



INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE EXTRUSÃO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PEÇAS DE ABS/PC FABRICADAS POR IMPRESSÃO 3D

Cleiton L. F. de Assis^{1*}, Carolina F. Machado¹, José R. C. Pinto¹, Guilherme R. Mecelis¹,
Cleber A. Rampazo²

1 – Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Avenida Jerônimo Figueira da Costa, 3014, Votuporanga, CEP 15503-110, SP.

2 – 3DX Filamentos Ltda. Rua Machado de Assis, Bloco 3, Sala 22, São Caetano do Sul, CEP 09530-310, SP.

fazolocla@ifsp.edu.br

RESUMO

As técnicas de Manufatura Aditiva têm ganhado espaço na indústria, apresentando taxas anuais de crescimento de 26% a 32%. O uso de componentes processados por estas tecnologias torna importante compreender o comportamento mecânico das peças, principalmente aquelas cujo material base são polímeros de engenharia, os quais apresentam propriedades mecânicas aprimoradas. Nesse sentido, a seleção adequada dos parâmetros de fabricação por adição passa a ser fator relevante para garantir confiabilidade e qualidade do produto final. O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da temperatura de extrusão, durante a deposição de material, na resistência mecânica de peças obtidas por impressão 3D. Na impressão de corpos de prova para ensaios de tração foram utilizados filamentos de uma blenda de Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno/Polycarbonato (ABS/PC), na proporção de 70% de ABS e 30% de PC. Os parâmetros de impressão 3D adotados nos experimentos foram os padrões de preenchimento concêntrico, linear (-45°/45°) e zig-zag, e as temperaturas de extrusão de 270, 280 e 290°C. A tensão máxima foi avaliada estatisticamente com auxílio da Análise de Variância (ANOVA) e teste post-hoc de Tukey. Os resultados indicaram que os parâmetros de impressão 3D avaliados influenciaram o comportamento mecânico das amostras. O padrão concêntrico apresentou maior resistência mecânica, sem efeito estatístico da temperatura. A elevação da temperatura de extrusão de 270 para 280°C aumentou a resistência mecânica nas impressões com padrões linear e zig-zag, mantendo-se estável na variação de temperatura de 280 para 290°C. Corpos de prova impressos com padrão zig-zag à 270°C apresentaram ruptura fibrosa, devida a menor adesão entre as linhas de deposição e maior elasticidade, resultando em tensão de ruptura indefinida. O mesmo ocorreu para as amostras impressas no padrão concêntrico à 280 e 290°C. A elevação da temperatura de extrusão resultou em ruptura frágil e tensão de ruptura cerca de 60% da resistência máxima para os padrões linear e zig-zag. O padrão de preenchimento, associado à temperatura de extrusão, representou um aspecto relevante na compreensão e controle do comportamento mecânico de peças impressas em 3D.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Polímeros de engenharia; Parâmetros de deposição; Comportamento mecânico.

INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva vem ganhando espaço nos meios de produção como uma alternativa para a fabricação de peças com geometrias complexas, dificilmente alcançadas por outros processos de fabricação⁽¹⁾. Nesta técnica, camadas de material são depositadas uma sobre as outras, e por meio da união das interfaces de contato é formado o sólido desejado⁽²⁾.

O processo de Fabricação por Filamento Fundido (FFF) é semelhante às operações clássicas de extrusão, na qual o polímero sólido é derretido, pressurizado e extrudado para produzir um produto⁽³⁾. Dentre os métodos de impressão 3D, é um processo classificado como Modelagem por Deposição Fundida (FDM), sendo muitas vezes referenciado pela sigla FFF/FDM⁽⁴⁾. A FFF é conhecida como a técnica mais empregada na fabricação de objetos 3D com uso de materiais poliméricos⁽⁵⁾.

O desempenho e a confiabilidade do processo FFF/FDM são geralmente associados a estrutura de hardware e software da impressora 3D⁽¹⁾. Contudo, a seleção de parâmetros de impressão é também importante, principalmente quando polímeros de engenharia são utilizados em aplicações industriais, nas quais o controle da produção é fundamental para assegurar a repetibilidade do processo⁽⁶⁾.

Polímeros de engenharia ou termoplásticos de engenharia são materiais plásticos com propriedades físico/químicas promissoras e com flexibilidade para melhorar propriedades mecânicas por meio de aditivos e técnicas de copolimerização⁽⁷⁾. Essa classe de materiais apresenta excelente desempenho mecânico, estabilidade térmica, resiliência e relativa inércia química quando comparados aos plásticos tradicionais⁽⁸⁾. Ainda segundo os autores, esses materiais apresentam efeitos de anisotropia ainda a serem melhor investigados quando aplicados na impressão 3D. A escolha adequada de padrões de preenchimento, além da otimização dos parâmetros de impressão poderão exibir novas características para produtos impressos em 3D, comparáveis ou superiores aos produtos produzidos por outros processos de fabricação⁽⁹⁾.

A blenda ABS/PC é um polímero de engenharia que combina propriedades diversas, tais como alta resistência ao impacto, alta rigidez, excelente resistência a temperatura e a intempéries, e também é anti-chama⁽¹⁰⁾. É usado em inúmeras áreas como, indústria automobilística, eletroeletrônica, dispositivos de TI (Tecnologia da Informação), construção civil entre outras⁽¹¹⁾. As principais aplicações estão na fabricação de painéis de instrumentação, componentes estruturais, adaptadores, e dispositivos portáteis, elétricos e eletrônicos⁽¹²⁾.

Apesar do ABS/PC ser um termoplástico comumente aplicado na indústria automotiva e eletrônica, as pesquisas sobre o material são limitadas à manufatura por injeção em matriz metálica⁽¹³⁾. O potencial da fabricação de peças por Manufatura Aditiva a partir desta blenda, está no controle das propriedades mecânicas por meio do direcionamento específico das linhas de deposição do material fundido, associado a outros parâmetros de impressão, como por exemplo, a temperatura de extrusão⁽¹⁴⁾.

Nesse sentido, esta pesquisa visa contribuir para a compreensão das propriedades mecânicas de componentes fabricados por impressão 3D, utilizando uma blenda de ABS e Policarbonato (ABS/PC), comumente aplicada na indústria automotiva. Padrão de preenchimento e temperatura de extrusão foram consideradas variáveis em ensaios de tração. Análise de Variância (ANOVA) e teste *post-hoc* de Tukey foram as ferramentas estatísticas adotadas para avaliar o efeito dos fatores de controle no comportamento mecânico dos corpos de prova.

MATERIAIS E MÉTODOS

A técnica de impressão dos corpos de prova foi a Fabricação por Filamento Fundido (FFF). A impressora 3D utilizada é da marca GTMax3D, modelo Core H5, com área de impressão de

300 mm x 300 mm x 500 mm, velocidade máxima de impressão de 180 mm/s e de deslocamento de 400 mm/s, e diâmetro de filamento do material de 1,75 mm. A mesa de impressão é de alumínio aquecida, com tampo de vidro (até 135°C), nivelamento automático e detecção de fim de filamento. O gabinete da impressora é totalmente fechado.

O software de fatiamento utilizado foi o Simplify3D[®]. Todos os corpos de prova foram impressos com altura da camada de 0,2 mm, espessura da parede de 1,2 mm e preenchimento de 100%. Os parâmetros de impressão adotados foram velocidade de impressão de 30 mm/s, bico de extrusão de 0,5 mm de diâmetro e temperaturas de extrusão de 270, 280 e 290°C. Três padrões de preenchimento foram adotados nos experimentos: linear, concêntrico e zig-zag.

O material polimérico utilizado na fabricação dos corpos de prova é o ABS/PC (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno + Policarbonato), na proporção de 70% de ABS e 30% de PC. Os ensaios de tração foram realizados com auxílio de uma máquina de ensaios de tração da marca EMIC, modelo DL-30000, com capacidade máxima de 300 kN. A velocidade do ensaio foi de 10 mm/min. As propriedades mecânicas avaliadas foram tensão máxima e tensão de ruptura, com aplicação de uma matriz fatorial 3², totalizando 9 condições de impressão 3D.

Cinco corpos de prova de cada condição de fabricação foram submetidos aos ensaios de tração, para fins de repetibilidade e cálculo das médias, considerando um intervalo de confiança de 95%. A Análise de Variância (ANOVA) avaliou o efeito das variáveis na resposta e o Teste de Tukey comparou as médias entre os níveis dentro de um mesmo fator de controle.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise de variância para o efeito dos parâmetros de impressão na resistência máxima dos corpos de prova impressos em 3D. De acordo com a análise da probabilidade, os parâmetros de impressão avaliados e a respectiva interação influenciaram o valor da resistência máxima ($P < 0,05$). A análise do quadrado médio também revelou que o fator de controle mais significativo para alterar a resistência máxima é o padrão de preenchimento, seguido da temperatura de extrusão.

Tabela 1: Quadro ANOVA para a resistência máxima.

Fator de controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F-Valor	P-Valor
Padrão de preenchimento	2	679,56	339,78	121,17	0,000
Temperatura de extrusão	2	341,09	170,55	60,82	0,000
Padrão.Temperatura	4	241,90	60,48	21,57	0,000
Erro	27	75,71	2,80		
Total	35	1338,27			

A Figura 1 apresenta o gráfico do efeito dos parâmetros de impressão na resistência máxima e tensão de ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração. Pela análise do gráfico, o padrão concêntrico apresentou a maior resistência (≈ 40 MPa), mantendo-se estável com a variação da temperatura de extrusão. Os padrões de preenchimento linear e zig-zag foram mais sensíveis à temperatura quando da mudança de 270 para 280°C, com elevação da resistência em 65% para o linear e 17% para o zig-zag. Entre esses dois padrões, o zig-zag tendeu a conferir as amostras maior adesão entre as camadas. Devida a trajetória do bico de extrusão, houve aumento da área das interfaces de contato das linhas de material depositado, favorecendo a resistência mecânica. Por outro lado, o padrão linear necessitou de maior temperatura para conferir o mesmo efeito de adesão entre as camadas.

Com relação a tensão de ruptura, os corpos de prova impressos com padrão zig-zag à 270°C não apresentaram ruptura durante os ensaios de tração. O mesmo ocorreu para o padrão concêntrico nas temperaturas de 280 e 290°C. O fenômeno precisa ser melhor compreendido e novos experimentos serão necessários para esse estudo. Para as demais condições de impressão 3D, a tensão de ruptura correspondeu a 50% da resistência máxima na temperatura de extrusão de 270°C e 60% para as temperaturas de 280 e 290°C.

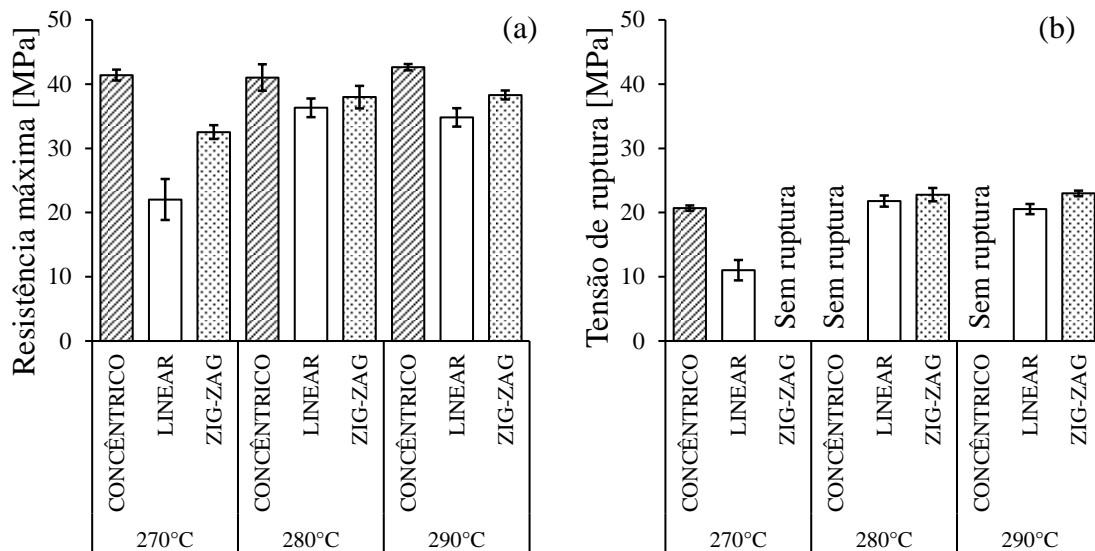


Figura 1: Gráficos do efeito da temperatura de extrusão na tensão máxima (a) e de ruptura (b).

A Tabela 2 apresenta o teste *post-hoc* de Tukey para comparação das médias, visando identificar a ocorrência da variação da resistência máxima dos corpos de prova entre os níveis, dentro de um mesmo fator de controle. Nesse sentido, o teste revelou que apenas a comparação das médias entre as temperaturas 280 e 290°C não resultou em variação da resistência máxima, estando de acordo com o observado no gráfico da Figura 1(a). A estabilidade da adesão das linhas de deposição para os padrões linear e zig-zag ocorreu a partir de 280°C, mantendo a resistência mecânica estável a partir dessa temperatura.

Tabela 2: Teste de Tukey da comparação das médias entre os níveis para a resistência máxima.

Erro padrão da diferença	Fator de controle	Comparação	Diferença das médias	T-Valor	P-Valor
0,6836	Padrão de preenchimento	concêntrico – linear	-10,6400	-15,570	0,000
		concêntrico – zig-zag	-5,4300	-7,940	0,000
		linear – zig-zag	5,2150	7,6280	0,000
	Temperatura de extrusão	270 – 280	6,4520	9,4370	0,000
		270 – 290	6,6050	9,6620	0,000
		280 – 290	0,1533	0,2243	0,973

CONCLUSÕES

Este trabalho visou compreender o efeito dos parâmetros de impressão no comportamento mecânico de corpos de prova submetidos ao ensaio de tração. O padrão de preenchimento, temperatura de extrusão e respectiva interação afetam a resistência mecânica das amostras. O padrão concêntrico resulta em maior resistência mecânica, em torno de 40 MPa e constante para

as temperaturas de extrusão avaliadas. Os padrões de preenchimento linear e zig-zag possuem aumento e estabilidade da resistência máxima a partir de 280°C. A associação de parâmetros de impressão afeta a ruptura dos corpos de prova, promovendo maior elasticidade em algumas condições de impressão 3D. Esta pesquisa revela que a escolha adequada de parâmetros de impressão é importante para o controle do comportamento mecânico de peças de ABS/PC produzidas por impressão 3D.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFSP pelo apoio a pesquisa e a 3DX Filamentos Ltda pelos filamentos de ABS/PC utilizados na impressão 3D dos corpos de prova.

REFERÊNCIAS

1. PETERSON, A. M. Review of acrylonitrile butadiene styrene in fused filament fabrication: A plastics engineering-focused perspective. *Additive Manufacturing*, v. 27, p. 363-371, 2019.
2. MCILROY, C.; OLMSTED, P. D. Disentanglement effects on welding behaviour of polymer melts during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing. *Polymer*, v. 123, p. 376-391, 2017.
3. PHAN, D. D.; SWAIN, Z. R.; MACKAY, M. E. Rheological and heat transfer effects in fused filament fabrication. *Journal of Rheology*, v. 62, n. 5, p. 1097-1107, 2018.
4. JOO, Y.; SHIN I.; HAM, G.; ABUZAR, S. M.; HYUN, S-M.; HWANG, S-J. The advent of a novel manufacturing technology in pharmaceuticals: Superiority of fused deposition modeling 3D printer. *Journal of Pharmaceutical Investigation*, v. 50, n. 2, p. 131-145, 2020.
5. LIU, Z.; WANG, Y.; WU, B.; CUI, C.; GUO, Y.; YAN, C. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 102, n. 9-12, p. 2877-2889, 2019.
6. SCHIRMEISTER, C.; HEES, T.; LICHT, E. H.; MÜLHAUPT, R. 3D printing of high-density polyethylene by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, v. 28, p. 152-159, 2019.
7. JUSTER, H.; VAN DER AAR, B.; DE BROUWER, H. A review on microfabrication of thermoplastic polymer-based microneedle arrays. *Polymer Engineering & Science*, v. 59, n. 5, p. 877-890, 2019.
8. PICARD, M.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Recent advances in additive manufacturing of engineering thermoplastics: challenges and opportunities. *RSC Advances*, v. 10, n. 59, p. 36058-36089, 2020.
9. CICALA, G.; LATTERI, A.; CURTO, B. D.; RUSSO, A. L.; RECCA, G.; FARÈ, S. Engineering thermoplastics for additive manufacturing: a critical perspective with experimental evidence to support functional applications. *Journal of applied biomaterials & functional materials*, v. 15, n. 1, p. 10-18, 2017.
10. KIRAN, A. S. K.; VELURU, J. B.; MERUM, S.; RADHAMANI, A. V.; DOBLE, M.; KUMAR, T. S. S. Additive manufacturing technologies: an overview of challenges and perspective of using electrospraying. *Nanocomposites*, v. 4, n. 4, p. 190-214, 2018.
11. LEE, J-Y.; AN, J.; CHUA, C. K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today*, v. 7, p. 120-133, 2017.
12. PAWAR, S.; DOLAS, D. Effect of process parameters on flexural strength and surface roughness in fused deposition modeling of PC-ABS material. *Journal of Micromanufacturing*, p. 1-7, 2021.
13. YAP, Y. L. *et al.* A non-destructive experimental-cum-numerical methodology for the characterization of 3D-printed materials—polycarbonate-acrylonitrile butadiene styrene (PC-ABS). *Mechanics of Materials*, v. 132, p. 121-133, 2019.
14. YAP, P-V.; CHAN, M-Y.; KOAY, S-C. Preliminary study on mechanical properties of 3D printed multi-materials ABS/PC parts: effect of printing parameters. *Journal of Physical Science*, v. 32, n. 2, 87-104, 2021.

EXTRUSION TEMPERATURE INFLUENCE ON THE MECHANICAL STRENGTH OF ABS/PC PARTS MANUFACTURED BY 3D PRINTING

ABSTRACT

Additive Manufacturing techniques have gained space in the industry, showing annual growth rates from 26% to 32%. The use of components processed by these technologies makes it important to understand the mechanical behavior of parts, especially those whose base material is engineering polymers, which have improved mechanical properties. In this sense, the proper selection of manufacturing parameters by addition becomes a relevant factor to ensure reliability and quality of the product. The objective of this work is to evaluate the effect of extrusion temperature, during material deposition, on the mechanical strength of parts obtained by 3D printing. In the printing of workpieces for tensile tests, filaments of a Polycarbonate/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS/PC) blend were used, in the proportion of 70% ABS and 30% PC. The 3D printing parameters adopted in the experiments were concentric, linear (-45°/45°) and zig-zag filling patterns, and extrusion temperatures of 270, 280 and 290°C. The maximum stress was statistically evaluated using Analysis of Variance (ANOVA) and Tukey's post-hoc test. The results indicated that the evaluated 3D printing parameters influenced the workpiece mechanical behavior. The concentric pattern showed higher mechanical strength, with no statistical effect of temperature. The increase in extrusion temperature from 270 to 280°C increased the mechanical strength in printed workpieces with linear and zig-zag patterns, remaining stable in the temperature range from 280 to 290°C. Workpieces printed with a zig-zag pattern at 270°C showed fibrous rupture, due to less adhesion between the deposition lines and higher elasticity, resulting in undefined tensile strength. The same occurred for workpieces printed in the concentric pattern at 280 and 290°C. Elevation of extrusion temperature resulted in brittle breakage and tensile strength around 60% of maximum strength for linear and zig-zag patterns. The fill pattern, associated with the extrusion temperature, represented a relevant aspect in the understanding and control of the mechanical behavior of 3D printed parts.

Keywords: *Additive Manufacturing; Engineering polymers; Deposition parameters; mechanical behavior.*