ANÁLISE DE DIFERENTES VARIÁVEIS DE FABRICAÇÃO POR IMPRESSÃO 3D EM AMOSTRAS ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DE ENSAIO DE TRAÇÃO

Sancho, E.O.[1*]; Mendes, M.S.[2]; Morais, J.B.M.[3]; Araujo, F.T.V.[4] e Souza, A.L.[5]

1 - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, esancho@unifor.br

2 - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza (UNIFOR Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, mariana-s-mendes@hotmail.com.br

3 - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, julietty@unifor.br

4 - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, flaviatelis@unifor.br

5 - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, andre@unifor.br

RESUMO

A manufatura aditiva oferece vantagens, como produção de geometrias desafiadoras e personalização, sendo importante para a Indústria 4.0. Apesar do crescimento significativo e investimentos na pesquisa, a manufatura aditiva enfrenta desafios, incluindo a inconsistência nas propriedades das peças impressas. Por isso, este trabalho tem como objetivo analisar, a partir do ensaio de tração, a relação entre as propriedades mecânicas do ABS. O estudo coletou dados utilizando textitsoftware PrusaSlicer para modelagem e impressora 3D com tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling). Foram fabricadas amostras variando ângulo de impressão (0º, 45º e 90º), mantendo fixo espessura das paredes (0,8mm) e densidade de preenchimento (20%).

As amostras com 20% de preenchimento, o ângulo de 45º proporcionou maior resistência, resiliência e rigidez, enquanto o ângulo de 90º favoreceu a ductilidade. O estudo ressaltou a necessidade de uma abordagem precisa para otimizar as propriedades mecânicas, sugerindo análises semelhantes em polímeros, como o ácido polilático.

Palavras-chave: *Manufatura aditiva. Ensaio de tração. Indústria 4.0.*

INTRODUÇÃO

A medida que avançamos no século XXI, alcançamos a Quarta Revolução Industrial, também chamada de indústria 4.0. Essa revolução possui como diferencial sistemas completamente automatizados e integrados que se comunicam entre si, oferecendo maior flexibilidade, produtividade, velocidade e qualidade nos sistemas produtivos (1). Ela foi publicamente apresentada na Alemanha no ano de 2011, com o objetivo de fortalecer a competitividade do país através de uma transformação digital (2).

A Quarta Revolução Industrial é caracterizada pelo desenvolvimento e utilização de tecnologias disruptivas como a internet das coisas ou Internet of Things (IoT), a Inteligência Artificial (IA), o aprendizado de máquina (machine learning), a robótica avançada e a impressão 3D, que é o processo de manufatura caracterizado pela adição de material camada por camada (3). Essas inovações mostram que a combinação de tecnologias de sistemas de produção integradas com processos de produção inteligentes transformam, sobretudo, modelos de negócios e cadeias de valor (4).

Ao analisarmos as técnicas de manufatura modernas, fica evidente a sua complexidade, impulsionada pelos avanços na automação e tecnologia da informação. Nesse cenário, a demanda por produtos cada vez mais sofisticados e personalizados tem aumentado significativamente (5). Além disso, a gestão e o controle desses processos precisam ser ágeis e adequados, pois o sistema de manufatura deve ser eficiente, flexível e responsivo (6).

A busca por aprimoramento e personalização tem impulsionado a evolução das técnicas de manufatura. Uma forma de flexibilizar a produção e reduzir o tempo de fabricação para disponibilizar o produto de forma mais rápida para o cliente é a utilização da Manufatura Aditiva (MA), também chamada de impressão 3D (7).

Em se tratando do setor industrial, a General Electric utiliza a impressão 3D para fabricar injetores de combustíveis para seus motores a jato, destacando a vantagem desse processo, pois é uma peça de alta complexidade que tem seu peso reduzido, resultando em um aumento da eficiência do motor (8).

Outra indústria que encontra na MA um poderoso aliado é a do setor de peças para carros antigos. Devido à baixa demanda, muitas dessas peças não são mais fabricadas, tornando difícil encontrá-las no mercado. A impressão 3D é uma alternativa interessante, permitindo que essas peças sejam escaneadas e fabricadas de forma rápida e a baixo custo, oferecendo oportunidades para empresas em diferentes partes do mundo. A fabricação de peças de acabamento é especialmente viável com a MA, uma vez que essas são geralmente pequenas e fáceis de produzir. Diversas empresas do setor automotivo têm utilizado essa tecnologia para fabricação de peças que não estão mais disponíveis comercialmente (9).

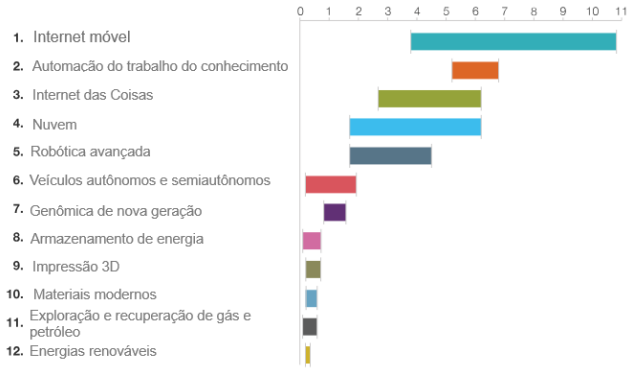
Ainda em relação à indústria automobilística foi lançado o Low-Speed Eletric Vehicle (LSEV), automóvel com peças fabricadas através da MA, com exceção dos bancos, vidros, pneus, chassis, bateria e motor. Com o intuito de popularizar a utilização de veículos elétricos na Ásia e na Europa, o LSEV, ilustrado na Figura 1, tem 57 partes impressas e leva apenas três dias para ser montado, sendo o primeiro carro elétrico no mundo de produção em massa fabricado por impressão 3D. A partir desse cenário, observa-se que a manufatura aditiva pode vir a substituir processos de fabricação amplamente conhecidos e utilizados quase que por completo (9).

Figura 1: Primeiro carro elétrico fabricado através da manufatura aditiva

Fonte: Polymaker, 2018.

No âmbito econômico, como observado na Figura 2, a impressão 3D está entre as doze tecnologias disruptivas que tem o potencial para remodelar o mundo em que vivemos e o modo no qual trabalhamos. As estimativas dos autores, baseadas em potenciais aplicações e na geração de valor criada, retratam que essa tecnologia pode movimentar até cerca de um trilhão de dólares no ano de 2025. Os dados trazidos nesse estudo indicam que a manufatura aditiva já caminha para deixar de ter seu uso voltado apenas para protótipos e fazer parte do meio produtivo, tornando-se o produto final (10).

Figura 2: Tecnologias disruptivas e seus impactos econômicos



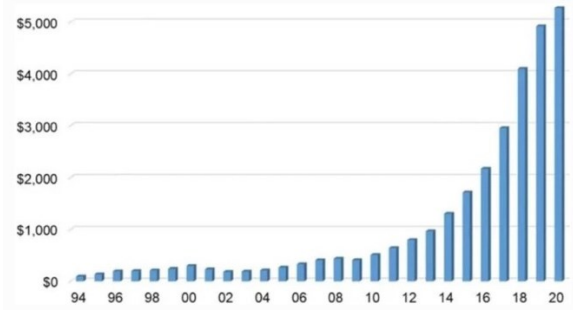
Fonte: Adaptado de Manyika *et al*. (2013).

Conforme reportado pela Forbes em 2017, 57% dos fabricantes globais investiram em pesquisa e desenvolvimento de fabricação aditiva, e 95% das empresas percebem que a essa tecnologia oferece uma vantagem competitiva significativa. De fato, 47% das empresas que utilizam MA obtiveram maior sucesso do que nos anos anteriores. Projeções para os próximos 5 anos indicam um crescimento médio de 24% para a indústria de impressão 3D, representando um valor de mercado de

aproximadamente 35 bilhões de dólares. Em 2020, essa indústria cresceu 7,5%, atingindo quase 12,8 bilhões de dólares (11).

A partir das informações trazidas neste capítulo, podemos afirmar que a manufatura aditiva é um processo de fabricação que vem sendo estudado com cada vez mais frequência, como ilustra a Figura 3, devido ao crescimento da impressão 3D (11) e ao benefício do uso da MA em muitos setores industriais (12), portanto este trabalho abordará a análise de propriedades mecânicas de peças fabricadas por manufatura aditiva.

Figura 3: Produção anual de peças por MA de fornecedores independentes em milhões de dólares



Fonte: Rajan *et al*. (2022).

MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta de dados foi realizada por meio da utilização de um software de modelagem, seguido da impressão dos desenhos em uma impressora 3D. O PrusaSlicer foi o software utilizado e permitiu a criação das amostras de forma precisa e detalhada, proporcionando um controle rigoroso sobre as variáveis do experimento.

A modelagem foi feita a partir de dados da norma ASTM (2014), pois para polímeros o corpo de prova possui dimensões e geometria específicas que são definidas para atender às necessidades de materiais e aplicações particulares. A

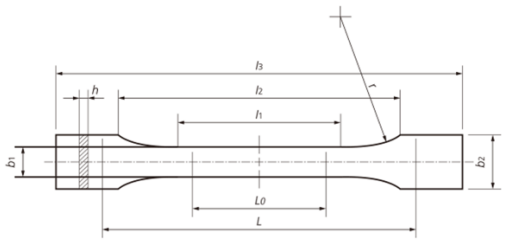
Figura 4 e a Tabela 1 caracterizam o tipo de corpo de prova e dimensões utilizados neste trabalho.

Tabela 1: Dimensões dos corpos de prova de acordo com a norma ASTM D638 (2014).

Dimensão	**Tipo I (mm)**
Comprimento total (L3)	165
Comprimento paralelo (L2)	57
Comprimento útil (L1)	50
Largura da seção paralela	13
Espessura (h)	7
Largura da seção de fixação	19
Distância entre as fixações	115

Fonte: Adaptado de https://www.shimadzu.eu/industry/hpi/tensile-638

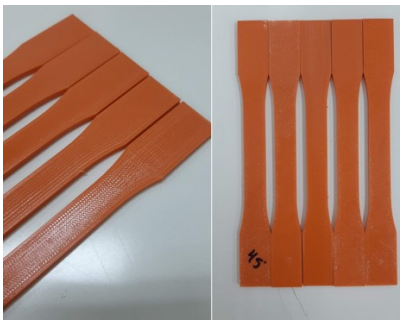
Figura 4: Corpo de prova de acordo com a norma ASTM D638 (2014)



Fonte: Adaptado de https://www.shimadzu.eu/industry/hpi/tensile-638

Para a impressão dos desenhos, utilizou-se a impressora 3D modelo SETHI3D S3, cuja tecnologia de impressão é FDM (Fused Deposition Modeling). Tal impressora se destaca por sua elevada resolução e precisão, viabilizando a exata reprodução dos modelos tridimensionais. Durante esta fase, foram estabelecidos parâmetros específicos, a saber: diâmetro do bico extrusor (0,4mm), espessura das paredes(0,8mm) e o padrão de preenchimento(giróide). É relevante mencionar que estes parâmetros permaneceram constantes em todas as amostras analisadas. O resultado das impressões pode ser observado na Figura 5.

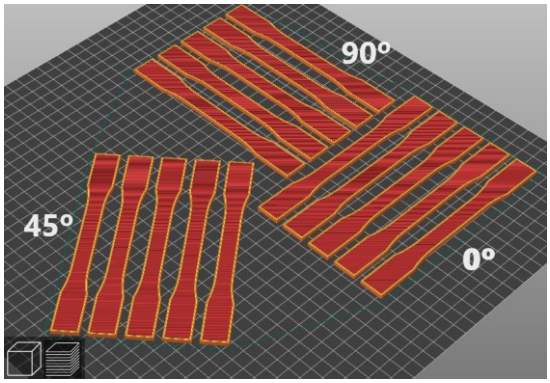
Figura 5: Lote de amostras impressas



Fonte: Autora (2023).

Para este trabalho, três ângulos de impressão foram adotados: 0º, 45º e 90º, uma espessura de parede de 0,8 mm com 20% de preenchimento, como evidenciado na Figura 6.

Figura 6: Posicionamento das peças de acordo com o ângulo de impressão



Fonte: Autora (2023).

Para este trabalho, foi utilizado o material ABS de cor laranja. No total, foi utilizado uma bobina de filamento do material para a fabricação das peças, fator que deve ser considerado na avaliação dos resultados. Esse fator juntamente com as configurações, desempenharam um papel crucial na precisão e na qualidade das amostras impressas, afetando diretamente suas propriedades mecânicas. Portanto, é fundamental compreender como esses parâmetros podem influenciar os resultados dos ensaios e a relação com a densidade de deposição de material.

Para a análise dos dados, foi realizado o ensaio de tração utilizando equipamento da marca INSTRON 4484, visto na Figura 7, com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas das amostras impressas. Nesse ensaio são registrados os valores de

tensão e deformação para cada amostra. Em seguida, os dados obtidos foram registrados e utilizados para gerar gráficos comparativos e tabelas. Esses gráficos permitem visualizar e analisar as diferenças de desempenho mecânico entre as amostras.

Figura 7: Ensaio de tração

Fonte: Autora (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizou-se a análise comparativa as amostras impressas com porcentagem de preenchimento de 20% e espessura de parede de 0,8 mm, e, a variável explorada nestas análises é o ângulo de impressão, com variações de 0º, 45º e 90º.

O Quadro 1 apresenta os valores individuais e as médias dos resultados dos ensaios em resposta às diferentes variações dos ângulos de impressão. Notavelmente, o ângulo de 45º revelou médias superiores de limite de resistência à tração, atingindo 15,162 MPa, de tensão de escoamento, alcançando 7,282 MPa e de módulo de elasticidade, com 936,020 MPa.

Quadro 1: Resultados do ensaio de tração para amostras porcentagem de preenchimento 20% e espessura da parede 0,8 mm

Preenchimento: 20% Espessura da parede: 0,8mm	Limite de Resistência à Tração (MPa)			Alongamento (%)			Tensão de Escoamento (MPa)			Tensão de Ruptura (MPa)			Módulo de Elasticidade (MPa)		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
	10,640	14,920	14,700	3,543	1,600	2,886	5,593	7,785	5,922	6,470	8,774	6,908	646,400	881,700	832,800
	11,960	15,360	14,700	4,057	2,029	2,386	4,824	7,676	5,375	5,263	7,897	7,238	608,900	853,100	928,300
	10,970	15,470	14,810	4,029	1,400	2,471	5,154	5,813	6,690	3,618	6,908	7,347	629,400	1009,000	831,600
	9,100	14,700	15,360	3,200	2,114	2,886	7,567	7,020	6,799	8,883	9,213	7,897	597,200	1011,000	853,200
	11,960	15,360	14,700	3,300	1,957	2,100	4,936	8,115	5,154	5,484	9,322	7,347	598,000	925,300	939,600
Média	10,926	15,162	14,854	3,626	1,820	2,546	5,615	7,282	5,988	5,944	8,423	7,347	615,980	936,020	877,100

Fonte: Autora (2023).

Esses resultados indicam uma maior resistência, resiliência e rigidez nessas amostras. Exclusivamente no ângulo de 0º, o alongamento obteve melhores resultados, com 3,626%, indicando maior ductilidade.

CONCLUSÃO

Ao manter constantes os parâmetros de fabricação, garante-se que as variações observadas nos resultados sejam atribuídas unicamente às modificações nas variáveis de interesse. Isso é fundamental para estabelecer relações de causa e efeito e avaliar a influência de cada parâmetro nas propriedades mecânicas das peças, o que foi permitido após a realização dos ensaios de tração.

Com o objetivo de examinar o impacto do ângulo de impressão nos resultados, realizamos comparações entre amostras. Os resultados exibiram variações significativas conforme o ângulo de impressão. Notavelmente, para amostras com 20% de preenchimento, o ângulo de 45º frequentemente resultou em maior resistência, resiliência e rigidez, enquanto o ângulo de 90º tendeu a proporcionar maior ductilidade. A evidente influência do ângulo de impressão nas diferentes propriedades mecânicas destaca a importância desse parâmetro no processo de fabricação.

O avanço da manufatura aditiva requer uma abordagem precisa para a análise de suas variáveis e destaca a importância de considerar cuidadosamente os parâmetros na manufatura aditiva para atingir propriedades desejadas nos produtos finais. A compreensão aprofundada de como cada parâmetro afeta as propriedades mecânicas das peças é essencial para tirar o máximo proveito dessa tecnologia e otimizar os produtos fabricados. Por isso, como sugestão de estudos futuros, é

possível realizar uma análise semelhante para outros polímeros, como o ácido polilático (PLA).

REFERÊNCIAS

ALBERTIN, M. R.; ELIENESIO, M. L. B.; AIRES, A. d. S.; PONTES, H. L. J.; JUNIOR, D. P. A. Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura. 2017.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *et al*. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: Final report of the industrie 4.0 working group. Forschungsunion: Berlin, Germany, 2013.

SOMMER, L. Industrial revolution-industry 4.0: Are german manufacturing smes the first victims of this revolution? Journal of Industrial Engineering and Management, v. 8, n. 5, p. 1512–1532, 2015.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. Engineering, Elsevier, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017.

SALAH, B.; DARMOUL, S. Engineering technology education based on the reconfigurable manufacturing paradigm: a case study. Procedia manufacturing, Elsevier, v. 23, p. 87–92, 2018.

YIN, Y.; STECKE, K. E.; LI, D. The evolution of production systems from industry 2.0 through industry 4.0. International Journal of Production Research, Taylor & Francis, v. 56, n. 1-2, p. 848–861, 2018.

SARTORI, A. Análise dos efeitos da manufatura aditiva na cadeia de suprimentos. 2019.

PINHO, S. S. de. Conceção de uma cabeça de deposição de termoplástico para aplicação em sistemas de impressão 3d. 2018.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F. Manufatura aditiva e as mudanças na indústria automotiva. Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia, v. 13, n. 32, p. 90–104, 2022.

MANYIKA, J.; CHUI, M.; BUGHIN, J.; DOBBS, R.; BISSON, P.; MARRS, A. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. [S.l.]: McKinsey Global Institute San Francisco, CA, 2013. v. 180.

RAJAN, K.; SAMYKANO, M.; KADIRGAMA, K.; HARUN, W. S. W.; RAHMAN, M. M. Fused deposition modeling: Process, materials, parameters, properties, and applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer, v. 120, n. 3-4, p. 1531–1570, 2022.

MEHRPOUYA, M.; DEHGHANGHADIKOLAEI, A.; FOTOVVATI, B.; VOSOOGHNIA, A.; EMAMIAN, S. S.; GISARIO, A. The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review. Applied Sciences, MDPI, v. 9, n. 18, p. 3865, 2019.

ASTM. Standard test method for tensile properties of plastics. Tech. Rep. ASTM D2240–00, 2014.

ANALYSIS OF DIFFERENT MANUFACTURING VARIABLES BY 3D PRINTING ON SAMPLES THROUGH PERFORMING A TENSILE TEST

ABSTRACT

Additive manufacturing offers advantages, such as the production of challenging geometries and customization, and is important for Industry 4.0. Despite significant growth and investment in research, additive manufacturing faces challenges, including inconsistency in the properties of printed parts. Therefore, this work aims to analyze, based on the tensile test, the relationship between the mechanical properties of ABS. The study collected data using PrusaSlicer text software for modeling and a 3D printer with FDM (Fused Deposition Modeling) technology. Samples were manufactured at varying printing angles (0º, 45º and 90º), maintaining fixed wall thickness (0.8mm) and filling density (20%). In samples with 20% filling, the 45º angle provided greater strength, resilience and rigidity, while the 90º angle favored ductility. The study highlighted the need for a precise approach to optimizing mechanical properties, suggesting similar analyzes on polymers such as polylactic acid.

Keywords: *Additive manufacturing. Tensile test. Industry 4.0.*