

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA ORIENTAÇÃO DE FABRICAÇÃO NA PRECISÃO DIMENSIONAL E NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE AMOSTRAS DE POLIPROPILENO MANUFATURADAS ADITIVAMENTE UTILIZANDO A TECNOLOGIA HP MULTI JET FUSION

Luã Fonseca Seixas, lua.seixas03@gmail.com¹

Tiago Nunes Lima, tiago.nunes@fieb.org.br^{2,3}

Bruno Caetano dos Santos Silva, bruno.silva@fieb.org.br^{2,3}

Luís Fernando Folle, luis.folle@fbter.org.br³

Rodrigo Santiago Coelho, rodrigo.coelho@fieb.org.br^{1,2,3}

¹ SENAI CIMATEC, Centro Universitário SENAI CIMATEC – Programa de Pós-graduação MPDS/GETEC/MCTI, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, 41650-010, Salvador-BA, Brasil;

² SENAI CIMATEC PARK, Bureau de Manufatura Aditiva SENAI CIMATEC – Via Atlântica, BA 530, km 2,5, 42810-440, Camaçari - BA, Brasil;

³ SENAI CIMATEC, Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, 41650-010, Salvador-BA, Brasil;

Resumo: No processo de manufatura aditiva (MA) HP Multi jet Fusion (HP MJF), uma tecnologia de MA de fusão em leito de pó, os principais parâmetros de processamento que afetam o desempenho dos produtos impressos são a orientação de impressão, posicionamento das peças dentro da área de impressão e parâmetros de deposição de energia e de resfriamento. Considerando que a tecnologia MJF é um processo relativamente novo, na literatura ainda há pouca informação sobre a influência dos parâmetros de processo no desempenho de produtos fabricados por esta tecnologia. Além disso, a maioria dos estudos publicados foram primariamente com o material Poliamida 12 (PA12 ou Nylon 12). Por outro lado, pouco foi aprofundado em estudos sobre outros materiais disponíveis para o processo MJF. Destes, o Polipropileno (PP) é um polímero commodity amplamente aplicado na indústria, assim, a avaliação das características de produtos de PP impressos por MJF se mostra necessária para aprimorar a aplicabilidade deste processo. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da variação da orientação espacial de impressão na precisão dimensional e na resistência ao impacto de amostras de PP impressas por MJF. Para isto, foram produzidas amostras em diferentes orientações de impressão de acordo com a metodologia de planejamento experimental (DOE) de Superfície de resposta para validação estatística. As avaliações foram realizadas por medição manual das dimensões e ensaio de impacto tipo Izod. Os resultados obtidos revelaram que, pelo modelo experimental aplicado, não foi encontrada uma influência estatística significativa da orientação de impressão na resistência ao impacto das amostras de PP, o que pode indicar uma boa isotropia em relação ao impacto. Contudo, foi identificado que as orientações de impressão afetaram variações com significância estatística nas dimensões das amostras, sendo que as peças posicionadas horizontalmente possuem maior exatidão do que aquelas que foram posicionadas verticalmente, tendo apresentando variações de até 6,5% e 15,75% respectivamente.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Orientação de impressão, Polipropileno, Fusão em leito de pó, HP Multi Jet Fusion.

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA), ou impressão 3D, surgiu a partir do conceito de prototipagem rápida e se estendeu para a produção em série com os avanços tecnológicos dos seus processos, assumindo um papel crucial como uma das tecnologias habilitadoras do conceito de Indústria 4.0. A MA refere-se a um conjunto de tecnologias de fabricação capazes de produzir componentes camada sob camada a partir de modelos tridimensionais, adicionando material, em oposição a processos subtrativos ou formativos, como a usinagem e a conformação, respectivamente. A MA tem sido considerada como um importante passo na mudança global para a customização em massa, como uma tecnologia que causará grandes impactos nas cadeias de suprimentos e nos mercados de produtos sob demanda, reduzindo significativamente os custos de logística e de consumo de energia. A MA possui potencial para transformar os modelos de negócios de diferentes indústrias, substituindo ou apoiando outros processos de fabricação e atuando como um dos principais protagonistas na próxima revolução industrial (Lezama-Nicolás *et al.*, 2018; Mehrpouya *et al.*, 2019; ASM, 2020).

A MA pode ser categorizada em sete principais classificações tecnológicas que utilizam como base para definição do tipo de ligação entre os materiais, a forma do material que é depositado no sistema (líquido, particulado, laminado, filamento), as operações de deposição e união do processo e a fonte e tipos de energia aplicada. Esses grupos de tecnologias são definidos como Jateamento de aglutinante, Deposição de energia direcionada, Extrusão de material, Jateamento de material, Fusão em leito de pó, Laminação de chapas e Fotopolimerização em cuba (ISO/ASTM, 2015).

Para processamento de materiais poliméricos, a categoria tecnológica de fusão em leito de pó se destaca por permitir a fabricação de componentes com melhor desempenho mecânico. Este tipo de tecnologia se define como um processo no qual a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó, região onde a matéria-prima é depositada e fundida seletivamente por uma fonte de calor ou ligada por meio de um adesivo líquido para construir peças a partir de modelos 3D (ISO/ASTM, 2015). Outras vantagens dos processos de fusão em leito de pó são a alta resolução e alta qualidade de impressão, que o tornam adequado para a impressão de estruturas complexas usadas em diversas indústrias para aplicações avançadas, como na medicina, e indústrias automotiva, aeroespacial, óleo e gás e eletrônica (Ngo *et al.*, 2018). Na categoria de tecnologias de fusão em leito de pó, os principais processos para a fabricação com polímeros são o *Selective laser sintering* (SLS) e a tecnologia HP *Multi Jet Fusion* (MJF). O MJF se destaca pelo melhor desempenho mecânico das peças impressas, menor incidência de defeitos, menor tempo de impressão, melhor qualidade de impressão, maior eficiência energética, menor custo de produção e maior taxa de crescimento de mercado entre as tecnologias de fusão em leito de pó de polímero concorrentes, sendo aplicada em diversos setores industriais (London *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020.). O processo MJF é uma tecnologia desenvolvida pela HP, onde agentes de detalhamento e de fusão são depositados seletivamente em um leito de pó, para em seguida ser aplicada radiação infravermelha, possibilitando a fusão das áreas selecionadas e união das camadas para imprimir tridimensionalmente uma peça. Este processo de fusão em leito de pó é classificado como “termal” por ser diferente de outros processos de fusão em leito de pó, utilizando como fonte de energia a radiação infravermelha, que reage com os agentes para fundir as áreas das camadas de impressão. As etapas do processo de MJF são apresentadas na Fig.1, explicando a função dos agentes utilizados nesta tecnologia (HP, 2018). Para este processo é atualmente possível fabricar componentes com os termoplásticos Poliamida 12 (PA12 ou Nylon 12), Poliamida 11 (PA11 ou Nylon 11), Polipropileno (PP) e com os elastômeros Termoplástico Poliuretano (TPU) e Termoplástico Poliamida (TPA).

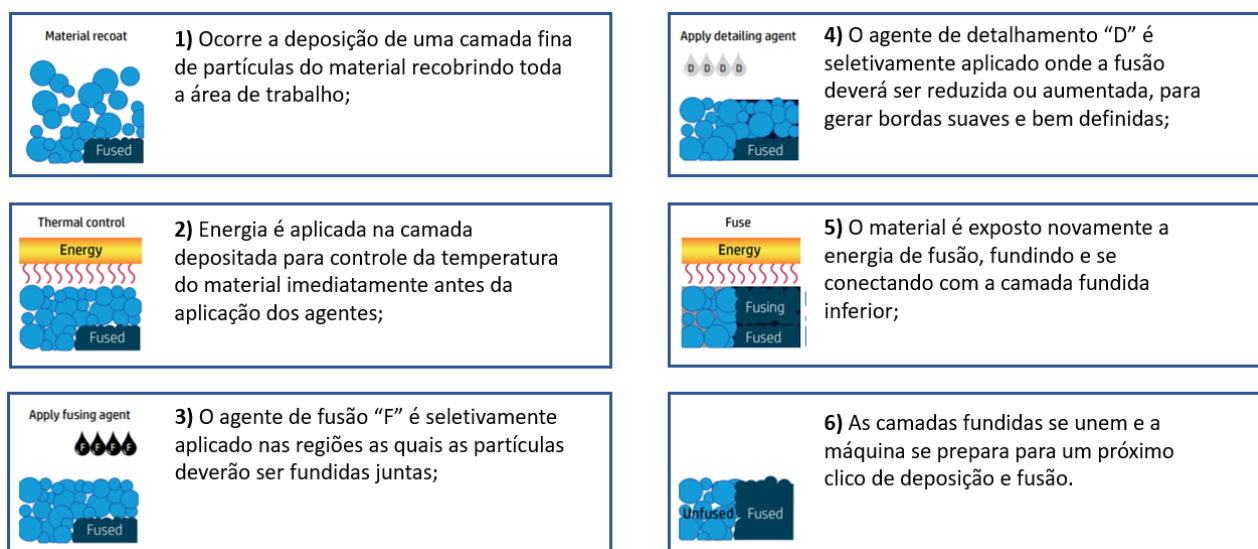


Figura 1. Esquema detalhando as etapas da tecnologia de fusão em leito de pó, HP Multi Jet Fusion.

De forma geral para a maioria dos processos de manufatura aditiva, incluindo o MJF, os principais parâmetros de processamento que afetam o desempenho dos produtos impressos são a orientação de impressão, posicionamento das peças dentro da área de impressão e parâmetros de deposição de energia e de resfriamento (ASM, 2020). Considerando que a tecnologia MJF é um processo relativamente novo, na literatura ainda há pouca compreensão sobre as influências dos parâmetros de processo na variação de desempenho de produtos fabricados por esta tecnologia de MA. Na literatura, a maioria dos estudos publicados primariamente tiveram como foco de estudo o material PA12, além de consideravelmente poucos trabalhos sobre o PA11 e o TPU (Lee, Pandelidi e Kajtaz, 2020; Wei, Zhou e Chao, 2021). Observa-se assim que, pouco foi aprofundado em estudos sobre outros materiais disponíveis para o processo MJF, seja para o PP, o PA11, o TPU ou para o TPA. Dentre estes, o PP é um plástico *commodity* amplamente aplicado na indústria, além de ser um dos materiais mais recentes adaptados para esta tecnologia, assim, a avaliação das características de produtos de PP impressos por MJF, se mostra necessária para aprimorar a aplicabilidade deste processo. Em todos os processos de MA, a orientação espacial de construção das peças impressas é um dos principais focos de preocupação, por ter efeito direto nas características, na qualidade e nas propriedades das peças. Esse fenômeno é observado em várias tecnologias de MA de polímeros e é principalmente relacionado às orientação das camadas (Lee, Pandelidi e Kajtaz,

2020). A seleção da melhor orientação de construção é um fator muito importante, pois afeta o tempo de impressão e a qualidade do produto fabricado, encolhimento, distorções, fluxo de material, custo do processo, distribuição de calor, desempenho mecânico, dentre outros fatores (Matos, Rocha e Pereira, 2020).

Tendo evidenciado esta carência na literatura e a necessidade de estudo da orientação de construção no MJF, este trabalho possui como objetivo investigar os efeitos da variação da orientação espacial de impressão na precisão dimensional e na resistência ao impacto de amostras de PP aditivamente manufaturadas pela tecnologia HP Multi Jet Fusion. A avaliação destas duas características se destaca por serem requisitos técnicos fundamentais para diversas aplicações, sendo a resistência ao impacto um parâmetro de resistência mecânica e a precisão dimensional um fator que reflete a qualidade dos produtos fabricados através deste processo.

2. METODOLOGIA

2.1. Planejamento experimental

No planejamento experimental foram levantadas as variáveis de entrada e de saída do modelo analisado. As variáveis de entrada são a posição das peças dentro da área de impressão, classificadas como orientação, sendo estas a orientação (em ângulos) em relação ao plano horizontal (plano XY) e a orientação (em ângulos) em relação ao plano vertical (plano XZ). As análises estatísticas empregadas foram os testes de normalidade, que visam analisar a variância e as diferenças entre as médias dos resultados, e a metodologia de DOE (*Design of Experiments*) de Superfície de Resposta para permitir otimizar as repostas com base nos parâmetros de processo selecionados. A metodologia de superfícies de resposta (ou RSM, de *Response Surface Methodology*) é uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais. Para esta metodologia de DOE, foi definido um grau de certeza de 95% e $\alpha = 1,41421$ (Padrão alfa, coeficiente de ortogonal do experimento composto central que delimita o ponto central do experimento de RSM). A Fig. 2 representa os experimentos, como visualizados dentro da área de impressão do equipamento de manufatura aditiva, nas visões isométrica. Para o conjunto de amostras foi utilizado um código de classificação de acordo com as orientações, onde como exemplo “0°/45°” o primeiro valor representa o ângulo em relação ao plano vertical (XY), para este caso 0° e o segundo valor representa o ângulo em relação ao plano vertical (XZ), para este caso 45°, onde as combinações de ângulos são determinadas pelo modelo RSM. Por esta codificação, os conjuntos de amostras foram nomeados como 0°/45°, 13°/13°, 13°/77°, 45°/0°, 45°/45°, 45°/90°, 77°/13°, 77°/77° e 90°/45° representando as respectivas orientações em ângulos conforme demonstrado nas figuras. Todos os resultados estatísticos foram executados e obtidos através da inserção dos dados dos experimentos reais no Software de análise estatística *Minitab 19*, obtendo de forma automatizada resultados de análise de variância, gráficos de resíduos, gráfico de superfície de resposta e análise de otimização de resposta.

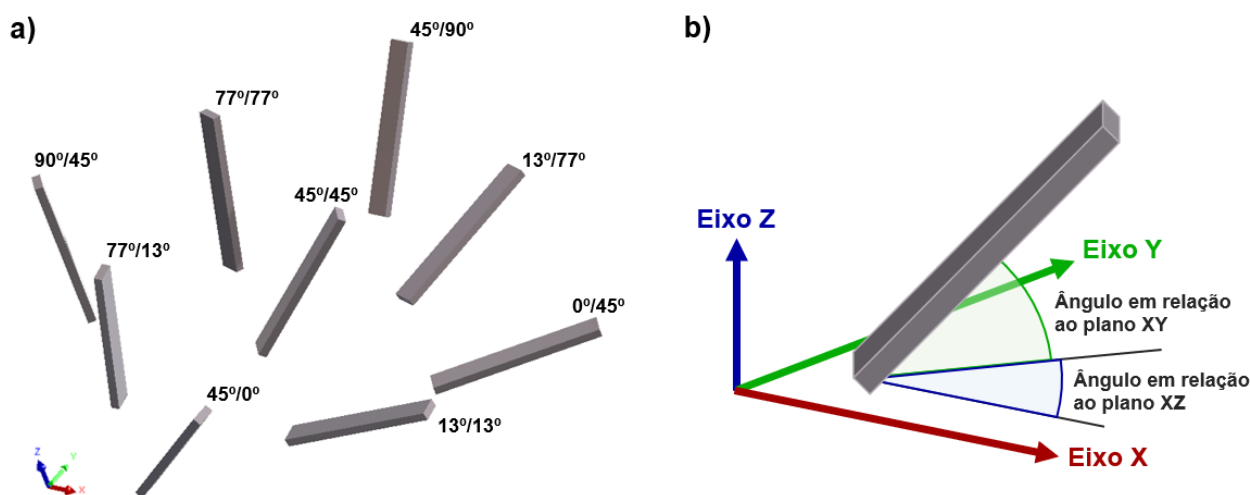


Figura 2. Organização dos experimentos, a) Orientações de fabricação conforme a metodologia RSM; b) Esquema demonstrando os dois parâmetros de orientação avaliados.

2.2. Produção das amostras

Para a produção das amostras foi utilizado como material o *Ultrasint® PP da Basf (HP 3D High Reusability PP)*, desenvolvido para as impressoras HP MJF. Foi usada uma taxa de mistura de material novo e usado de 80/20 (80% de pó de PP usado e 20% de pó de PP virgem), sendo esta a taxa recomendada pela HP. A mistura foi feita através da estação de processamento da impressora HP MJF 5210, que condiciona o material para impressão e promove mistura homogênea de material virgem e usado. Os agentes de fusão e de detalhamento utilizados foram respectivamente o *HP 3D700 SL*

Fusing Agent e o *HP 3D700 SL Detailing Agent*. Para gerenciamento e otimização da cuba de impressão, foi utilizado o Software *Materialize Magics*.

O processo de impressão 3D por MJF foi executado por uma impressora HP Multi Jet Fusion modelo 5210 com um volume de fabricação efetivo de 380 x 284 x 380 mm. O MJF é otimizado para imprimir com uma espessura de camada de 80 µm, podendo atingir uma taxa de impressão teórica de até 5058 cm³/h (Šafka *et al.*, 2021). A resolução do processo de impressão nos planos XY e XZ, para este equipamento corresponde a 1200 dpi. Para esta impressão foram aplicados o perfil de impressão *Balanced* e o perfil de resfriamento lento natural, de 42 h para o Polipropileno. Para cada orientação foram impressas 5 replicas de amostras, contabilizando 45 amostras no total.

Para modelagem das amostras foi utilizado o software Solidworks, seguindo as dimensões determinadas na norma ISO 180 (80mm de comprimento, 10mm de largura e 4mm de espessura), conforme é mostrado na Fig.3. Além, disto, para controle das amostras e delimitação do lado de posicionamento do entalhe dos corpos de prova de impacto foram feitas marcações inseridas nos modelos 3D das amostras, conforme também é demonstrado na Fig.3.

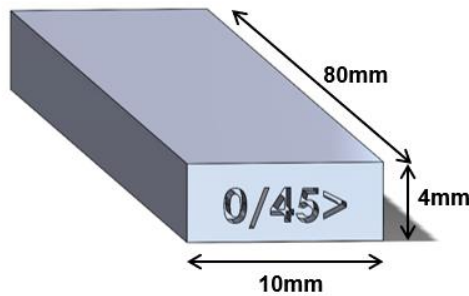


Figura 3. Dimensões de referência das amostras com base na geometria determinada na norma ISO 180 (80mm de comprimento, 10mm de largura e 4mm de espessura), marcações foram inseridas nos modelos das amostras para identificar suas orientações.

2.3. Ensaios

Os testes de impacto executados foram do tipo Izod, em uma máquina EMIC de pendulo, com martelo de 2,7 J e configuração Izod. As dimensões das amostras e procedimentos de ensaio foram estabelecidas em conformidade com a norma ISO 180, considerando um entalhe de 2 mm de profundidade e de ângulo de 45° no centro das amostras, em amostras de 80 mm de comprimento, que foi feito por equipamento de entalhe após a impressão das amostras. A propriedade aferida neste ensaio é a de resistência ao impacto (em KJ/m²) obtida pela equação Eq. 1, adequada para amostras entalhadas.

$$RI = \frac{E}{h.b} \cdot 10^3 \quad (1)$$

Onde: RI é a resistência ao impacto (KJ/m²), E é a energia aferida (J), h é a espessura da amostra (mm) e b é a largura da amostra (mm).

As avaliações dimensionais foram efetuadas nas amostras de impacto, tendo como base de referência as dimensões determinadas pela norma ISO 180, 80mm de comprimento, 10mm de largura e 4mm de espessura. As amostras foram medidas com o uso de um paquímetro digital com duas casas decimais de precisão. Os valores das medidas de largura e espessura foram medidos e calculou-se as médias e desvios padrões para cada orientação avaliada, bem como a área transversal correspondente para cada orientação e seus desvios

3. RESULTADOS

3.1. Impacto

O gráfico a seguir, da Fig.4, apresenta as médias e desvios padrão para os resultados calculados de resistência ao impacto para cada orientação de impressão avaliada, onde o posicionamento das barras foi colocada em ordem crescente de acordo com o ângulo de orientação no plano horizontal (XY). Pelo gráfico é possível verificar que a resistência ao impacto não é significativamente influenciada pelas orientações de impressão, sem apresentar também um padrão perceptível. Os desvios padrão alocam os valores encontrados dentro de uma mesma faixa de erro, e podem estar associados a erros de operação e de entalhe típicos do ensaio de impacto. Pode-se propor com estes resultados que a orientação de impressão não afeta a resistência ao impacto das peças de PP impressas por MJF, o que é mais aprofundado nas análises estatísticas a seguir.

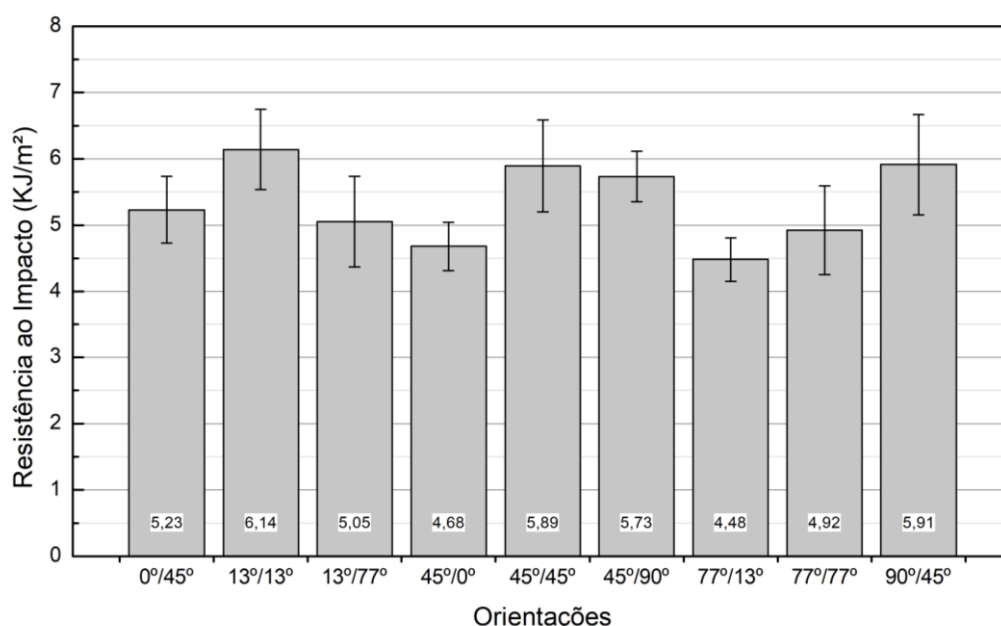


Figura 4. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Resistência ao impacto (KJ/m²) das orientações avaliadas.

A Fig.5 demonstra algumas amostras representando as orientações 45°/90°, 45°/0°, 0°/45° e 90°/45°, apresentando as fraturas resultantes do ensaio de impacto. Pela análise visual pode ser verificado que as fraturas presentes nas amostras foram similares para todas as orientações, sem variações significativas na forma, que pode ser associada à de fratura frágil, um comportamento esperado para polímeros com alta cristalinidade, como o PP. Outro fator presente em todas as amostras de cada orientação é a presença de poros, inerente do processo de fusão em leito de pó, que pode ter influenciado nas variações de resistência ao impacto, contudo novas análises precisam ser feitas para quantificar esta porosidade.

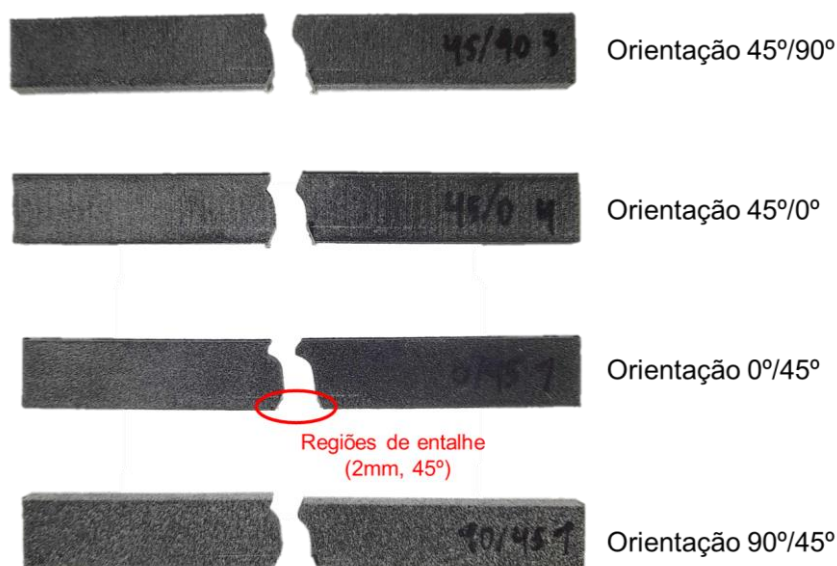


Figura 5. Fraturas nas amostras de impacto para as orientações 45°/90°, 45°/0°, 0°/45° e 90°/45°.

A Tab.1 apresenta os principais índices da análise de variância e do modelo dos testes de ANOVA One Way e normalidade, para os dados de resistência ao impacto. O Valor-P, inferior ao nível de significância de 0,05, infere que as médias de resultados são diferentes com significância estatística, contudo, o Valor-F encontrado foi muito baixo, o que indica que o modelo não seja muito significativo, para o nível de significância do teste. O modelo apresentou desvios padrões relativamente altos para a escala desta propriedade, com um desvio (S) de 0,57, indicando que o modelo pode apresentar limitações em descrever as respostas analisadas. Essa limitação é notada pelos valores relativamente baixos de R^2 , indicando que o modelo não apresenta boa capacidade de ajustes de dados (56,54%) e de predição (27,41%). Estas análises indicam que os resultados de resistência ao impacto não permitem boas predições quanto à influência da orientação de impressão nesta propriedade. A interpretação plausível para este caso é que a orientação de impressão não

gera variação significativa, influência, na resistência ao impacto. As variações neste caso podem estar relacionadas a manipulação das amostras (gravação de entalhes e medição manual), além que essa propriedade é calculada a partir das dimensões aferidas das amostras, que foram influenciadas pela orientação de impressão, como é discutido neste trabalho.

Tabela 1. Índices da Análise de variância dos dados individuais de resistência ao impacto.

Valor-F	Valor-P	S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
5,20	<0,001	0,5719	56,54%	45,63%	27,21%

A Fig.6 apresenta os gráficos de resíduos para a análise de variância da ANOVA One way e testes de normalidade, para os dados de resistência ao impacto. A curva do gráfico de probabilidade normal sugere que o modelo de dados apresenta uma distribuição normal adequada. O histograma indica simetria nos dados, sem influências de *outliers*. O gráfico de versus ajustado indica que os dados não apresentam padrões reconhecíveis, indicando que os dados desta análise são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante, conforme é desejado para um bom modelo de análise.

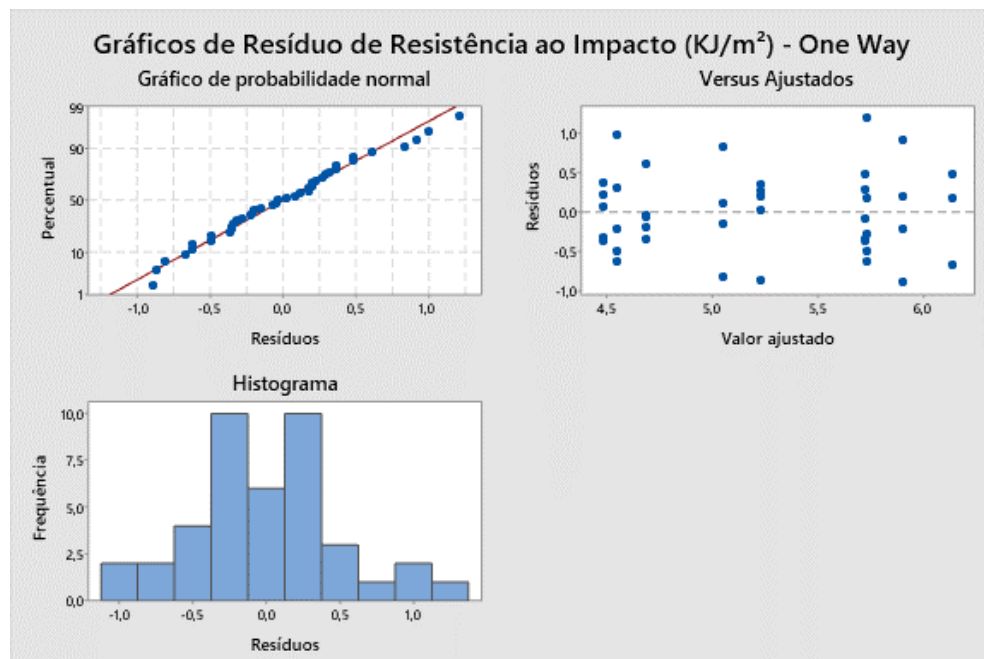


Figura 6. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de resistência ao impacto.

A ANOVA, análise de variância, para a resposta resistência ao impacto é apresentada na Tab. 2. Foi identificado que o modelo não obteve significância estatística (Valor-P foi superior a 0,05). Para esse resultado, uma análise plausível seria que realmente as orientações de impressão não geram influências significativas nos resultados desta propriedade, ressaltando o que já foi discutido. Visto que a ANOVA não obteve significância estatística para esta propriedade, não foi preciso seguir a análise de mapeamento de influência. Considerou-se então que os parâmetros de orientação de impressão no processo MJF não influenciam significativamente na propriedade de resistência ao impacto.

Tabela 2. Análise de variância da Resistência ao impacto pelo modelo de superfície de resposta.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	1,01418	0,20284	0,49	0,773
Linear	2	0,22880	0,11440	0,28	0,765
XY	1	0,06763	0,06763	0,16	0,697
XZ	1	0,07899	0,07899	0,19	0,674
Quadrado	2	0,46829	0,23414	0,57	0,590
XY*XY	1	0,03933	0,03933	0,10	0,766
XZ*XZ	1	0,45506	0,45506	1,11	0,328
Interação com 2 Fatores	1	0,33471	0,33471	0,81	0,397
XY*XZ	1	0,33471	0,33471	0,81	0,397
Erro	7	2,87617	0,41088	-	-
Falta de ajuste	3	2,21834	0,73945	4,50	0,090
Erro puro	4	0,65783	0,16446	*	*

3.2. Dimensional

O gráfico apresentado na Fig.7 indica as médias e desvios padrões para os resultados aferidos das dimensões da área transversal das amostras. Pelo gráfico é possível observar uma tendência nos resultados relacionada à variação nas orientações de fabricação, onde as amostras mais orientadas na horizontal conseguem atingir valores menores e mais próximos da referência esperada (40 mm²), enquanto amostras orientadas na vertical aumentaram os valores das dimensões, afastando do valor de referência desejado. Sağbaş (2020) encontrou um comportamento similar ao comparar a precisão dimensional de parafusos fabricados por MJF orientados a 90° e a 45° em relação ao plano XY, tendo identificado variações na peça a 90°, as quais associou ao efeito de capilaridade. Visto que o mesmo efeito foi observado nas amostras deste estudo, pode-se considerar que a capilaridade resultante nas geometrias das amostras com diferentes orientações tenha afetado a variação nos resultados dimensionais. Mele *et al.* (2021) avaliaram por DOE os efeitos que influenciam as distorções dimensionais nas peças fabricadas por MJF e identificaram que os efeitos de encolhimento estão associados a cristalinidade que varia com a exposição das áreas de camadas impressas à irradiação de energia. Como peças orientadas de forma diferente possuem áreas de camadas diferentes, pode-se associar também este efeito as variações identificadas neste estudo.

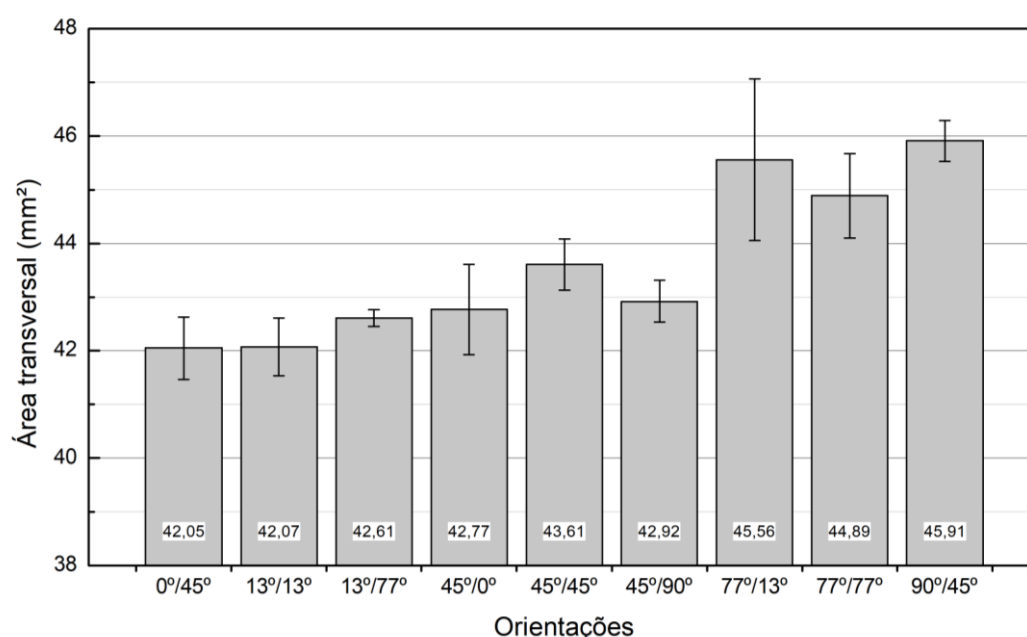


Figura 7. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Área transversal (mm²) das amostras de impacto das orientações avaliadas.

A Tab. 3 apresenta os principais índices da análise de variância e do modelo dos testes de ANOVA One Way e normalidade, para os dados dimensionais. Para todos os casos, o Valor-P foi inferior ao nível de significância de 0,05, indicando que as médias de resultados são diferentes com significância estatística. Contudo, foi identificado um Valor-F mais baixo (para o nível de significância de 0,05) na medição da dimensão largura, o que indica que o modelo não seja muito significativo para esta variável. Os modelos apresentam desvios padrões relativamente baixos e valores de R mais altos para a espessura e a área transversal, indicando boas capacidades de interpretação e de predição.

Tabela 3. Índices da Análise de variância dos dados individuais de espessura.

Variável	Valor-F	Valor-P	S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
Espessura	21,17	<0,001	0,0634	82,47%	78,57%	72,61%
Largura	7,09	<0,001	0,0644	61,17%	52,54%	39,33%
Área Transversal	23,48	<0,001	0,6547	84,67%	81,07%	72,75%

As análises de variância para as respostas das dimensões são apresentadas na Tab.4, a qual apresenta apenas as variáveis que apresentaram significância. Foi identificado que o modelo obteve significância estatística (Valor-P foi inferior a 0,05) para as medições dimensionais aferidas, sendo observado ainda que ambos os parâmetros de orientação de fabricação influenciaram os resultados, indicando que a orientação das peças impressas por MJF pode afetar a precisão dimensional. Embora este efeito tenha apresentado significância estatística, é preciso considerar ainda a intensidade desta influência, afinal para a geometria avaliada, a variação dimensional foi no máximo na ordem de um desvio padrão de 0,65 mm, o que para muitas aplicações não é uma variação crítica. No entanto, pode ser necessário considerar esta variação,

por exemplo, quando se pretende fabricar produtos com requisitos dimensionais mais críticos, sendo necessário otimizar o processo para atender estes requisitos.

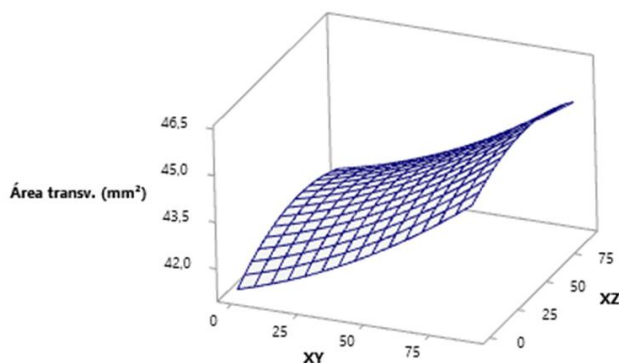
Tabela 4. Dados da análise de variância das variáveis dimensionais pelo modelo de superfície de resposta.

Variável	Fatores com significância no modelo de resposta de superfície	Valor-P	S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
Espessura	Modelo	0,000	0,0126	99,19%	98,61%	94,22%
	Linear	0,014				
	XY	0,005				
	Quadrado	0,004				
	XY*XY	0,002				
Largura	Modelo	0,000	0,0110	98,62%	97,64%	90,19%
	Linear	0,014				
	XZ	0,005				
	Quadrado	0,004				
	XZ*XZ	0,002				
Área transversal	Modelo	0,000	0,1324	99,18%	98,59%	94,14%
	Linear	0,001				
	XY	0,003				
	XZ	0,000				
	Quadrado	0,000				
	XY*XY	0,003				
	XZ*XZ	0,000				

Com a significância atestada para os resultados dimensionais, foi possível gerar o gráfico de superfície para mapear o comportamento da influência das orientações de impressão nesta característica, conforme é mostrado na Fig.6. O gráfico demonstra um comportamento dependente das duas orientações estudadas, onde o ponto ótimo desejado seria considerando área transversal de 40 mm². Através do gráfico é visível que amostras orientadas a 0° na horizontal (plano XY) e 0° na vertical (plano XZ) são as mais se adequam ao valor esperado. Pela análise de otimização executada pela metodologia de RSM, também apresentada na Fig.8, é possível validar esta observação.

a)

Gráfico de Superfície de Área transversal (mm²) versus XZ; XY



b)

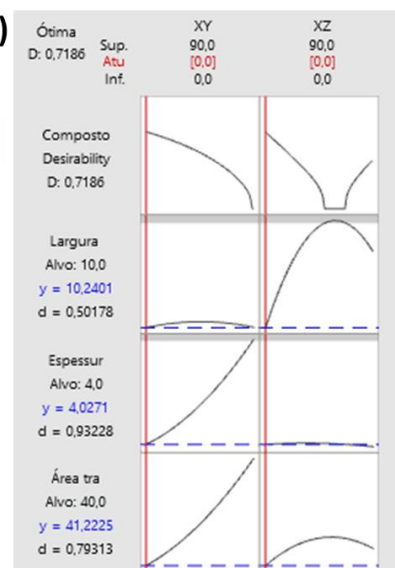


Figura 8. a) Gráfico de superfície de resposta para a Área transversal das amostras e b) Análise de otimização gerada pelo modelo RSM avaliado para atingir uma largura de 10 mm, espessura de 4 mm e área transversal de 40 mm², respectivamente.

4. CONCLUSÃO

Os resultados encontrados neste estudo revelaram que, pelo modelo experimental aplicado, não foi encontrada uma influência estatística significativa da orientação de impressão na resistência ao impacto das amostras de PP aditivamente manufaturadas por MJF, o que pode indicar uma boa isotropia para a resistência ao impacto quanto às propriedades mecânicas de peças fabricadas por esta tecnologia. Além disso, considerando que esta propriedade pode ser afetada pelas

dimensões das amostras que variaram com as orientações de impressão, pode ser necessário realizar novo estudo usando as amostras de cada orientação para apresentarem mesmas dimensões, o que adequaria a análise para verificar se a orientação realmente não afeta com significância a resistência ao impacto.

No caso da precisão dimensional, foi identificado que as orientações de impressão afetaram variações com significância estatística nas dimensões das amostras, sendo que as peças posicionadas horizontalmente mais se aproximaram das dimensões desejadas, enquanto as amostras posicionadas na vertical apresentaram um maior afastamento das dimensões desejadas, contudo se trata de uma variação da ordem de no máximo 0,6mm, o que não impacta significativamente para muitas aplicações. Esta variação pode ser associada ao efeito de capilaridade e a exposição das áreas das camadas impressas a irradiação de energia infravermelha, que difere para peças orientadas de forma diferente. Foi possível ainda determinar como otimizar a orientação das peças (para a geometria estudada) para se melhor atingir as dimensões esperadas.

5. AGRADECIMENTOS

Esta publicação é resultado de um projeto regulamentado pela Lei Brasileira de Informática (Lei nº 8.248 de 1991 e suas posteriores atualizações) e foi desenvolvida no âmbito do "Convênio HP 071-22" entre o SENAI CIMATEC e a HP Brasil Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos Ltda.

6. REFERÊNCIAS

- ASM International. "ASM Handbook V. 24: Additive Manufacturing". *ASM International*. 2020.
- HP. "HP Multi Jet Fusion technology. HP White Paper". *HP press release*. 2018.
- ISO. "ISO 180: Plastics – Determination of Izod Impact strength" *ISO*. 2000.
- ISO/ASTM. "ISO / ASTM 52900 - Additive manufacturing — General principles — Terminology". *ISO / ASTM*. 2015.
- Lee, K.P.M., Pandelidi, C., Kajtaz, M. "Build orientation effects on mechanical properties and porosity of polyamide-11 fabricated via multi jet fusion," *Additive Manufacturing*. Vol. 36. 2020.
- Lezama, N.R., Rodrigues, S.M., Rio, B.R., Bildosola, I. "A bibliometric method for assessing technological maturity: the case of additive manufacturing," *Scientometrics*, Vol. 117, No. 3, pp. 1425–1452, 2018.
- London, M.B. "Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Multi-Jet Fusion 3D Printing". *Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (Environment and Sustainability) at the University of Michigan*. 2020.
- Matos, M.A., Rocha, A.M.A.C., Pereira, A.I. "Improving additive manufacturing performance by build orientation optimization". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 107, No. 5–6, pp. 1993–2005, 2020.
- 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 (Switzerland)*, Vol. 9, No. 18, 2019.
- Mele, M., Campana, G., Monti, G.L. "On the effect of irradiance on dimensional accuracy in multijet fusion additive manufacturing". *Rapid Prototyping Journal*. Vol. 27. No. 6. pp. 1138-1147. 2021.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials , methods , applications and challenges". *Composites Part B*, Vol. 143, pp. 172–196, 2018.
- Sağbaşı, B. "Effect of Orientation Angle on Surface Quality and Dimensional Accuracy of Functional Parts Manufactured by Multi Jet Fusion Technology". *European Mechanical Science*, Vol. 4, Np. 2, pp. 47–52, 2020.
- Šafka, J., Ackermann, M., Věle, F., Macháček, J., Henyš, P. Mechanical properties of polypropylene: Additive manufacturing by multi jet fusion technology. *Materials*, Vol. 14, No. 9, pp. 23–25. 2021.
- Wei, S.T., Zhou, K., Chao, C.A. A Comprehensive Investigation on 3D Printing of Polyamide 11 and Thermoplastic Polyurethane via Multi Jet Fusion. *Polymers*. 2021.
- Xu, V., Langefeld, A., Erharter, B., Kourkeian, M. "Polymer Additive Manufacturing – Market Today And In The Future," < <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Polymer-additive-manufacturing-Market-today-and-in-the-future.html>>. Publicado em 2020. Acesso em 28 de Julho de 2021.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATING THE EFFECTS OF MANUFACTURING ORIENTATION ON DIMENSIONAL ACCURACY AND IMPACT STRENGTH OF POLYPROPYLENE SAMPLES PRINTED USING HP MULTI JET FUSION TECHNOLOGY

Luã Fonseca Seixas, lua.seixas03@gmail.com¹

Tiago Nunes Lima, tiago.nunes@fieb.org.br^{2,3}

Bruno Caetano dos Santos Silva, bruno.silva@fieb.org.br^{2,3}

Luís Fernando Folle, luis.folle@fbter.org.br³

Rodrigo Santiago Coelho, rodrigo.coelho@fieb.org.br^{1,2,3}

¹ SENAI CIMATEC, Centro Universitário SENAI CIMATEC – Programa de Pós-graduação MPDS/GETEC/MCTI, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, 41650-010, Salvador-BA, Brasil;

² SENAI CIMATEC, Bureau de Manufatura Aditiva SENAI CIMATEC – Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, 41650-010, Salvador-BA, Brasil;

³ SENAI CIMATEC, Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, 41650-010, Salvador-BA, Brasil;

Abstract. In the Multi jet Fusion (MJF) additive manufacturing (AM) process, a powder bed fusion AM technology, the key processing parameters that affect the performance of printed products are print orientation, positioning of parts within the printing volume and energy and cooling deposition parameters. Considering that MJF technology is a relatively new process, in the literature there is still little understanding about the influences of process parameters on the performance variation of products manufactured by this AM technology. In addition, most published studies were primarily about the Polyamide 12 material (PA12 or Nylon 12). On the other hand, little has been studied in depth on other materials available for the MJF process. Of these, Polypropylene (PP) is a commodity polymer widely applied in the industry, thus, the evaluation of the characteristics of PP products printed by MJF, is necessary to improve the applicability of this process. Thus, this work aims to investigate the effects of varying the spatial orientation of printing on the dimensional accuracy and impact strength of MJF-printed PP samples. For this, samples were produced in different printing orientations according to the Response Surface Method (RSM) of Design of Experiments (DOE) for statistical validation. The evaluations were carried out by manual measurement of dimensions and Izod model impact test. The results obtained revealed that, by the experimental model applied, there was no statistically significant influence of the print orientation on the impact strength of the PP samples, which may indicate a good isotropy in relation to the impact strength. However, it was identified that the printing orientations affected variations with statistical significance in the dimensions of the samples, with the pieces positioned horizontally having greater accuracy than those that were positioned vertically, with variations of up to 6.5% and 15.75% respectively.

Keywords: Additive Manufacturing, Printing Orientation, Polypropylene, Powder bed fusion, HP Multi jet Fusion.