

AVALIAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS CONDUTORES DE ELETRICIDADE FABRICADOS POR EXTRUSÃO DE MATERIAL

André William Tonatto, andrewtonatto@gmail.com¹

Aurélio da Costa Sabino Netto, asabino.ifsc@gmail.com²

Carlos Henrique Ahrens, carlos.ahrens@ufsc.br¹

Christiano Fraga Zirbes, christianozirbes@hotmail.com²

Guilherme Mariz de Oliveira Barra, gbarra@ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade, Florianópolis – SC, 88040-900.

²Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Av. Mauro Ramos, n. 950 – Centro, Florianópolis – SC, 88020-300.

Resumo: A utilização de compósitos poliméricos condutores de eletricidade na manufatura aditiva por extrusão de material vem sendo apontada como alternativa para a fabricação de componentes de circuitos elétricos. Enquanto que pesquisas recentes têm buscado um melhor entendimento da composição destes materiais, poucas são as pesquisas que analisam o impacto dos parâmetros de processamento nas propriedades elétricas do produto final. Neste trabalho é investigado o processo de extrusão de material por uma impressora de tecnologia aberta, utilizando um filamento compósito polimérico condutor de eletricidade, constituído de Políácido Láctico (PLA) e grafeno. Tendo como objetivo descobrir propriedades térmicas do material, uma análise por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) foi realizada, identificando a temperatura de fusão (T_f), a temperatura de transição vítrea (T_v) e a temperatura de cristalização (T_c). Três experimentos foram realizados, o primeiro foi composto da fabricação de dez amostras com iguais condições de processamento, o propósito foi verificar a reprodutibilidade das amostras e a possível variação da resposta da condutividade elétrica em função das variações de espessura. O segundo experimento consistiu na verificação da influência dos parâmetros de processamento na condutividade elétrica, amostras foram fabricadas utilizando diferentes velocidades de impressão e temperaturas de extrusão. Imagens obtidas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) possibilitaram o entendimento da forma como o compósito se arranhou. A condutividade elétrica do material estudado foi avaliada por meio do método de quatro pontas. O terceiro experimento analisou a influência da utilização de diferentes temperaturas da mesa na condutividade elétrica. O emprego de diferentes temperaturas de extrusão e velocidades de impressão não resultaram em mudanças estatisticamente significativas na condutividade elétrica das amostras associadas a variações destes parâmetros. Entretanto a utilização de temperaturas da mesa mais altas, ocasionaram um aumento nos valores de condutividade elétrica, sugerindo um aprofundamento da investigação deste parâmetro.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Extrusão de material, Compósito polimérico condutor de eletricidade.

1. INTRODUÇÃO

A norma ISO/ASTM 52900 (2015), descreve a Manufatura Aditiva (MA) como um termo geral, para tecnologias que constroem objetos a partir de um modelo 3D, através da adição de camadas. Outros termos também têm sido utilizados para descrever o processo: fabricação aditiva, processos aditivos, manufatura por adição de camadas, manufatura por camadas e fabricação de formas complexas.

Entre os processos mais utilizados, tem-se o princípio de extrusão material, em que peças são construídas por camadas, a partir da deposição de polímeros termoplásticos (aquecidos previamente em um canal) por um bico extrusor, sobre uma mesa ou plataforma de construção (Guerrero et al., 2015; Peng, 2016).

A fabricação otimizada neste tipo de manufatura, é obtida com base no entendimento e escolha adequada de parâmetros de processo, uma vez que estes impactam na reprodutibilidade, propriedades mecânicas e surgimento de defeitos na peça final. Os diferentes parâmetros do processamento têm influência na microestrutura do material, que entre outros efeitos, modificam as propriedades mecânicas. A otimização dos parâmetros de processo pode ser alcançada operando o próprio equipamento (Galantucci et al., 2014; Volpato et al., 2007).

Os fatores de maior destaque envolvidos no processo são: orientação de construção, ângulo de varredura, espessura de camada, largura de varredura, largura de contorno, número de contornos, espaçamento entre varreduras e entre contornos e varredura (Hossain et al., 2013).

A umidade é um fator externo de grande importância, o armazenamento em ambientes de elevada umidade do ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), por exemplo, leva a um aumento na taxa de absorção de água do polímero, resultando em um aumento do diâmetro e mudanças na temperatura da transição vítrea e viscosidade do polímero, além da redução da resistência a tração de peças produzidas (Halidi & Abdullah, 2012; Kim et al., 2016).

No processo de extrusão de material, a matéria-prima é fornecida predominantemente na forma de filamentos. Os materiais de filamento possuem propriedades, limitações de operação e aplicações distintas, embora os polímeros mais comumente utilizados apresentem semelhanças, em termos de viscosidade e temperatura de fusão, como é o caso do PLA e do ABS (Singamenmi et al., 2011).

Com a crescente expansão do mercado de equipamentos para manufatura aditiva, novos materiais têm surgido para atender as mais variadas aplicações. No contexto dos processos baseados em extrusão de material, tem aumentado o interesse em aplicações para compósitos poliméricos condutores de eletricidade, como a incorporação de circuitos eletrônicos ao longo da superfície de peças e a fabricação de dispositivos com propriedades anti estáticas. Seu uso também oportuniza a fabricação de sensores mecânicos para o monitoramento do comportamento e rotina de trabalho do produto, devido as propriedades eletromecânicas destes polímeros (Diegel et al., 2011).

Entretanto, o processamento de filamentos condutores é usualmente dificultado pela incorporação de aditivos (cargas) na matriz (usualmente de PLA ou ABS), levando a uma maior viscosidade do compósito polimérico resultante e a maiores possibilidades de distorções dimensionais da peça. Em decorrência disso, pesquisadores aconselham a utilização de bicos de extrusão com maiores diâmetros, em relação ao que é normalmente utilizado, evidenciando a necessidade de estabelecer uma escolha adequada da estratégia de preenchimento e parâmetros de processamento (Leigh et al., 2012).

Apesar das possibilidades mencionadas, poucas pesquisas têm investigado o uso da extrusão de materiais poliméricos condutores de eletricidade, buscando compreender a relação existente entre os parâmetros de processo e a qualidade da peça final, foco de interesse das pesquisas que vem sendo realizadas junto ao Núcleo de Inovação em Moldagem e Manufatura Aditiva (NIMMA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento (Fig. 1) utilizado foi desenvolvido pelo Núcleo de Manufatura Aditiva (Nema) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), e utilizou como referência o modelo de máquina de plataforma e código aberto *RepRap MendelMax*. O equipamento opera com filamentos de 1,75 mm de diâmetro e possui uma área de impressão de 200 x 200 mm². A velocidade de impressão pode variar entre 20 mm/s e 80 mm/s, a temperatura de extrusão até 250°C e a temperatura da plataforma de construção até 100°C.

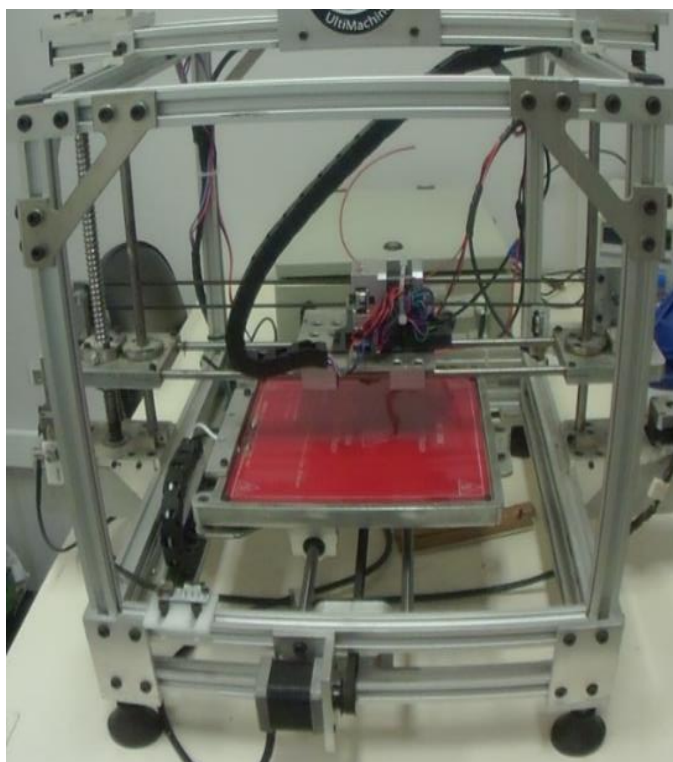


Figura 1. Equipamento de extrusão de material

O filamento condutor utilizado foi um compósito constituído por uma matriz polimérica de PLA e partículas de grafeno. Os parâmetros de processamento indicados pelo fabricante são: 220°C de temperatura de extrusão, 50°C de temperatura da plataforma de construção, 110% de taxa de deposição e 30 mm/s de velocidade de impressão (BLACKMAGIC 3D, 2016).

O trabalho avaliou a influência dos parâmetros de processamento nas propriedades elétricas das amostras fabricadas. O estudo foi dividido em duas etapas, onde a primeira consistiu na caracterização do material, seguido da avaliação da condutividade elétrica das peças fabricadas por diferentes parâmetros, colhendo-se assim, informações sobre a processabilidade do material no equipamento e a influência de cada variável.

A compreensão dos fenômenos térmicos, se fez possível por meio da análise por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), que permitiu a obtenção da temperatura de fusão (T_f), a temperatura de cristalização (T_c) e a temperatura de transição vítrea (T_v). Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) auxiliaram na interpretação da forma em que o material se encontra anteriormente ao processamento, bem como na identificação das amostras de maior e menor condutividade. O procedimento de preparação das amostras para o MEV, consistiu na fratura com o auxílio de nitrogênio líquido, fixação das amostras em um porta amostra e posterior recobrimento das amostras com uma camada de ouro.

A condutividade elétrica do material estudado foi avaliada por meio do método padrão quatro pontas, utilizado para avaliar polímeros condutores de resistividade inferior a $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, associada a imagens de MEV, que tornaram possível a compreensão das diferenças microscópicas entre as amostras de maior e menor resistividade elétrica.

Nesse método, a corrente elétrica (I) foi aplicada entre os terminais externos, com o auxílio de uma fonte de tensão da marca Keithley modelo 6220, e a diferença de potencial (V) foi medida entre os terminais internos com um eletrômetro da marca Keithley modelo 6517. Foram realizadas 10 medições por amostra (5 para cada face). A condutividade elétrica (σ) foi calculada a partir da equação 1.

$$\sigma = \frac{I}{V} \cdot \frac{\ln 2}{\pi} \cdot \frac{1}{w} \quad (1)$$

Onde: I – corrente elétrica aplicada; V – diferença de potencial; w – espessura da camada da amostra e $\ln 2/\pi$ – fator de correção que leva em consideração a distância entre os terminais da célula de medida.

As amostras foram projetadas com o uso do *software Solidworks*, e posteriormente foram convertidas para o formato STL (*Standard Tessellation Language*). As mesmas passaram pelo fatiamento no *software Craftware 1.13 beta*, em que foi obtido o código G, antes de serem finalizadas pelo *software Pronterface*. A impressão das amostras teve início com a impressão de três loops, que definiram os limites externos e o preenchimento da amostra, que se deu no padrão de 45 graus a estes loops (padrão definido pelo programa).

Os experimentos utilizaram de parâmetros sugeridos pelo fabricante e parâmetros fixados automaticamente pelo *software Pronterface*, indicados na tab. (1).

Tabela 1. Parâmetros e seus valores constantes (fixos) utilizados nos experimentos

Parâmetros Fixos	Valores
Taxa de deposição	110%
Altura da camada	0,4 mm
Diâmetro de bico	0,5 mm
Velocidade de impressão da primeira camada	100 %
Número de loops	3
Número de camadas	2
Estratégia de preenchimento	Camadas alternadas em 45°
Diâmetro do filamento	1,75 mm
Comprimento da amostra	50 mm
Largura da amostra	7 mm
Espessura da amostra	1 mm

O primeiro experimento, consistiu na fabricação de dez amostras utilizando os parâmetros de processamento do fabricante. O objetivo foi verificar a reprodutibilidade das amostras e a possível variação da resposta da condutividade elétrica em função das variações de espessura, ocorridas durante o processo de extrusão de material, assim como erros ao longo da medição da condutividade elétrica das amostras.

O segundo experimento, teve como intuito verificar a condutividade elétrica das amostras em função da modificação de parâmetros de processamento. Para tanto o experimento obedeceu um planejamento fatorial baseado em dois fatores, a velocidade de impressão (V) e a temperatura de extrusão (T), com três níveis associados a cada fator e uma repetição cada, resultando em um experimento com o total de 9 amostras, conforme mostra a tab. (2).

Tabela 2. Experimento 2: Parâmetros utilizados na fabricação das amostras, condutividade e espessuras das amostras.

Amostra	Temperatura do bico extrusor (°C)	Velocidade de impressão (mm/s)
T1V1	220	20
T1V2	220	30
T1V3	220	40
T2V1	230	20
T2V2	230	30
T2V3	230	40
T3V1	240	20
T3V2	240	30
T3V3	240	40

O terceiro experimento teve o intuito de se maximizar a condutividade elétrica das amostras e verificar a influência da temperatura da plataforma de construção (TM), A TM foi modificada dentro de um intervalo de 30°C até 100°C, com 10°C de variação entre cada amostra.

As amostras foram fabricadas uma por vez, todas sempre posicionadas no mesmo local da mesa ou plataforma de fabricação do equipamento, buscando minimizar eventuais diferenças de temperatura existentes em diferentes posições da mesa. Previamente a fabricação, a matéria prima na forma de filamento foi mantida protegida do ambiente e intemperes, sendo armazenada em um recipiente hermético contendo material desumidificante no seu interior. Durante a fabricação das amostras, a temperatura e umidade do ambiente foram mantidas em torno de 22°C e 45%, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado obtido da análise por DSC possibilitou a compreensão dos fenômenos térmicos que se passaram com o material e a identificação de uma faixa de temperaturas (janela de processamento) na qual o material pode ser processado com maior eficiência. A Figura 2 mostra a curva obtida do primeiro aquecimento, evidenciando a temperatura de transição vítrea (45,29°C), seguida da temperatura de cristalização (72,48°C) e a temperatura de fusão (165,29°C) do PLA empregado.

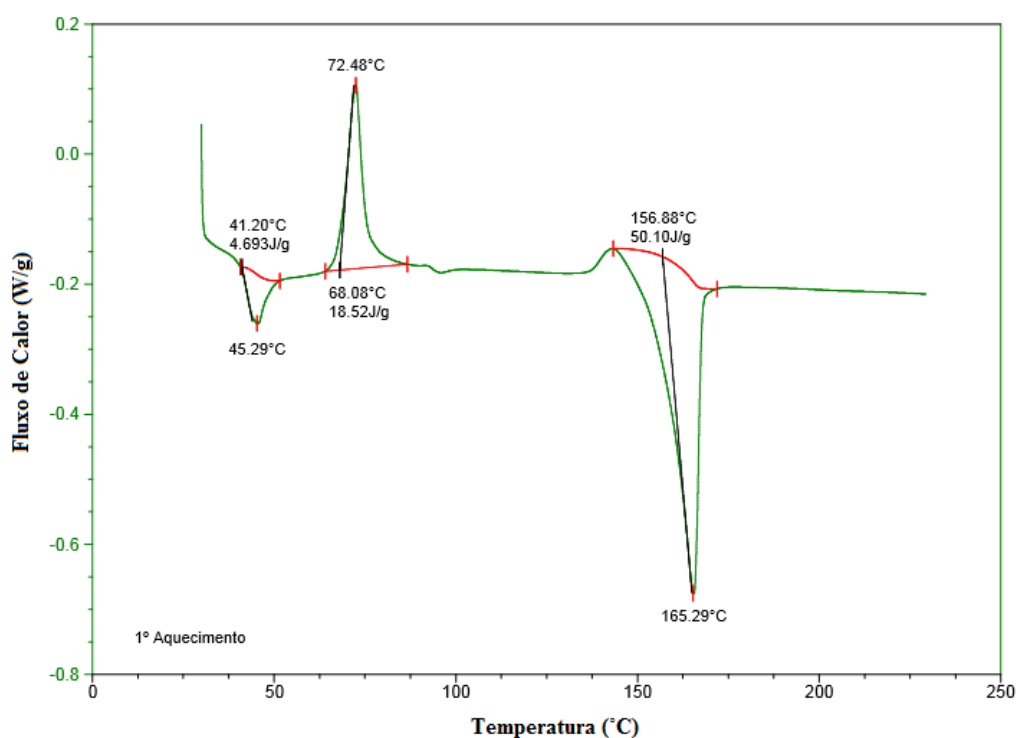


Figura 2. Primeiro aquecimento - DSC.

A Figura 3 mostra o segundo aquecimento, que gerou um valor mais preciso para o ponto de fusão ($166,11^{\circ}\text{C}$). Já a Figura 4 revela a temperatura de cristalização ($103,07^{\circ}\text{C}$) por meio do resfriamento do material. A janela de processamento está entre o início da curva endotérmica, que leva ao ponto de fusão, e o final da curva, que leva a temperatura de transição vítrea.

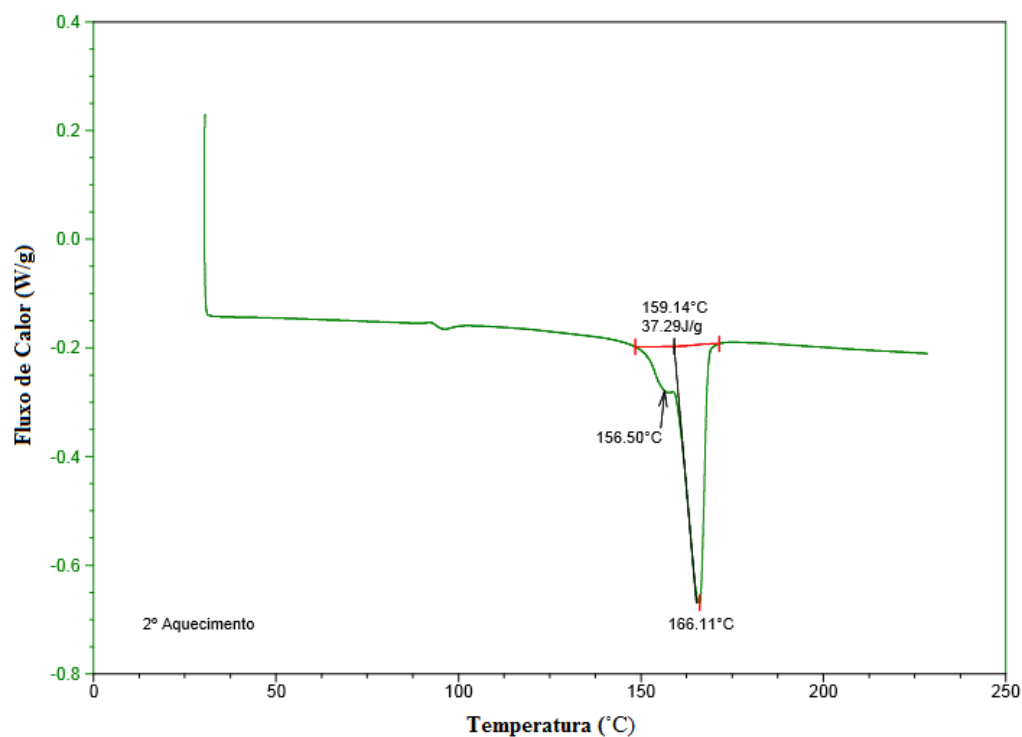


Figura 3. Segundo aquecimento - DSC.

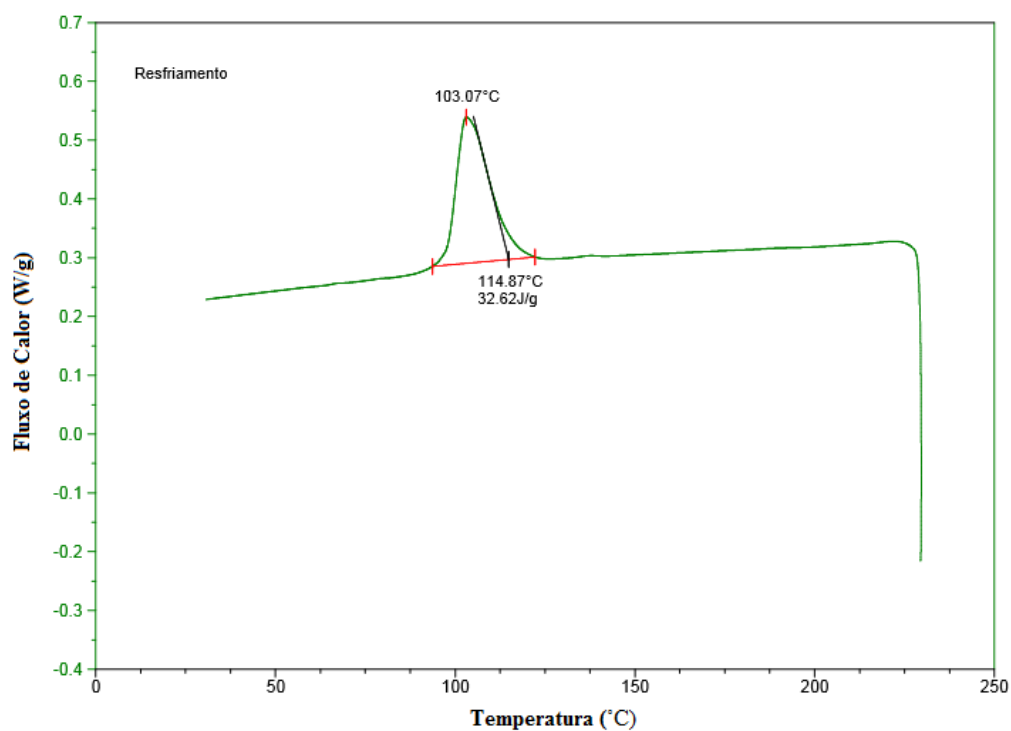


Figura 4. Resfriamento - DSC.

Através do DSC foi possível identificar que a matriz de PLA utilizada no material condutor de eletricidade é semicristalina. Como sugerido pelo fabricante, a faixa de processamento deve ser superior a T_f . Acima da temperatura indicada para a extrusão do filamento não se percebeu sinais de degradação do material, desta forma foi possível avaliar a extrusão em temperaturas superiores, buscando uma melhor processabilidade do material.

Imagens obtidas por MEV foram tiradas do filamento do compósito polimérico condutor, onde foi possível verificar a presença de poucos vazios durante o processo de extrusão do material, assim como constatar uma tendência de sua formação destes nas zonas mais externas do filamento, conforme pode ser observado na Fig. (5).

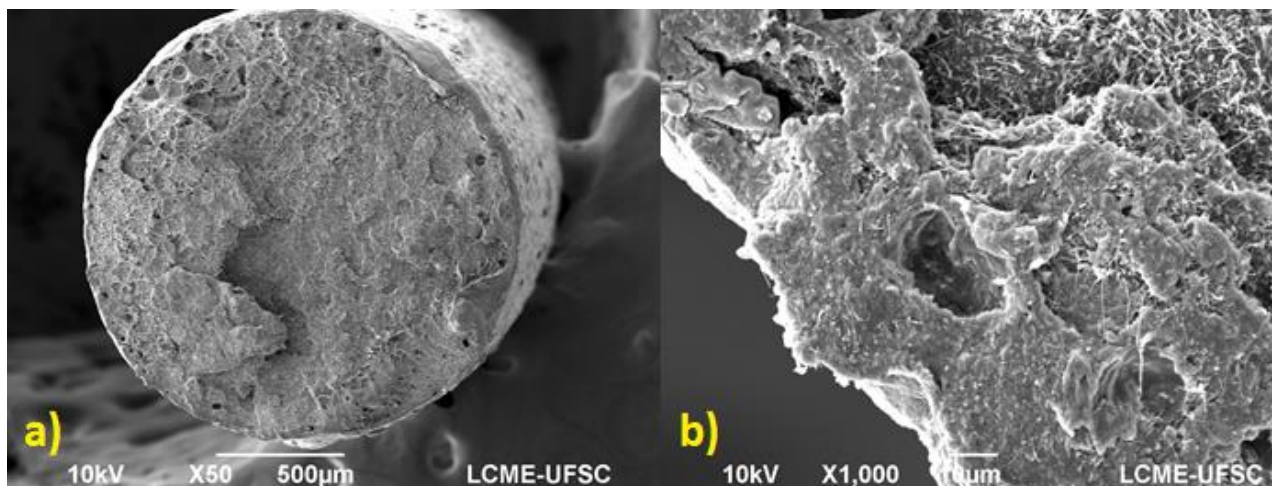


Figura 5. a) Filamento 1,75 mm, b) Região mais externa do filamento

Os resultados encontrados para as dez amostras do primeiro experimento, foram agrupados em função da espessura, sendo o primeiro grupo constituído por cinco amostras com espessuras entre 0,80 e 0,90 mm, de acordo com a Tab. (3), e o segundo grupo com amostras entre 0,91 e 1,00 mm de espessura, conforme a Tab. (4).

Tabela 3. Experimento 1: Condutividade e espessuras das amostras (Grupo 1).

Amostra	Condutividade (S/cm)	Espessura (mm)
Amostra 1	0,242	0,83
Amostra 2	0,243	0,84
Amostra 3	0,226	0,85
Amostra 4	0,233	0,86
Amostra 5	0,237	0,87

Tabela 4. Experimento 1: Condutividade e espessuras das amostras (Grupo 2).

Amostra	Condutividade (S/cm)	Espessura (mm)
Amostra 6	0,223	0,93
Amostra 7	0,218	0,95
Amostra 8	0,221	0,96
Amostra 9	0,212	0,96
Amostra 10	0,221	0,97

A média de condutividade elétrica obtida para as dez amostras do experimento foi de 0,228 S/cm, com um desvio padrão de 0,010 S/cm e um erro padrão de 0,003 S/cm. Em relação a espessura, esta apresentou uma maior variação, tendo uma média de 0,902 mm, desvio padrão de 0,057 mm e um erro padrão de 0,018 mm.

Analisando a condutividade das amostras separados em dois grupos, é possível observar que condutividade média resultou em valores de 0,236 S/cm e 0,219 S/cm para o primeiro e o segundo grupo, respectivamente. Por meio de um teste de hipóteses, utilizando a distribuição bicaudal de T de *Student*, para variâncias distintas e com um nível de significância de 95%, foi constatado uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

Desta forma, mesmo com a utilização de parâmetros idênticos de processamento, a condutividade elétrica média de cada amostra mostrou possuir interação com a espessura da amostra, conforme já previsto na Eq. (1).

Os resultados obtidos para o segundo experimento, onde as amostras foram fabricadas com diferentes valores para a temperatura do bico extrusor e velocidade de impressão, são mostradas na Tab. (5).

Tabela 5. Experimento 2: Análise dos resultados encontrados.

Amostra	Condutividade (S/cm)	Espessura (mm)
T1V1	0,230	0,90
T1V2	0,226	0,85
T1V3	0,260	0,86
T2V1	0,246	0,90
T2V2	0,250	0,88
T2V3	0,275	0,90
T3V1	0,237	0,85
T3V2	0,244	0,86
T3V3	0,238	0,90

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos para os diferentes grupos avaliados no segundo experimento, em que as amostras foram agrupadas de acordo com os parâmetros de interesse, sendo o grupo T para os parâmetros que tiveram a temperatura do bico extrusor em comum e o grupo V, para as amostras que possuíram a mesma velocidade de impressão.

Tabela 6. Experimento 2: Análise dos resultados encontrados.

Análise	Condutividade média (S/cm)	Espessura média (mm)
Grupo T1	0,238 ± 0,011	0,870 ± 0,015
Grupo T2	0,257 ± 0,009	0,893 ± 0,007
Grupo T3	0,240 ± 0,002	0,870 ± 0,015
Grupo V1	0,238 ± 0,005	0,883 ± 0,017
Grupo V2	0,240 ± 0,007	0,863 ± 0,009
Grupo V3	0,258 ± 0,011	0,887 ± 0,013

O grupo T2 (230°C) foi o que apresentou a maior média de condutividade elétrica (0,240 S/cm), enquanto que a menor média foi encontrada no Grupo T1 (0,238 S/cm). Levando-se em consideração a velocidade, o grupo com maiores valores de condutividade foi o grupo V3 (0,258 S/cm). O grupo com as amostras de menor condutividade elétrica foi o V1 (0,238 S/cm).

Por meio de testes de hipótese, utilizando a distribuição bicaudal de T de Student para diferentes variâncias, com um nível de significância de 95%, foi verificado que para as amostras agrupadas em função de T e que comparadas entre si, não provocaram alterações na condutividade elétrica estatisticamente significativas, assim como as variações na condutividade elétrica em função da variável V.

Utilizando-se de imagens obtidas por MEV (Fig. 6), foi possível verificar diferenças referentes as quantidades de vazios entre as amostras T2V3 (maior condutividade elétrica) e T1V2 (menor condutividade elétrica), sendo a ocorrência e dimensões dos vazios, uma provável causa para as variações entre as condutividades elétricas.

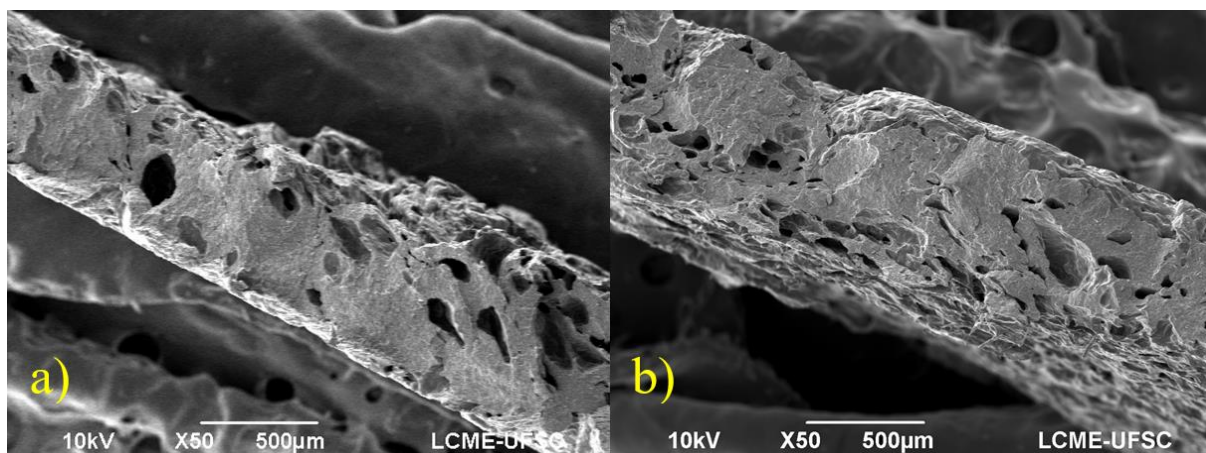


Figura 6. a) Amostra T1V2, b) Amostra T2V3.

Por meio da Fig. (7), foi possível estimar as dimensões desses vazios, sendo a distância entre as extremidades dos maiores vazios de aproximadamente 200 μm para a amostra T1V2 e aproximadamente 75 μm para a amostra T1V2. Pela Figura, também se localizou o local onde ocorreu as uniões dos cordões depositados.

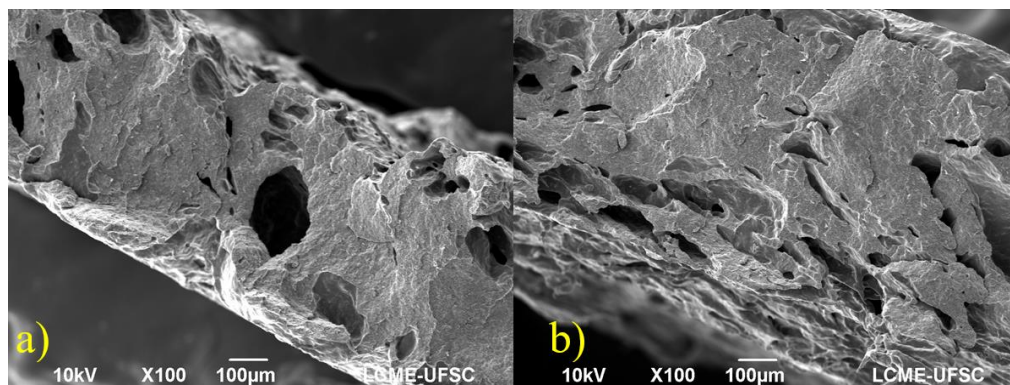


Figura 7. a) Vazios da amostra T1V2, b) Vazios da amostra T2V3.

Para o terceiro experimento, foi utilizado dos parâmetros de temperatura do bico de extrusão T2 (230°C) e velocidade de impressão de V3 (40 mm/s), devido a apresentarem os maiores valores de condutividade elétrica no experimento 2. As amostras foram fabricadas alterando-se 10°C entre cada amostra, em um intervalo entre 30°C e 100°C. Os valores utilizados para a TM são mostrados na Tab. (7)

Tabela 7. Experimento 3: Valores utilizados para a temperatura da mesa, condutividade elétrica e espessura das amostras.

Amostras	Temperatura da plataforma de construção (°C)	Condutividade elétrica (S/cm)	Espessura da amostra (mm)
TM1	30	0,221	0,92
TM2	40	0,233	0,90
TM3	50	0,271	0,88
TM4	60	0,189	0,82
TM5	70	0,200	0,91
TM6	80	0,232	1,03
TM7	90	0,299	0,93
TM8	100	0,431	0,80

De maneira geral, os valores encontrados no terceiro experimento se assemelharam aos encontrados no segundo experimento. Foi verificado que o aumento de condutividade elétrica não estava linearmente associado com o aumento da temperatura da plataforma de construção. Porém, os valores obtidos com as amostras nas temperaturas de 90°C e 100°C, foram significativamente maiores que os obtidos com qualquer outra amostra dos experimentos, estando fora de qualquer margem de erro, como o associado a reprodutibilidade do primeiro experimento (0,010 S/cm).

4. CONCLUSÃO

O emprego de diferentes temperaturas de extrusão e velocidades de impressão não resultaram em mudanças estatisticamente significativas na condutividade elétrica das amostras associadas a variações destes parâmetros. Entretanto a utilização de temperaturas da plataforma de construção mais elevadas (90°C e 100°C), ocasionaram um aumento nos valores de condutividade elétrica, sugerindo um aprofundamento da investigação em relação a influência da temperatura da mesa na condutividade elétrica, com a utilização de um maior número de amostras.

A condutividade elétrica mostrou ser influenciada pelo número e volume dos vazios no interior das amostras, sugerindo um estudo voltado as diferentes estratégias de preenchimento das amostras e seus impactos na formação dos vazios, assim como um estudo voltado para a influência da umidade do material e do ambiente na formação destes vazios.

Os experimentos mostraram que a diferentes espessuras das amostras resultaram em variações na condutividade elétrica média, mesmo para amostras produzidas com parâmetros de processamento idênticos. Com o intuito de reduzir o impacto da influência da espessura na condutividade elétrica média do experimento, aconselha-se se um estudo voltado a calibração do equipamento de extrusão de material, de maneira a reduzir o desvio padrão da espessura das amostras, assim como a utilização de um número maior de repetições e amostras nos experimentos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC por oferecer a estrutura necessária para a realização da pesquisa, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), aos colaboradores do Núcleo de Inovação em Moldagem e Manufatura Aditiva (NIMMA) e Laboratório de Polímeros e Compósitos (POLICOM) da UFSC, e ao Núcleo de Manufatura Aditiva (Nema) do IFSC, pelo auxílio e suporte técnico para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- ISO/ASTM 52900: Standard Terminology for Additive Manufacturing, 2015.
- BLACKMAGIC3D. BlackMagic 3D. 2016. Disponível em: <<http://www.blackmagic3d.com/Conductive-p/grphn-175.htm>>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- Diegel, O.; Singamneni, S.; Huang, B.; Gibson, I. Getting rid of the wires: Curved Layer Fused Deposition Modeling in Conductive Polymer Additive Manufacturing, 2011.
- Galantucci, L.M.; Bodi, I.; Kacani, J.; Lavecchia, F. Analysis of dimensional performance for a 3D open-source printer based on fused deposition modeling technique, *Procedia CIRP* 28 (2015) 82 – 87, 2014.
- Halidi, S. A. M., Abdullah, J. Moisture effects on the ABS used for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Machine, *IEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research*, 2012.
- Hossain, M. S., Ramos, J., Espalin, D., Perez, M., Wicker, R. Improving Tensile Mechanical Properties of FDM-Manufactured Specimens via Modifying Build Parameters: *International Solid Freeform Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference*. Austin, v., p. 380-392. 2013.
- Kim, E.; Shin, Y. J.; Ahn, S. H. The effects of moisture and temperature on the mechanical properties of additive manufacturing components: Fused Deposition Modeling, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22, Issue: 6, pp.887-894, doi: 10.1108/RPJ-08-2015-0095.
- Leigh, S.J.; Bradley, R.J.; Purcell, C.P.; Billson, D.R.; Hutchins, D.A. A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors, *PLoS ONE* 7(11), 2012.
- Singamneni, S.; Roychoudhury, A.; Reddy, B.A.; Diegel, O.; Huang, B. Modeling and evaluation of curved layer fused deposition, *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 27– 35, 2011.
- Peng, T. Analysis of energy utilization in 3D printing processes, *Procedia CIRP* 40 (2016) 62 – 67, 2016.
- Volpato, N.; Ahrens, C. H.; Ferreira, C. V.; Günther, P.; Carvalho, J. de; Santos, J. R. L. dos; SILVA, J. V. L. da. *Prototipagem Rápida: Tecnologia e Aplicações*. Primeira Edição. São Paulo: Blücher, 2007.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EVALUATION OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES MANUFACTURED BY EXTRUSION OF MATERIAL

Abstract: The use of polymer conductive composites in the additive manufacture by extrusion of material has been pointed out as an alternative for the manufacture of electrical circuit components. While recent research has sought a better understanding of the quality of these materials, there are few studies that analyze the impact of processing parameters on the electrical properties of the final product. This work is investigated by the extrusion process of material by an open technology printer, using a set of electrically conductive polymer composites, made of Lactic Polyacid (PLA) and graphene. A Differential Scanning Calorimetry (DSC) analysis was performed, identifying a melt temperature (T_m), a glass transition temperature (T_g) and a crystallization temperature (T_c). Three experiments were organized, the first one was composed by the manufacture of samples with the same processing conditions, the study was approved for the analysis of samples and the variation of the electrical conductivity response as a function of thickness changes. The second experiment consisted in verifying the influence of the processing parameters on the electrical conductivity, samples were manufactured using different printing speeds and extrusion temperatures. Images obtained by Scanning Electron Microscopy (SEM) made it possible to understand the way the composite was arranged. The electrical resistivity of the studied material was evaluated using the four-point method. The third experiment analyzed the influence of the use of different temperatures of the bed on the electrical conductivity. The use of different extrusion temperatures and printing speeds did not result in statistically significant changes in the electrical conductivity of the samples associated to variations of these parameters. However, with higher bed temperatures, there was an increase in the values of electrical conductivity, suggesting a new investigation about the bed temperature influence.

Keywords: Additive manufacturing, Extrusion of material, Conductive polymer composite.