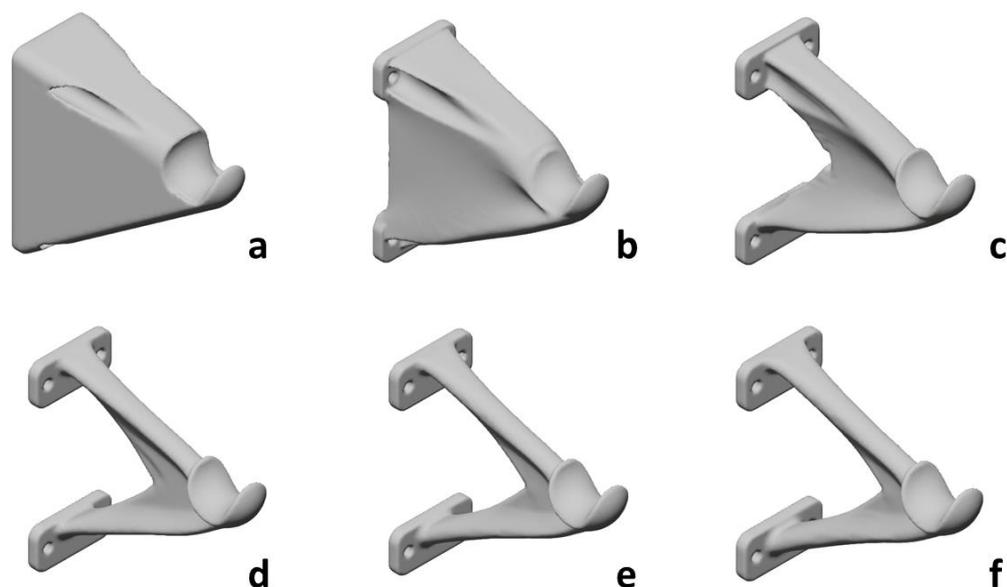


Figura 2. Modelos gerados pela ferramenta de Design Generativo. a) iteração 01, b) iteração 04, c) iteração 10, d) iteração 17, e) iteração 25 e f) iteração 33.

Além das condições de contorno identificadas na Figura 1, foram aplicadas as seguintes condições especiais para a ferramenta de design generativo: minimizar a massa; fabricação sem restrição orientação; espessura mínima de 3 mm da base e força aplicada no local de contato da haste com valor de 2500 N.

Fabricação de modelos

O software de fatiamento usado para a impressão de 3D foi o UltiMaker Cura, versão 5.3.1. A máquina utilizada é a impressora Anycubic, modelo Mega S, com volume de impressão de 210 x 210 x 205 mm. O material aplicado foi um filamento de PLA com diâmetro de 1,75 mm, do fabricante F3DB.

Ensaio mecânicos

Foi utilizado a máquina de ensaios universal do fabricante EMIC, modelo DL 20000, com célula de carga de 5kN e velocidade de deformação de 10mm/min, usando uma adaptação da norma ASTM D638. As peças foram presas ao equipamento usando um gabarito especial confeccionado para

prender a peça na base do equipamento, conforme Figura 3. Após a ruptura, os modelos foram inspecionados com uma lupa de ampliação marca LEICA modelo KL300 LED a fim de identificar se a ruptura ocorreu por presença de falha construtiva (vazios ou fissuras geradas pela impressão). As imagens não são apresentadas neste trabalho.

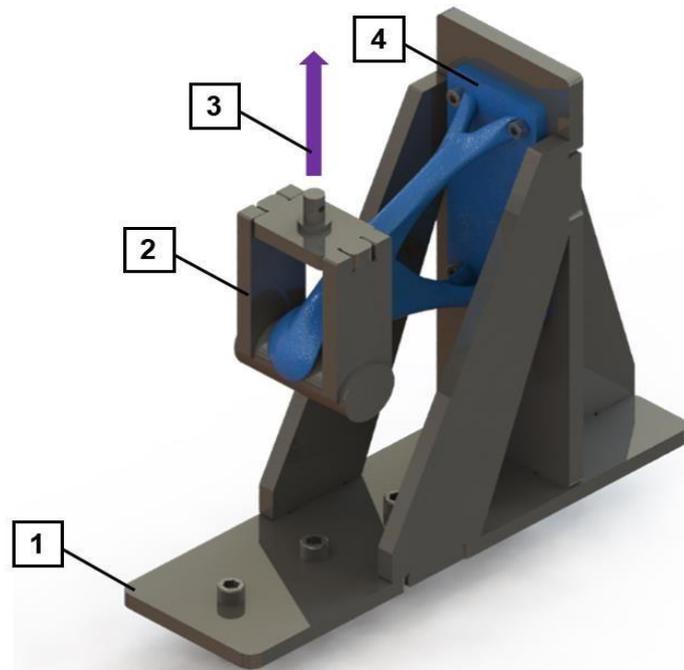


Figura 3. Montagem do dispositivo de teste. 1) Base de apoio na estrutura da máquina de ensaios universal, 2) Haste de tração, 3) direção do ensaio e 4) componente fixado para ensaio.

RESULTADOS

Análise de Elementos Finitos

A tabela 1 apresenta os dados de massa, tensão máximo, deslocamento máximo e o fator de segurança do modelo ensaiado considerando a aplicação da carga de 2500N. O resultado de análise estática, com o diagrama de distribuição de tensões é na Figura 4. É possível identificar que o modelo DG apresenta tensões máximas superiores ao valor de 46 MPa, que é o valor de referência de limite de escoamento, portanto, acima do limite de 24 Mpa para o PLA, indicando que não deve suportar a carga testada.

Tabela 1. Tabela dos dados obtidos com a simulação para massa do modelo, tensão máxima, deslocamento máximo e fator de segurança calculado.

Modelo de peça	Massa (g)	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento Máximo (mm)	Fator de segurança
DG	359,60	61,00	1,95	0,66

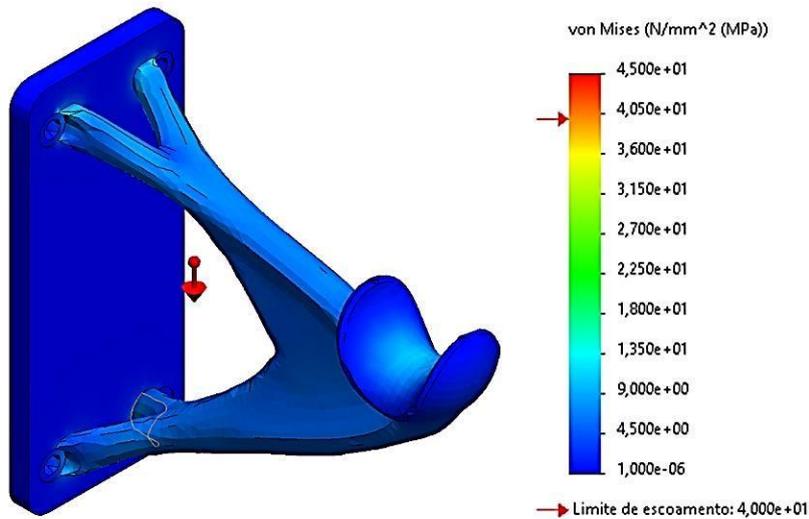


Figura 4. Resultados das distribuições de tensões na simulação da peça

A figura 5 indica as regiões com maior concentração de tensão e passíveis de falha. A região destacada na cor azul indica que haverá o rompimento quando o material for submetido ao esforço de 2500N.

Ensaio Mecânico

A Tabela 2 apresenta os valores de força máxima e deslocamento máximo para três corpos de prova. A Figura 6 exibe a imagem da base após o ensaio mecânico no modelo. São apresentados os pontos de ruptura das pernas de ligação com a base, chamadas de P1, P2, P3 e P4, que ocorram em diferentes alturas, indicando heterogeneidade da resistência mecânica ao longo do modelo. A figura 7 apresenta uma visão geral das alturas desses pontos para dois corpos de prova distintos (DG01 e DG03).

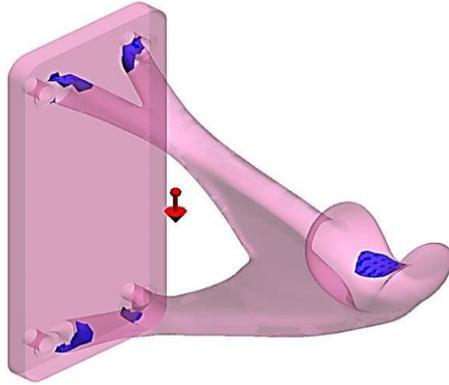


Figura 5. Resultados das distribuições de tensões na simulação da peça

Tabela 2. Dados obtidos com o ensaio mecânico das peças DGA

Corpo de prova	Força máxima (N)	Desl. Máx. (mm)
DG 01	3252,6	5,26
DG 02	3151,6	5,56
DG 03	3142,5	4,52
Média	3182,2	5,11



Figura 6. Modelo após ensaio, indicando os pontos de ruptura com alturas diferentes

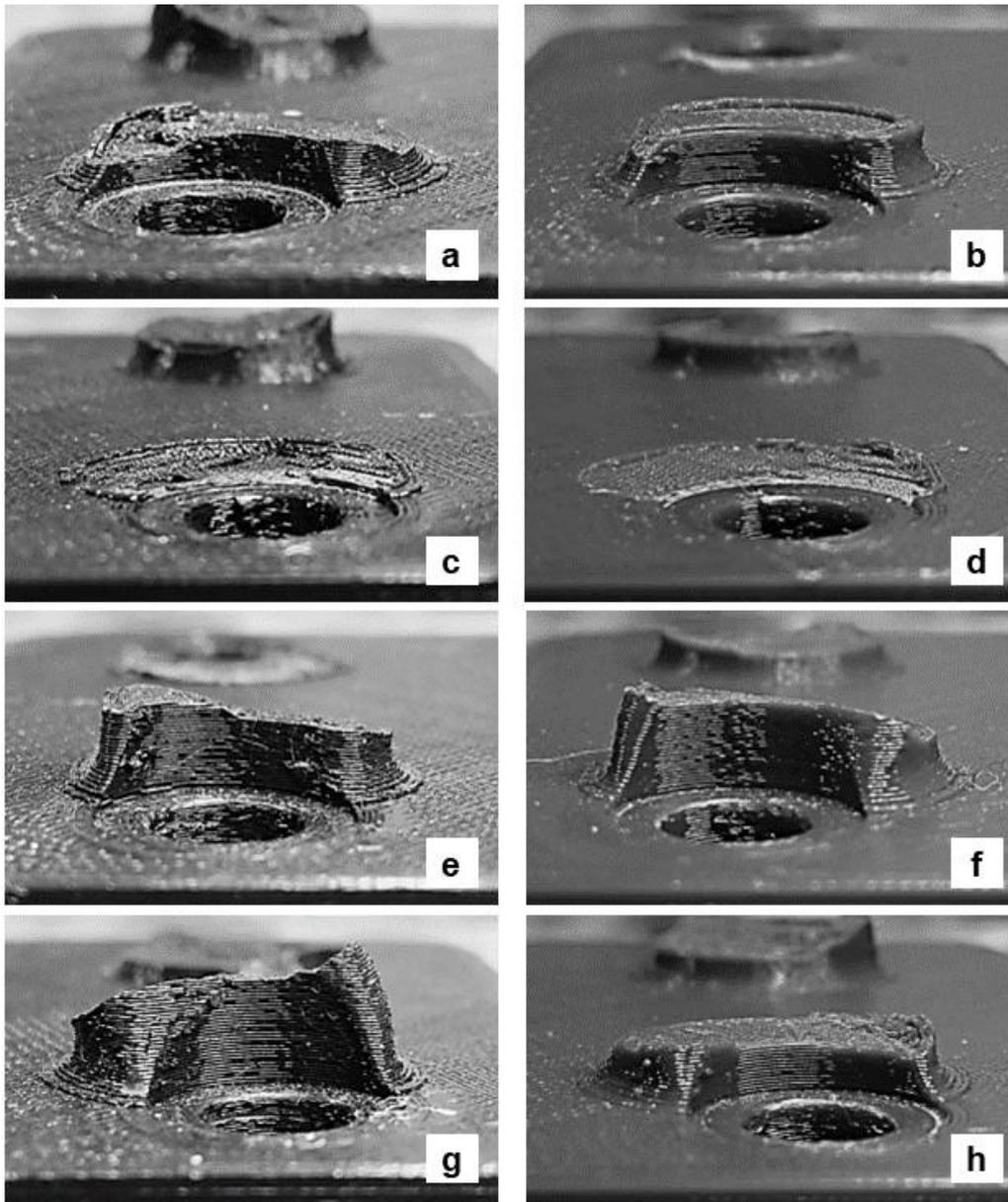


Figura 7. Pontos de ruptura dos corpos de prova: a) P1-DG01, b) P1-DG03, c) P2-DG01, d) P2-DG03, e) P3-DG01, f) P3-DG03, g) P4-DG01, h) P4-DG03

A comparação entre a peça real e a simulação FEA revela uma boa correlação entre os locais identificados como críticos na análise computacional, sugerindo que a FEA foi eficaz em prever os locais de falha potencial. Essa correlação é fundamental para validar o uso de FEA como uma ferramenta confiável para prever o comportamento mecânico de peças impressas em 3D.

Comparativo entre FEA e Ensaio Mecânico

Utilizando os dados da simulação FEA, com a aplicação de uma força de 2500 N na região de içamento, e os dados dos ensaios mecânicos (considerando o momento na curva de tração com a mesma força aplicada), é possível ter uma indicação do erro na simulação. A tabela 3 apresenta os dados tensão e deslocamento e a variação percentual entre simulado e ensaiado. A tensão é calculada a partir da área de ruptura mensurada, identificada como 698,62 mm².

Tabela 3. Comparação entre simulação e ensaio mecânico para aplicação de 2500 N

Tensão FEA (MPa)	Tensão EM (MPa)	Variação (%)	Desloc. FEA (mm)	Desloc. EM (mm)	Variação (%)
21,02	11,70	-44,34	1,85	4,2	+127,03

Foi identificada, dessa forma, uma defasagem muito alta nos resultados estimados pela simulação em relação aos observados no ensaio mecânico. Esta pode ser explicada pela orientação de impressão e presença de vazios produzidos durante a impressão dos corpos de prova não serem computados nos modelos de simulação.

A peça impressão apresenta um deslocamento maior do que a simulação, o que pode ser explicado pela deformação das regiões entre camadas (direção Z), sabidamente menos resistentes do que a orientação dentro da camada (direção XY). A tensão foi inferior pela natureza da região de ruptura, que apresenta um perfil rugoso e não paralelo, o que dissipa a energia de ensaio. Esse comportamento é mais bem representado nas rupturas indicadas na Figura 7 (a), (e), (f) e (g).

CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados neste trabalho observou-se a complexidade da correlação entre os valores simulados por meio de FEA e o resultado observado nos ensaios mecânicos. Da forma que se apresenta, não é recomendado a aplicação de FEA para peças impressas em FDM, dada a discrepância encontrada.

Torna-se necessário mitigar este erro, reduzindo a um patamar que torne viável a simulação FEA de peças impressas e o uso de métodos de Design Generativo para construção de projetos mecânicos que sejam produzidos por manufatura aditiva. Medições de rigidez em cada sentido de impressão (*flat, on side e top*) são aconselhadas, utilizando a razão entre o menor valor e o parâmetro discriminado na base de dados do software de simulação (para módulo de Young e Coeficiente de Poisson), elevando o fator de segurança do projeto.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS).

REFERÊNCIAS

1 - Arrigo, R. and A. Frache. FDM printability of PLA based-materials: the key role of the rheological behavior. *Polymers*. v. 14, n. 9, p. 1754, 2022.

2 - Bertolino, M., D. Battezzato, R. Arrigo and A. Frache. Designing 3D printable polypropylene: Material and process optimisation through rheology. *Additive Manufacturing*. v. 40, n. p. 101944, 2021.

3 - Peloquin, J., A. Kirillova, C. Rudin, L. Brinson and K. Gall. Prediction of tensile performance for 3D printed photopolymer gyroid lattices using structural porosity, base material properties, and machine learning. *Materials & Design*. v. 232, n. p. 112126, 2023.

4 - Smirnov, A., A. Seleznev, P. Peretyagin, E. Bentseva, Y. Pristinskiy, E. Kuznetsova and S. Grigoriev. Rheological characterization and printability of polylactide (PLA)-alumina (Al₂O₃) filaments for fused deposition modeling (FDM). *Materials*. v. 15, n. 23, p. 8399, 2022.

5 - Doshi, M., A. Mahale, S. K. Singh and S. Deshmukh. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*. v. 50, n. p. 2269-2275, 2022.

6 - Fadeel, A., H. Abdulhadi, G. Newaz, R. Srinivasan and A. Mian. Computational investigation of the post-yielding behavior of 3D-printed polymer lattice structures. *Journal of Computational Design and Engineering*. v. 9, n. 1, p. 263-277, 2022.

7 - Guerra Silva, R., C. Salinas Estay, G. Morales Pavez, J. Zahr Viñuela and M. J. Torres. Influence of geometric and manufacturing parameters on the compressive behavior of 3D printed polymer lattice structures. *Materials*. v. 14, n. 6, p. 1462, 2021.

8 - Lalegani Dezaki, M., M. K. A. Mohd Ariffin and S. Hatami. An overview of fused deposition modelling (FDM): Research, development and process optimisation. *Rapid Prototyping Journal*. v. 27, n. 3, p. 562-582, 2021.

9 - Sheoran, A. J. and H. Kumar. Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. *Materials Today: Proceedings*. v. 21, n. p. 1659-1672, 2020.

10 - Syrlybayev, D., B. Zharylkassyn, A. Seisekulova, M. Akhmetov, A. Perveen and D. Talamona. Optimisation of strength properties of FDM printed parts—A critical review. *Polymers*. v. 13, n. 10, p. 1587, 2021.

11 - Mohan, N., P. Senthil, S. Vinodh and N. Jayanth. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping*. v. 12, n. 1, p. 47-59, 2017.

12 - Peloquin, J., Y. Han and K. Gall. Printability and mechanical behavior as a function of base material, structure, and a wide range of porosities for polymer lattice structures fabricated by vat-based 3D printing. *Additive Manufacturing*. v. 78, n. p. 103892, 2023.

13 - Dey, A. and N. Yodo. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. v. 3, n. 3, p. 64, 2019.

14 - Khan, S., K. Joshi and S. Deshmukh. A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. *Materials Today: Proceedings*. v. 50, n. p. 2119-2127, 2022.

CHALLENGES IN THE CORRELATION BETWEEN SIMULATION AND EXPERIMENTATION FOR 3D PRINTING PARTS: CAN MECHANICAL PROPERTIES BE PREDICTED?

ABSTRACT

This study investigates the discrepancy between Finite Element Analysis (FEA) and mechanical testing in parts printed via Material Extrusion Additive Manufacturing, designed using Generative Design. A correction factor is suggested to align simulated and experimental results. Significant differences were observed in elastic moduli, stresses, and strains, with variations of up to 55.27%. FEA simulation accurately identifies areas susceptible to failure, confirmed by physical testing. We propose strategies to optimize the correlation between simulation and reality, addressing complex variables inherent to the FDM process and increasing reliability in demanding applications.

Keywords: additive manufacturing, finite element analysis, generative design, mechanical testing