



ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS AO IMPACTO DE PEÇAS FABRICADAS PELO PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO UTILIZANDO FILAMENTO DE PLA/COBRE

Kevin S. V. Neres, kevinsacramento@gmail.com¹

Érica C. Almeida, ecalmeida@uesc.br²

Danilo M. Barquete, danilo@uesc.br³

José C. Camargo, jccamargo@uesc.br⁴

Erickson F. M. S. Silva, efmssilva@uesc.br⁵

Suzane B. Silva, suzanebritos@gmail.com⁶

Mídiã L. Silva, midi.luz@gmail.com⁷

¹⁻⁷ Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, Salobrinho, CEP 45662-900, Ilhéus, Bahia, Brasil.

Resumo. *Através da tecnologia de fabricação por manufatura aditiva, como o processo de modelagem por fusão e deposição (FDM), peças são produzidas em curtos períodos de tempo, com redução do número de etapas e processos de fabricação. A fim de ampliar as oportunidades de aplicação desta tecnologia, esta pesquisa tem como objetivo analisar as propriedades mecânicas ao impacto de peças fabricadas pelo processo de manufatura aditiva utilizando filamento de PLA (Polylactic Acid) / Cobre. O planejamento de experimentos adotado seguiu a Metodologia de Superfície de Resposta – Planejamento Composto Central. Assim, os corpos de prova foram projetados em ambiente computacional tridimensional e impressos em uma impressora 3D modelo Delta, variando os parâmetros infill e height. Desta forma, realizou-se o ensaio mecânico de impacto seguindo a norma ASTM D256.26625. Por fim, os resultados obtidos apresentaram aumento das propriedades mecânicas ao impacto quando comparados com o filamento de PLA.*

Palavras chave: *Manufatura aditiva. Modelagem por fusão e deposição. Filamento de PLA/Cobre. Ensaio de impacto.*

1. INTRODUÇÃO

Estamos vivendo uma nova revolução industrial com a entrada da Manufatura Aditiva (MA) como etapa intermediária e/ou até mesmo final da fabricação de produtos. Nos últimos anos houve um enorme salto tecnológico devido ao desenvolvimento de novos materiais de engenharia e da nanotecnologia aplicada a eletrônica (Cunico, 2013).

A prototipagem rápida (PR) ou manufatura aditiva pode ser definida como um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas. Esta tecnologia permite fabricar produtos com formas complexas, as quais, nos processos convencionais de usinagem, seriam de grande complexidade (Volpato, 2017).

Uma das tecnologias de MA disponíveis para fabricar produtos, é o processo FDM que consiste na deposição de material através de um extrusor (Rodrigues, 2017). Um dos tipos deste processo é a impressão 3D, a qual permite fabricar componentes físicos em três dimensões, com informações obtidas diretamente do modelo geométrico gerado no *software* CAD. O processo começa com a criação do modelo virtual 3D em um *software* CAD que é então convertido em um formato de arquivo que pode ser compreendido pela máquina. Esse é o formato de arquivo STL (*standard tessellation/triangulation language*). Depois de criado, o arquivo STL é aberto no *software* de fatiamento (*slicer*) e programação do equipamento de MA, obtendo-se curvas de níveis 2D (movimentos no plano XY) que definirão, em cada camada (direção Z), onde existe ou não material a ser adicionado (Almeida, 2018).

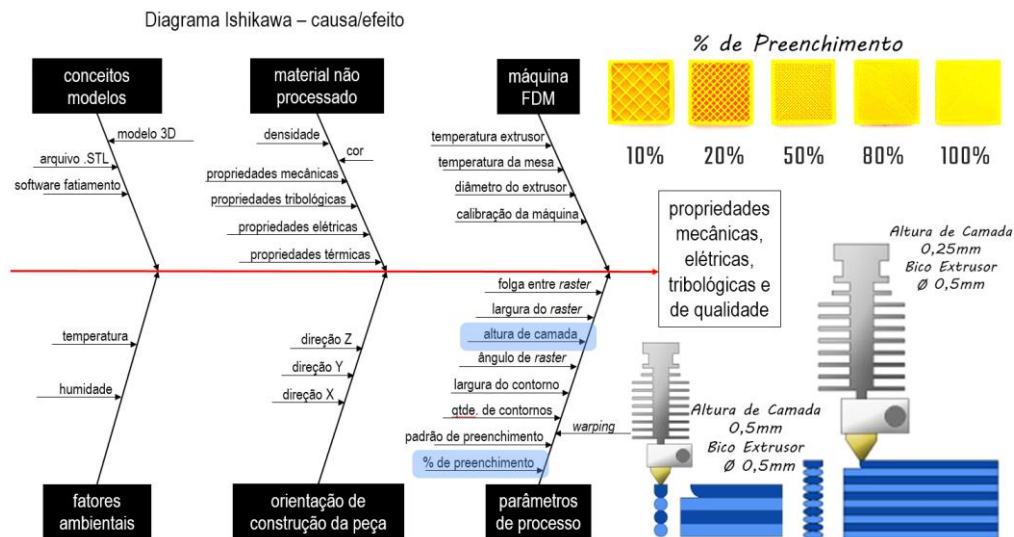
Paralelamente ao desenvolvimento da MA, o avanço (melhoria de propriedades) dos polímeros como materiais de engenharia, transformaram esta classe em um dos materiais mais usados industrialmente, devido a razões tecnológicas: baixa densidade, boa conformação, boa refletividade, boa resistência à abrasão; e econômicas: baixo custo de fabricação (McKeen, 2017).

É neste contexto que o PLA (*Polylactic Acid*) vem ganhando um espaço de grande destaque dentre as principais matérias-primas utilizadas para a fabricação de filamentos, devido principalmente as suas propriedades de biodegradabilidade (Nofar, et al., 2019). Entretanto, o que aparenta ser uma solução frente as necessidades ambientais, também é um limitante em diversas aplicações industriais, pois o PLA apresenta baixa resistência mecânica e térmica, além da sua rápida decomposição em ambientes úmidos (McKeen, 2017).

Atualmente, uma nova grade de filamentos com blendas de PLA/Metal está surgindo no mercado. A adição de um material metálico ao PLA deverá fornecer ao filamento melhorias em suas propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, e estéticas, abrindo caminho para aplicações que exigem alto desempenho e tem alto valor agregado.

O sucesso de qualquer processo de MA (em termos de melhoria das propriedades mecânicas) depende da seleção adequada dos parâmetros do processo, e portanto a determinação das condições ótimas. Diversas técnicas estatísticas tem sido empregadas com sucesso na otimização dos parâmetros para o processo FDM. O diagrama de Ishikawa (Fig. 1) organiza estes parâmetros e auxilia na metodologia dos experimentos a serem elaborados (Camargo, 2019).

Figura 1. Diagrama de Ishikawa para diversos parâmetros do processo FDM, com destaque para os parâmetros altura de camada (*height*) e porcentagem de preenchimento (*infill*) (adaptado de Camargo, 2019)



De acordo com (Montgomery e Runger, 2016), a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelagem e análise de aplicações em que a resposta de interesse seja influenciada por várias variáveis, tendo como objetivo principal a otimização destas respostas. A MSR é usada frequentemente para refinar modelos após a determinação dos principais parâmetros do processos dos experimentos fatoriais, especialmente quando existe a suspeita de curvatura na superfícies da resposta.

Na maioria dos problemas de MSR, a relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Assim, a primeira etapa do MSR é encontrar uma aproximação adequada para a relação verdadeira entre a resposta e as variáveis independentes. Se a resposta for bem modelada por uma função linear das variáveis independentes, esta função de aproximação será o modelo de primeira ordem. Se houver curvatura no sistema, então um polinômio de maior grau terá de ser usado, tal como o modelo de segunda ordem (Camargo, 2019).

Existem cinco parâmetros estatísticos que validam um modelo. Dentre os cinco, pode-se citar o quadrado do coeficiente de correlação múltipla ou de determinação, o qual compara a variância dos pontos experimentais em relação ao ajuste proposto, com a variância da própria população de pontos experimentais. Um valor do coeficiente de correlação ou determinação igual a 0,7, indica que 70% de variabilidade dos dados é explicada pela equação, sendo esta a porcentagem mínima para uma correlação de significância estatística. Um valor zero indica que não existe correlação. Quanto mais próximo da unidade estiver o valor do coeficiente de correlação, melhor será o ajuste proposto (Camargo, 2019).

Desta forma, o objetivo deste projeto de pesquisa é analisar as propriedades mecânicas ao impacto, de peças fabricadas pelo processo de manufatura aditiva utilizando técnicas de impressão FDM e filamento de PLA/Cobre.

2. METODOLOGIA

O método de pesquisa aplicado aos procedimentos metodológicos pode ser classificado como pesquisa experimental (Souza, 2013), sendo desenvolvida em laboratório. Os resultados das propriedades mecânicas ao impacto para peças impressas com filamento de PLA/Cobre foram confrontados e analisados comparativamente com os valores teóricos de peças impressas utilizando filamento de PLA. As tarefas metodológicas são descritas nas alíneas a seguir:

- Elaboração do planejamento estatístico de experimentos mediante a Metodologia de Superfície de Resposta – Planejamento Composto Central para dois fatores, um bloco e dez experimentos, utilizando o software Statistica®;
- Desenvolvimento de projeto mecânico dos corpos de prova (CP's), utilizando o software CAD SolidWorks® para geração dos sólidos tridimensionais em ambiente gráfico;

- c) Transformação da linguagem CAD para CAM (*slicing* ou fatiamento) dos corpos de prova, realizando a interface com a impressora 3D, utilizando o software Simplify 3D®;
- d) Impressão dos corpos de prova pelo processo FDM nas condições e quantidades estabelecidas em cada ensaio, utilizando filamento de PLA/Cobre com diâmetro de 1,75mm, utilizando uma impressora 3D tipo Delta;
- e) Avaliação, conforme a norma ASTM D256.26625, das propriedades mecânicas ao impacto tipo Izod: energia cinética absorvida pelo corpo de prova no momento do impacto, e resistência ao impacto, utilizando um equipamento PANANTEC ATMI, modelo PID-22, usando martelo de impacto de 11J à velocidade de descida de 3,5m/s para os CP's impressos;
- f) Comparação dos resultados obtidos para as propriedades mecânicas ao impacto do filamento de PLA/Cobre com os resultados disponíveis na literatura para peças impressas utilizando metodologia semelhante e filamento de PLA.

3. RESULTADOS

O planejamento de experimentos (DOE – da língua inglesa *Design of Experiments*), bem como a quantidade de peças a serem fabricadas pelo processo de manufatura aditiva FDM, estão de acordo com a metodologia estabelecida pela Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) – Planejamento Composto Central (PCC) – *Face Centered* (CCF) para dois fatores, dois blocos e dez experimentos ($n_c = 4$; $n_s = 4$; $n_0 = 2$).

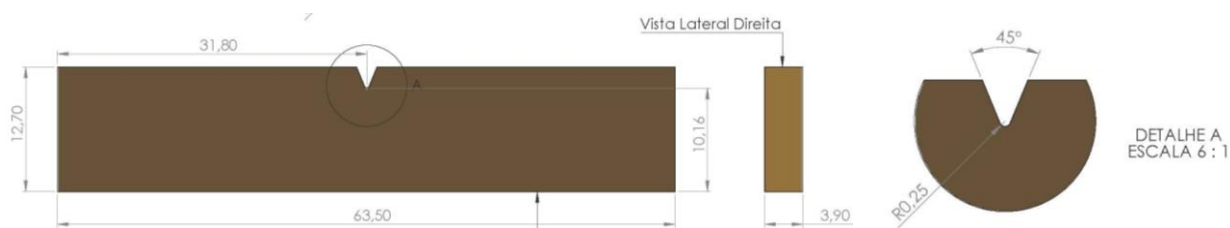
Os dois fatores definidos para o planejamento de experimentos (Tabela 1) foram selecionados mediante análise do diagrama de Ishikawa (Fig. 1), bem como a metodologia disponível por (Camargo, 2019) e (Almeida, 2018). Assim, foram definidas as variáveis quantitativas de intervalo independentes associadas aos parâmetros de processo, de acordo com a Fig. 1: porcentagem de preenchimento (*infill*) e altura de camada (*height*).

Tabela 1. Planejamento de experimentos realizado no software Statistica® (Autor, 2019)

Ensaio	Infill (%)	Height (mm)	Ensaio	Infill (%)	Height (mm)
01	10	0,10	06	90	0,20
02	10	0,30	07	50	0,10
03	90	0,10	08	50	0,30
04	90	0,30	09	50	0,20
05	10	0,20	10	50	0,20

O projeto mecânico dos corpos de prova foi realizado em ambiente computacional tridimensional, seguindo o dimensionamento (Fig. 2) conforme a norma internacional ASTM D256.26625 (ASTM, 2018).

Figura 2. Desenho técnico realizado no software SolidWorks® para os corpos de provas utilizados no ensaio de impacto (Autor, 2019)



A orientação escolhida para impressão 3D dos corpos de prova foi a *printed flat*: CP na posição paralela a placa de impressão. Os corpos de prova projetados no SolidWorks® foram exportados para o padrão STL e importados pelo software de fatiamento (*slicing*) Simplify3D®, onde foram criados os G-Code utilizados pela impressora 3D para impressão dos protótipos. Os principais parâmetros de impressão, incluindo as camadas de fechamento inferiores e superiores, padrão interno de preenchimento e as linhas de perímetro estão apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros de impressão para o ensaio de impacto utilizando o filamento de PLA/Cobre (Autor, 2019)

Diâmetro do extrusor	0,40mm	Qtd de camadas superiores	4 camadas
Altura da camada (<i>height</i>)	Tabela 1	Qtd de camadas inferiores	4 camadas
% de preenchimento (<i>infill</i>)	Tabela 1	Nº de linhas perímetro	2 linhas
Padrão de preenchimento int.	Rectilinear	Temp. do extrusor	210 °C
Padrão de preenchimento ext.	Rectilinear	Temp. placa de impressão	65 °C
Vel. deslocamento do extrusor	2400 mm/min	Ângulo de preenchimento int.	45°

O ensaio mecânico de impacto foi realizado mediante os procedimentos e equacionamentos disponíveis na norma internacional ASTM D256.26625 (ASTM, 2018), sendo utilizado o tipo Izod (o golpe do martelo é desferido no mesmo lado do entalhe). Desta forma, as respostas avaliadas no teste de de impacto foram: energia cinética absorvida pelo corpo de prova no momento do impacto (E_i), resistência ao impacto (R_i), apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Valores experimentais obtidos no ensaio de impacto com o filamento de PLA/Cobre (Autor, 2019)

Ensaio	Infill (%)	Height (mm)	E_i (10kJ/m ²)	R_i (J/m)	Tipo de falha
01	10,0	0,10	0,058	7,46	Quebra Completa
02	10,0	0,30	0,086	10,86	Quebra Completa
03	90,0	0,10	0,121	15,50	Quebra Completa
04	90,0	0,30	0,121	15,09	Quebra Completa
05	10,0	0,20	0,096	11,95	Quebra Completa
06	90,0	0,20	0,172	20,90	Quebra Completa
07	50,0	0,10	0,082	10,61	Quebra Completa
08	50,0	0,30	0,114	14,11	Quebra Completa
09	50,0	0,20	0,106	13,72	Quebra Completa
10	50,0	0,20	0,089	11,34	Quebra Completa

A partir dos dados da Tab. 3 realizou-se a análise de variância (ANOVA), disposta de acordo com os resultados da Tab. 4 para a E_i . Os valores SS representam as somas dos quadrados sequenciais que são medidas da variação para os diferentes componentes do modelo. Os valores df representam os graus de liberdade que são a quantidade de informações presentes na amostragem estabelecida. Os valores MS representam os quadrados médios sequenciais que medem o quanto a variação do modelo pode ser explicado, sendo considerado os graus de liberdade. Os valores de F representam a estatística de teste usada para determinar se o termo está associado com a resposta. Os valores de p representam uma probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula, sendo calculado através dos valores de F. Desta forma, pelo resultado apresentado na Tab. 4, conclui-se que 84,493% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo.

Tabela 4. Matriz de resultados ANOVA para a resposta energia cinética absorvida pelo corpo de prova no momento do impacto (E_i), utilizando o *software* Statística® (Autor, 2019)

ANOVA					
Var.: E_i / R-sqr = 0,84493 / Adj: 0,6511					
2 fatores, 2 blocos, 10 experimentos / MS Residual = 0,0003302					
Fator	SS	df	MS	F	p
Infill (%) (L)	0,005046	1	0,005046	15,2834658	0,0174025409
Infill (%) (Q)	0,000510107143	1	0,000510107143	1,54502677	0,28175383
Height (L)	0,0006	1	0,0006	1,81729677	0,248917407
Height (Q)	0,00105010714	1	0,00105010714	3,18059387	0,149088607
1L com 2L	0,000196	1	0,000196	0,593650279	0,483994473
Erro	0,00132064286	4	0,000330160714	-	-
Total SS	1111,869	9	-	-	-

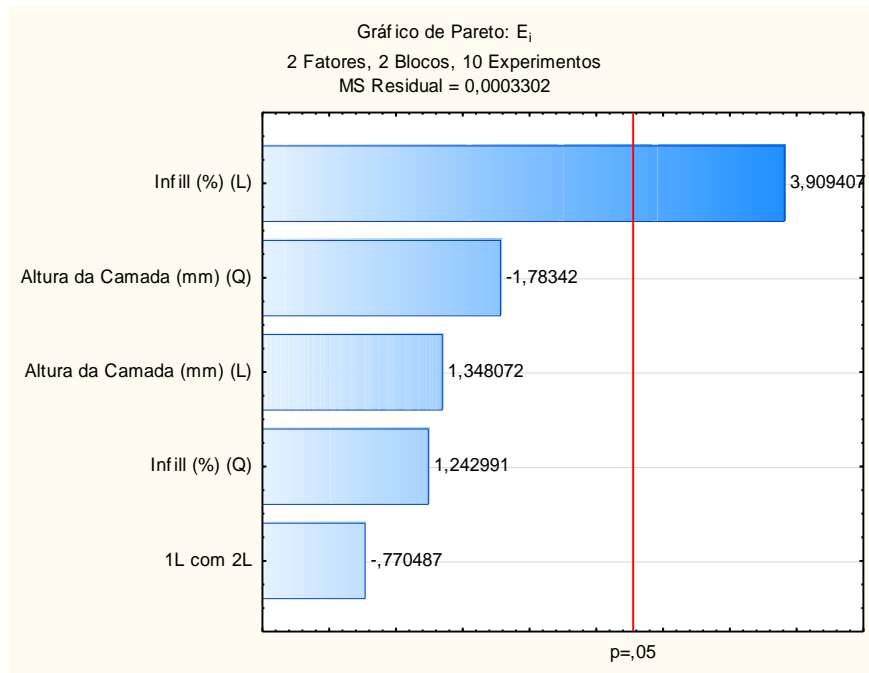
Assim, pode-se determinar a equação do modelo da resposta ao impacto (Z) através da Eq. (1) para o planejamento proposto, onde x é o fator altura da camada, y é o fator porcentagem de preenchimento, e xy é a interação entre estes dois fatores.

$$Z = -0,0271 + 0,0001509x + 0,00000924x^2 + 1,036y - 2,121y^2 - 0,00175xy \quad (1)$$

A Equação (1) é determinada através das respostas obtidas nos ensaios experimentais e com os parâmetros de processos pré-determinados, não podendo ser estendidos para outros materiais ou variações destes processos. Desta forma, é notável observar que o fator porcentagem de preenchimento exerce maior influência sobre a resposta ao impacto do que o fator de altura de camada.

A fim de determinar se a associação entre a resposta e cada termo no modelo é estatisticamente significativa, foi utilizado o Gráfico de Pareto (Fig. 3) para comparação do valor p (Tab. 4) com o seu nível de significância, com o intuito de avaliar a hipótese nula (ausência de associação entre o termo e a resposta). O nível de significância (α) de 0,05 foi adotado nesta metodologia, ou seja, um nível de significância de 0,05 indica um risco de 5% de se concluir que existe uma associação quando não existe uma associação real.

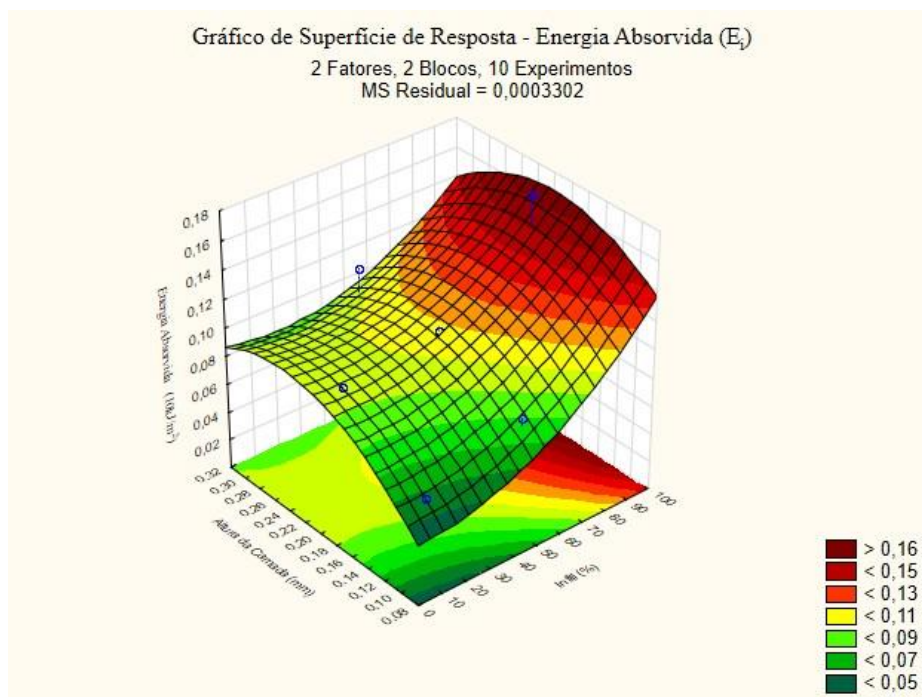
Figura 3. Gráfico de Pareto: E_i , utilizando o *software* *Statística*® (Autor, 2019)



O Gráfico de Pareto (Fig. 3) para a E_i mostra que dentre os parâmetros de processo adotados, o mais significativo é o fator *infill* (L). Isto significa que a E_i sofre uma maior influência deste fator, dentro do limite de significância de 95%, comprovando estatisticamente a análise inicial fornecida pela Eq. (1).

É possível otimizar a resposta em função da Eq. (1), e determinar regiões ótimas de impressão (Fig. 4), ou seja, regiões onde é possível obter maiores magnitudes de energia absorvida frente aos menores valores dos fatores x e y, resultando no ganho em tempo, quantidade de insumos e energia, que de forma geral, representam menores custos aplicados ao processo de manufatura aditiva.

Figura 4. Metodologia de Superfície de Resposta: E_i x (*infill* / *height*) - E_i , utilizando o *software* *Statística*® (Autor, 2019)

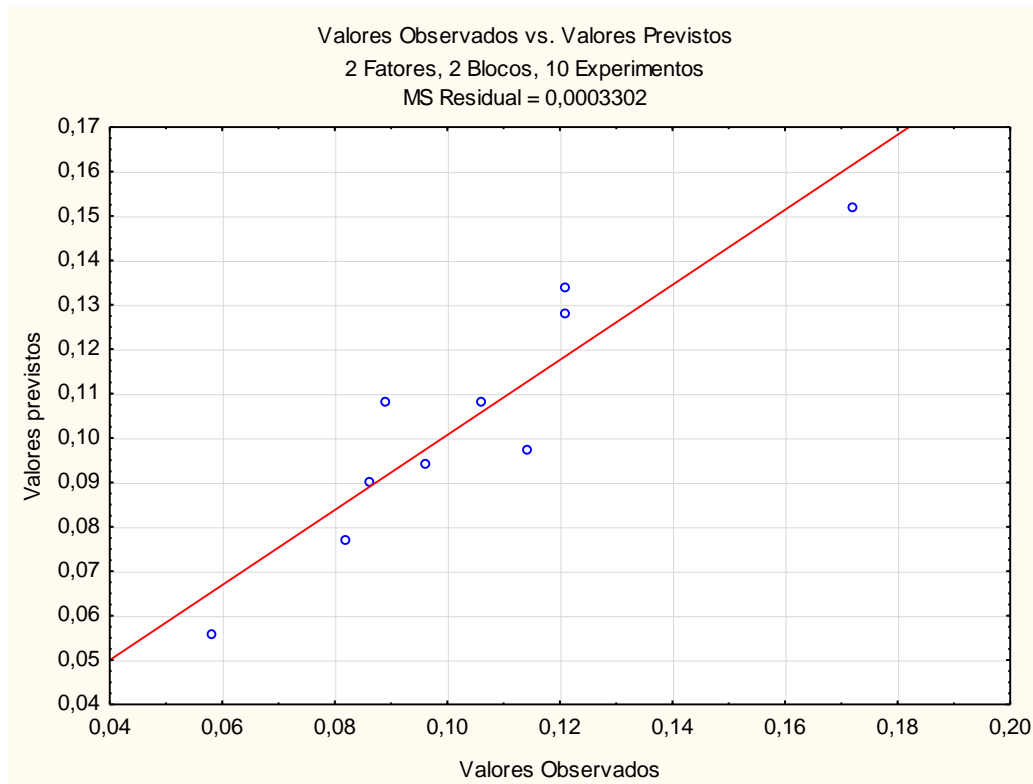


Para o fator altura de camada, a energia de impacto é praticamente constante no intervalo entre 0,30mm a 0,18mm e desce a partir de 0,18mm. Para o fator porcentagem de preenchimento, a energia de impacto cresce com o aumento

percentual deste preenchimento. Para a interação entre os dois fatores, a energia de impacto cresce para qualquer variação da altura de camada com o aumento da porcentagem de preenchimento, sendo mais significativa a partir de 60%. Desta forma, regiões ótimas de impressão para a resposta energia de impacto estão localizadas no intervalo de 0,30mm a 0,18mm de altura de camada e 80% a 100% de porcentagem de preenchimento.

O gráfico da Figura 5 faz um comparativo entre o modelo proposto da Eq. (1) e os valores observados experimentalmente para a E_i , considerando que 84,493% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo (Tab. 4).

Figura 5. Valores Observados vs Valores Previstos - E_i , utilizando o *software* Statística® (Autor, 2019)



Ao comparar os resultados dispostos na Tabela 3 com os resultados obtidos por (Camargo, 2019) para o filamento de PLA, percebe-se que há um aumento percentual médio de 105,34% da energia de impacto (104,5 J/m² versus 50,89 J/m², respectivamente).

4. CONCLUSÕES

A adição do cobre ao filamento de PLA alterou significativamente suas propriedades mecânicas ao impacto, sendo o percentual desta mudança dependente dos parâmetros de processo de altura de camada (*height*) e porcentagem de preenchimento (*infill*). Desta forma, há um aumento da energia cinética absorvida pelo corpo de prova do filamento de PLA/Cobre no momento do impacto em relação ao corpo de prova do filamento de PLA.

Portanto, regiões ótimas de impressão para a resposta energia de impacto estão localizadas no intervalo de 0,30mm a 0,18mm de altura de camada e 80% a 100% de porcentagem de preenchimento.

5. AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Santa Cruz pela infraestrutura de laboratórios disponibilizada para realização desta pesquisa. Ao grupo de pesquisa LAPMET pela colaboração multidisciplinar para realização de treinamentos em equipamentos associados a manufatura aditiva.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, V. H. M., 2018. *Revestimento metálico da superfície de peças poliméricas produzidas através de processo de manufatura aditiva*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus.
- ASTM, 2018. *ASTM D256-10: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*. West Conshohocken, United States.

- Camargo, J. C., 2019. *Estudo das propriedades mecânicas, elétricas, tribológicas e de qualidade de peças manufaturadas pelo processo FDM utilizando polímeros PLA-Grafeno e ABS-Condutoivo*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Cunico, M. W. M., 2013. *Desenvolvimento de nova tecnologia de manufatura aditiva baseado em formação seletiva de compósito*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Júnior, M. B. S., 2018. Nanocompósito de matriz epoxídica reforçada com óxido de grafeno. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus.
- Maciel, N. O. R., 2017. *Análise mecânica comparativa de tração, flexão e impacto entre compósitos reforçados com fibras de curauá e compósitos reforçados com fibras de vidro*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.
- McKeen, L.W., 2017. *Film Properties of Plastics and Elastomers*. Elsevier, Cambridge, 4ª Edição, Vol. 1, 449-479.
- Montgomery, D. C. e Runger, C., 2016. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. LTC, Rio de Janeiro, 4ª Edição.
- Nofar, M., Sacligil D., Carreau P. J., Kamal, M. R. e Heuzey, M. C., 2019. *Poly (lactic acid) blends: Processing, properties and applications*. International Journal of Biological Macromolecules 125, 307-360.
- Rodrigues, L. F. B., 2017. Cunico, M. W. M., 2013. *Desenvolvimento de nova tecnologia de manufatura aditiva baseado em formação seletiva de compósito*. Dissertação de especialização, Universidade Federal de Santa Maria, Panambi.
- Souza, M. T. S. e Fernandes, M. M., 2013. *Otimização dos parâmetros de soldagem a ponto por resistência em uma indústria automotiva por meio da análise de experimentos e metodologia de superfície de resposta*. Science & Engineering Journal. Jul. – Dez., 131-140.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.