

EFEITO DOS PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO NO TEMPO DE PRODUÇÃO E NA MASSA DE PEÇAS DE ABS/PC IMPRESSAS EM 3D

JAIRO H. I. DE OLIVEIRA¹, CLEITON L. F. DE ASSIS², JOSÉ R. C. PINTO³, GUILHERME
R. MECELIS⁴

¹ Graduando em Bacharelado em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Votuporanga, j.iglesias@aluno.ifsp.edu.br

² Doutor em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Câmpus Votuporanga, fazolocla@ifsp.edu.br

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Câmpus Votuporanga, jrcamilo@ifsp.edu.br

⁴ Mestre em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Câmpus Votuporanga, guilherme.mecelis@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Polímeros, Aplicações – 3.03.05.04-7

RESUMO: A manufatura aditiva, também conhecida por impressão 3D, possibilita a produção de peças tridimensionais através da deposição progressiva de material. O processo vem ganhando espaço devido sua flexibilidade, sendo considerada uma tecnologia disruptiva para a produção, estando presente em diversas áreas. Devido à sua abrangência, compreender a máquina, o material de adição e as variáveis do processo é relevante para conciliar produtividade com qualidade. O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito dos parâmetros de deposição na massa e no tempo de impressão de peças produzidas por Deposição de Material Fundido (FDM). O material dos corpos de prova é uma blenda de Acrilonitrila Butadieno Estireno + Policarbonato (ABS/PC). As variáveis de estudo foram diâmetro do bico extrusor, padrão de preenchimento, temperatura de extrusão e altura de camada. O tempo de fabricação das peças foi medido durante a impressão. As pesagens foram realizadas nas amostras e os dados experimentais avaliados com auxílio da Análise de Variância (ANOVA), com posterior aplicação do Teste *post-hoc* de Tukey. O aumento do diâmetro do bico extrusor e da altura da camada reduziu o tempo de fabricação das peças e os parâmetros de impressão resultaram em variação da massa das peças, sendo o padrão de preenchimento o parâmetro mais influente. Os parâmetros de deposição tiveram influência significativa na massa das amostras, além de afetar a taxa de deposição de material, alterando o tempo de fabricação.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura aditiva; Deposição de Material Fundido; Polímeros de engenharia; Tempo de Produção.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho é parte de uma pesquisa maior que propõe a investigação das propriedades mecânicas de componentes fabricados por impressão 3D, utilizando como polímero de engenharia uma blenda de ABS/PC (Acrilonitrila Butadieno Estireno/Policarbonato). O diâmetro do bico extrusor, o padrão de preenchimento, a temperatura de extrusão e a altura de camada foram consideradas variáveis na fabricação dos corpos de prova a serem submetidos à futuros ensaios de tração. Por outro lado, informações relevantes de produtividade e variação da massa das amostras foram identificadas. Sendo assim, neste trabalho foram investigados os efeitos das

variáveis no tempo de produção e na massa das amostras. Análise estatística foi adotada para avaliar o efeito dos fatores de controle na massa das amostras.

2 TEORIA

A manufatura aditiva (MA) pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D, o que possibilita a fabricação de peças complexas (VOLPATO, 2017).

A tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) é um método de fabricação de objetos 3D por meio da extrusão de um filamento termoplástico. É utilizado pela facilidade de produção e baixo custo dos materiais (JOO et al., 2020). Com o projeto da peça em um programa CAD (*Computer-aided Design*), é usado um software CAM (*Computer-aided Manufacturing*) para segmentar a peça camada por camada para impressão. O filamento é conduzido à uma matriz de extrusão aquecida, sendo fundido e depositado (VOLPATO, 2017). As peças produzidas por FDM tem o efeito da anisotropia como seu principal desafio (SHAFFER et al., 2014), e suas propriedades mecânicas estão fortemente relacionadas aos parâmetros de fabricação (MOHAMED et al., 2017).

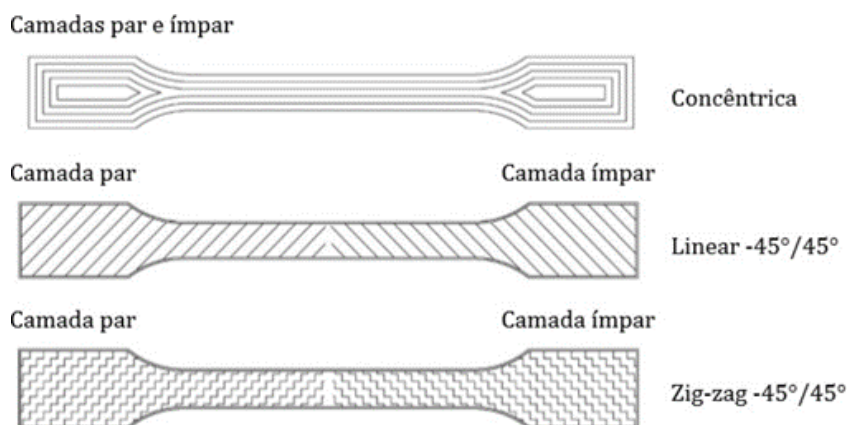
Misturas de ABS/PC têm sido amplamente utilizadas como um dos principais plásticos de engenharia (CHUN et al., 1991). Quando um percentual de PC é adicionado no ABS, a resistência ao impacto e a viscosidade de fusão do ABS é aumentada (JIN et al., 1998). Apesar do ABS/PC ser um termoplástico industrial aplicado na indústria automotiva e eletrônica, pesquisas sobre o material são limitadas à manufatura por injeção em matriz metálica (YAP et al., 2019). O potencial de fabricação de peças a partir desta blenda, via manufatura aditiva, está no controle das propriedades mecânicas por meio do direcionamento específico das linhas de deposição do material fundido, além da associação com outros parâmetros de impressão 3D (SCHMITT, MEHTA e KIM, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A impressão 3D foi realizada numa impressora da marca GTMax3D, modelo Core A2, com as seguintes especificações: volume de impressão de 200x200x200 mm, velocidade máxima de impressão de 180 mm/s, deslocamento de 400 mm/s, e diâmetro do filamento de 1,75 mm. A temperatura máxima do bico extrusor foi de 310°C. A mesa de impressão foi aquecida com tampo de vidro (até 155°C) e possuiu nivelamento automático. O gabinete da impressora foi mantido fechado.

O filamento utilizado na fabricação dos corpos de prova foi o ABS/PC (Acrilonitrila Butadieno Estireno + Policarbonato), impresso com velocidade de 30 mm/s e preenchimento de 100%. A Figura 1 apresenta a configuração as amostras, conforme norma ISO 527-1/2:2012. O material foi fornecido pela empresa 3DX Filamentos. O software de fatiamento utilizado foi o Simplify3D®.

FIGURA 1. Padrão de preenchimento dos corpos de prova dos ensaios de tração.



A TABELA 1 apresenta os fatores de controle e os respectivos níveis para a fabricação dos corpos de prova. Foi utilizada uma matriz experimental com 81 combinações de parâmetros de impressão 3D. Cinco corpos de prova de cada combinação foram impressos visando repetibilidade e análise estatística. Sendo assim, foram impressas 405 amostras.

TABELA 1. Fatores de controle e respectivos níveis para a impressão das amostras.

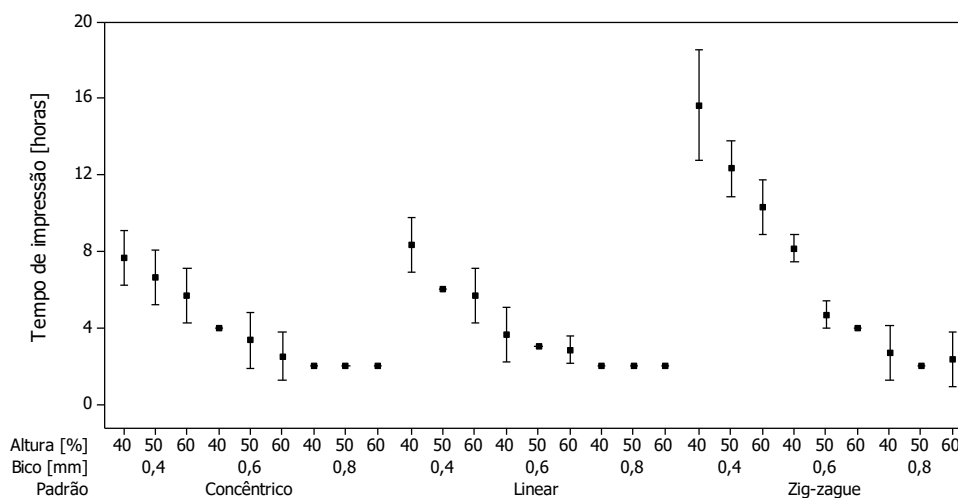
Fatores de controle	Níveis
Diâmetro do bico [mm]	0,4, 0,6 e 0,8
Padrão de preenchimento	Linear, concêntrico e zig-zag
Altura de camada [%]	40, 50 e 60
Temperatura de extrusão [°C]	270, 280 e 290

As massas dos corpos de prova foram obtidas com auxílio de uma balança modelo L303i, de calibração interna automática, capacidade de 310 g e resolução de 0,001 g. Cada amostra foi pesada 3 vezes e uma média foi calculada. A análise dos resultados foi feita por ANOVA, verificando o efeito dos fatores de controle na massa das amostras. O teste de Tukey foi também aplicado para comparar os níveis entre si dentro de um mesmo fator de controle e análise de resíduos foi adotada para validar o modelo estatístico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os gráficos do tempo de produção de cada lote, os quais consistem em 5 corpos de prova, impressos em sequência e alinhados lado a lado. Os tempos de impressão apresentados correspondem aos tempos somados de aquecimento da mesa e do bico extrusor, impressão dos corpos de prova de acordo com os parâmetros e finalização do processo. Os gráficos revelam que o aumento do diâmetro do bico de extrusão reduz significativamente o tempo de impressão, com redução máxima de quase 7 horas entre os bicos de 0,4 e 0,8 mm de diâmetro. O aumento da altura da camada reduziu o tempo de impressão, porém com diferença máxima de 2 horas. O padrão de preenchimento zig-zag teve um maior tempo de impressão, sendo aproximadamente 3 horas maior quando comparado aos demais. A temperatura de extrusão não revelou efeito na variação do tempo de impressão. Assim, é possível notar que o fator de maior influência no tempo é a taxa de deposição de material, ou seja, a quantidade de material que está sendo depositada por segundo.

FIGURA 2. Gráficos dos tempos de impressão dos lotes de corpos de prova.



As amostras foram pesadas para avaliar o efeito dos parâmetros de impressão na massa. A massa média dos corpos de prova foi de 10,40 g. Contudo, variações foram observadas. O efeito das variáveis na massa foi analisado utilizando a Análise de Variância. A TABELA 2 apresenta o quadro ANOVA. Para ser estatisticamente influente, a probabilidade P das variáveis precisa ser menor ou igual a 0,05, correspondendo a 95% de confiabilidade. Assim, todas as variáveis e respectivas combinações apresentaram significância estatística na massa das amostras ($P \leq 0,05$).

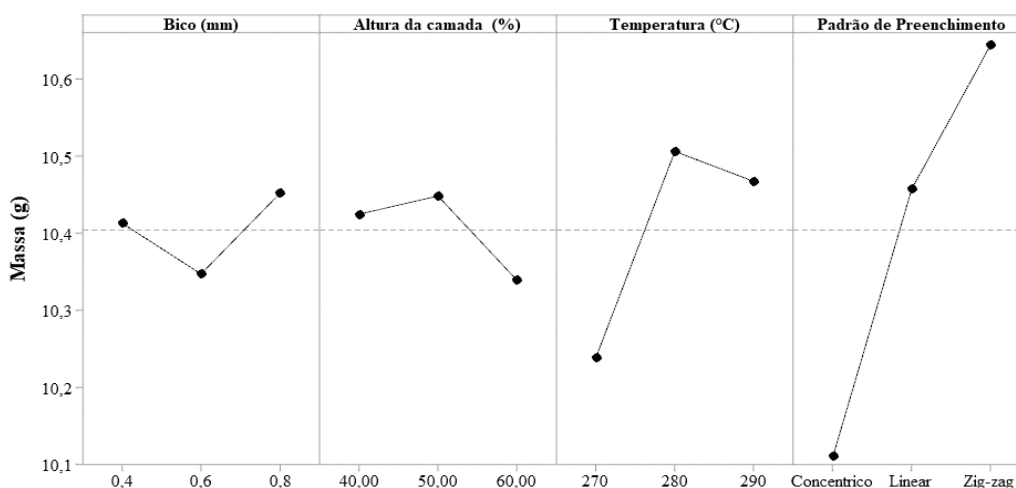
TABELA 2. Quadro ANOVA para a massa das amostras.

Fator de controle	GL	SQ	QM	F-Valor	P-Valor
Bico	2	0,7552	0,3776	13,45	0,000
Altura	2	0,8912	0,4456	15,87	0,000
Temperatura	2	5,6341	2,8170	100,34	0,000
Preenchimento	2	19,8667	9,9334	353,81	0,000
Bico.Altura	4	11,4535	2,8634	101,99	0,000
Bico.Temperatura	4	3,7835	0,9459	33,69	0,000
Bico.Preenchimento	4	2,8049	0,7012	24,98	0,000
Altura.Temperatura	4	0,7113	0,1778	6,33	0,000
Altura.Preenchimento	4	1,0399	0,2600	9,26	0,000
Temperatura.Preenchimento	4	0,9477	0,2369	8,44	0,000
Error	372	10,4440	0,0281		
Total	404	58,3319			

GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio

A Figura 3 apresenta os gráficos do efeito das variáveis na massa das amostras. A análise dos gráficos revela que o padrão de preenchimento resultou em maior variação de massa das amostras, o que pode ser devido à interação entre as linhas de deposição, ocasionando menos vazios. A temperatura de extrusão também causou variação, principalmente na elevação de 270 para 280°C. Nesse caso, a maior fluidez do material em maiores temperaturas atingiu uma melhor interação entre as linhas de deposição. A variação do diâmetro do bico e da altura da camada resultaram em menores variações de massa.

FIGURA 3. Gráficos do efeito dos fatores de controle no peso das amostras.



Visando comparar as médias das medidas da massa dentro de um mesmo fator de controle, o Teste de Tukey foi aplicado (TABELA 3), considerando uma confiabilidade de 95% ($P \leq 0,05$). Quando os diâmetros de bico de 0,4 e 0,8 mm são comparados, as médias não apresentam diferença estatística significativa. Em outras palavras, o uso de ambos os bicos resulta numa massa média equivalente. Com relação à altura de camada, a variação de 40% para 50% não apresentou diferença estatística significativa da massa. Por outro lado, todas as comparações entre as temperaturas de extrusão e dos padrões de preenchimento revelaram diferenças estatísticas significativas nas médias.

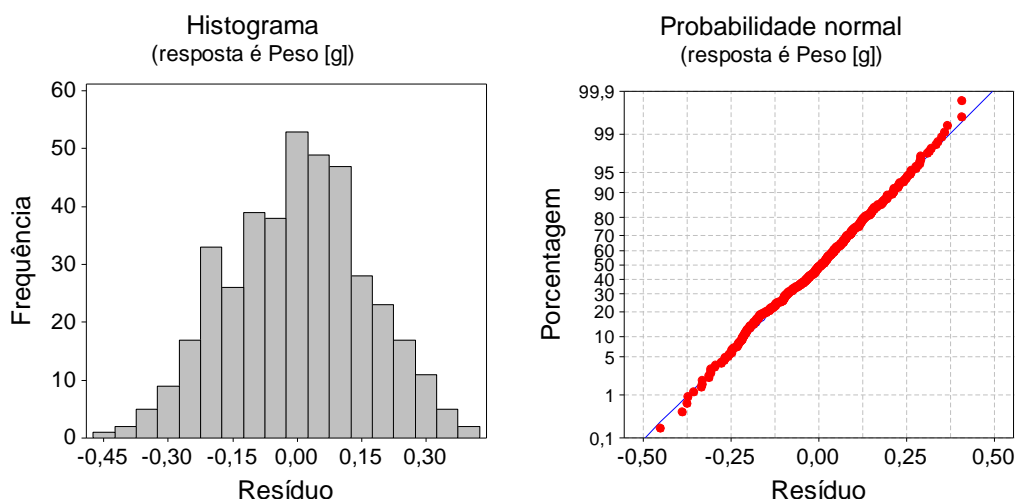
TABELA 3. Teste de Tukey para o efeito dos fatores de controle na massa das amostras.

Erro padrão da diferença	Fator de controle	Comparação	Diferença das médias	T-Valor	P-Valor
0,6836	Diâmetro do bico	0,4 – 0,6	-0,06583	-3,228	0,0036
		0,4 – 0,8	0,03879	1,902	0,1381
		0,6 – 0,8	0,10460	5,130	0,0000
0,02039	Altura da camada	40 – 50	0,02362	1,158	0,4782
		40 – 60	-0,08557	-4,196	0,0001
		50 – 60	-0,10920	-5,354	0,0000
0,02039	Temperatura	270 – 280	0,3473	17,03	0,0000
		270 – 290	0,5346	26,21	0,0000
		280 – 290	0,1872	9,181	0,0000
0,02039	Padrão	Concêntrico – Linear	-10,640	-15,57	0,0000
		Concêntrico – Zig-zag	-5,430	-7,940	0,0000
		Linear – Zig-zag	5,215	7,628	0,0000

Para validar a ANOVA aplicada para a massa das amostras, foi realizada a análise dos resíduos, conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** A partir do histograma dos resíduos e do gráfico de probabilidade normal, foi verificado que os resíduos possuem distribuição normal. Os resíduos são distribuídos aleatoriamente em torno do zero no gráfico, e a probabilidade normal apresenta

proximidade à sua regressão linear. Ambos os indícios estão de acordo com o esperado nesse tipo de análise, evidenciando a qualidade da matriz experimental adotada.

FIGURA 4. Gráficos da análise dos resíduos para a massa das amostras.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas, o tempo de impressão é influenciado principalmente pela taxa de deposição de material, mas também é influenciado pela estratégia de preenchimento, visto que quanto mais complexo o percurso, mais tempo o equipamento (impressora 3D) leva para gerar as peças. Com relação a massa, o padrão de preenchimento adotado tende a gerar peças com variação da quantidade de material necessária para produzir a peça, embora a temperatura e a interação entre diâmetro do bico e altura de camada também influenciem este aspecto. Na continuidade do trabalho serão realizados ensaios de tração para avaliar a resistência mecânica das amostras e assim estabelecer uma relação com os parâmetros de impressão e a massa das amostras.

REFERÊNCIAS

- JOO, Y.; SHIN I.; HAM G.; ABUZAR S. M.; HYUN S.; HWANG S. 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.
- MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Characterization and dynamic mechanical analysis of PC-ABS material processed by fused deposition modelling: An investigation through I-optimal response surface methodology. **Measurement**, v. 107, p. 128-141, 2017.
- SCHMITT, M.; MEHTA, R. M.; KIM, I. Y. Additive manufacturing infill optimization for automotive 3D-printed ABS components. **Rapid Prototyping Journal**, 2020.
- SHAFFER, S.; YANG K.; VARGAS, J.; DI PRIMA M. A.; VOIT W. On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation. **Polymer**, v. 55, n. 23, p. 5969-5979, 2014.
- VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Editora Blucher, 2017.
- YAP, Yee Ling *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.