

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DIELÉTRICOS PÓS PROCESSADOS EM IMPRESSORA 3D

Gilberto da Conceição Júnior¹, Luciana Brito Santos¹, Estélio da Silva Amorim¹, José Henrique Galeti¹

¹Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Três Lagoas - MS

gilberto.conceicao@ifms.edu.br, britolucianasantos@gmail.com, estelio.amorim@ifms.edu.br, jose.galeti@ifms.edu.br

Resumo

O conhecimento das características dielétricas dos materiais isolantes é essencial no desenvolvimento de equipamentos e dispositivos eletroeletrônicos. Por outro lado, as novas tecnologias de impressoras 3D tornam viável o desenvolvimento de protótipos, e, até mesmo produção em baixa escala, de produtos elétricos. Neste projeto propõem-se o levantamento da permissividade elétrica e da tensão de rigidez dielétrica de materiais após o seu processamento em uma impressora 3D. Para tanto foram produzidos, a partir da impressão 3D, corpos de prova de 1 mm com diferentes materiais. A geração das tensões bem com as medidas necessárias à obtenção da permissividade elétrica e da rigidez dielétrica foi obtida a partir da montagem de diferentes equipamentos e segundo a ABNT- NBR 5405 (Materiais isolantes sólidos - Determinação da rigidez dielétrica sob frequência industrial - Método de ensaio).

Palavras-chave: Materiais dielétricos, isolamento elétrico, Impressão 3D, protótipos para tensões elevadas.

Introdução

Apesar das impressoras 3D serem já objeto de estudos a vários anos, o conhecimento das características dielétricas dos materiais isolantes após a impressão é relativamente novo. A constante redução dos custos envolvidos no processo de impressão 3D tem viabilizado linhas de produção de pequeno volume totalmente baseados nesta tecnologia. No entanto, a questão do custo não é a única variável a ser considerada quando se trata da produção de dispositivos eletroeletrônico, a preservação de determinadas características dielétricas dos materiais plásticos, como ABS (Acrilonitrila Butadieno estireno), PLA (Ácido Polilático), PetG (Politereftalato de Etileno Glicol) e Nylon (diaminas com ácidos dicarboxílicos) é de elevada importância para a manutenção da qualidade do produto final. Contudo a preservação de características dielétricas pode ficar comprometida durante o processo de fusão por temperatura aplicada aos polímeros usados como matéria prima das impressoras 3D, e com isto comprometer a qualidade do produto impresso.

Além disto, os materiais isolantes à base de polímeros são amplamente utilizados na indústria de dispositivos elétricos e eletrônicos. O conhecimento das características dielétricas destes polímeros é de fundamental importância no projeto adequado as mais diferentes aplicações envolvendo

diferentes níveis de tensão e diferentes requisitos de segurança [1][2][3][4]. Atualmente as impressoras 3D vem substituindo os processos fabris tradicionais principalmente na confecção de protótipos e produção em baixa escala de dispositivos eletroeletrônico, contudo as características dielétricas dos diferentes materiais após o processo térmico de fusão, que também varia com os diferentes fabricantes de impressora, não é fornecida pelos mesmos [5]. Além disto, os processos de fusão por aquecimento (empregados nas impressoras 3D) alteram de forma significativa as propriedades originais dos polímeros [6][7][8]. Ressalta-se também que as ações necessárias para a caracterização dielétricas de sólidos [9][10][11][12], são objeto de estudos recentes.

Neste projeto foram medidas as permissividades elétricas e as tensões de rigidez dielétrica de materiais após o processo de fusão por temperatura empregada nas impressoras 3D.

Fundamentos teóricos

A permissividade elétrica de um dado meio é a propriedade física que relaciona a maneira como um campo elétrico interage com este meio, ou a maneira que o meio se polariza em função de um campo elétrico. A forma mais comum de levantamento pratica da permissividade elétrica é através da variação do valor da capacitância quando se substitui o material dielétrico sob teste pelo ar, ou por outro material cuja permissividade elétrica seja previamente conhecida. Em um capacitor composto de placas metálicas paralelas a capacitância será diretamente proporcional a área das placas e a permissividade elétrica absoluta, ϵ , do material (dielétrico) contido entre as placas e inversamente proporcional a distancia entre as mesmas [8][12].

A rigidez dielétrica é o campo elétrico máximo que o material pode ser submetido antes que ocorra um processo de condução (ruptura dielétrica). De forma pratica, este valor pode ser obtido aplicando-se uma tensão elétrica entre dois elétrodos onde entre eles encontra-se o material sob teste.

Dado que o material sob teste possui uma espessura conhecida, o valor da tensão em que ocorrer a ruptura dielétrica (condução entre os elétrodos) pode ser usado para o calculo do campo elétrico no material e assim levantar a rigidez dielétrica do material [6] [10].

Ensaio elétrico de ruptura dielétrica

Nesta seção, a resistência dielétrica dos materiais impressos foi testada usando-se um testador de óleo isolante (TOI), composto por um auto transformador de alta tensão, e comumente chamado de testador de tensão de ruptura dielétrica (da *General Electric*).

Inicialmente foram produzidas amostras (corpos de prova) de 50 mm por 50 mm e espessura de 1 mm com diferentes colorações, como pode ser observado na figura 1.



Figura 1. Corpo de prova 50 x 50 x 10 mm em *Acrylonitrila butadieno estireno* (ABS) nas cores preto e translúcido.

Neste trabalho, o TOI foi primeiramente calibrado [13] usando um medidor de voltagem conectado ao enrolamento primário do transformador, e um osciloscópio ligado ao enrolamento secundário (Alta Tensão) através de uma ponta de prova calibrada (Tektronix P6015A, 28 kV, 75 MHz), como mostrado na figura 2.



Figura 2. Processo de calibração usando-se o testador de rigidez dielétrica da General Electric (*Insulating Oil Dielectric Strength Tester*).

Uma vez que o TOI foi calibrado corretamente, as amostras foram colocadas no cadinho, embebidas em óleo, e os eletrodos foram aproximados de forma a pressionar o corpo de prova, como se observa na figura 2.

Na sequência, o cadinho por foi montado na saída de alta tensão do TOI, para possibilitar que os eletrodos (em contato com o corpo de prova) possam ser energizados, como se observa na figura 3.

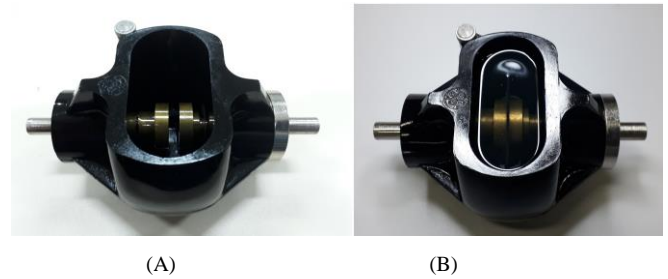


Figura 3. (A) Cadinho com eletrodo antes da colocação da amostra. (B) Cadinho com os eletrodos em contato com a amostra embebida em óleo mineral.



Figura 4. Cadinho preparado e montado no TOI (previamente calibrado) e com a tensão do primário monitorado por sistema de aquisição de sinais.

Aplicou-se tensões até 35 kV (o limite superior do TOI) em diferentes amostras. Aplicou-se um sinal senoidal de 60 Hz e amplitude crescente (figura 5) até o valor em que o material perde a sua capacidade de isolamento e conduz, passando pela amostra uma quantidade considerável de corrente elétrica, i.e. neste instante ocorre o rompimento dielétrico da amostra. Os sinais aplicados a amostra foram adquiridos por um sistema osciloscópio digital (PicoScope) e os dados convertidos para um sistema matemático gratuito (Octave) para análise detalhada do instante da ruptura dielétrica (figura 6).

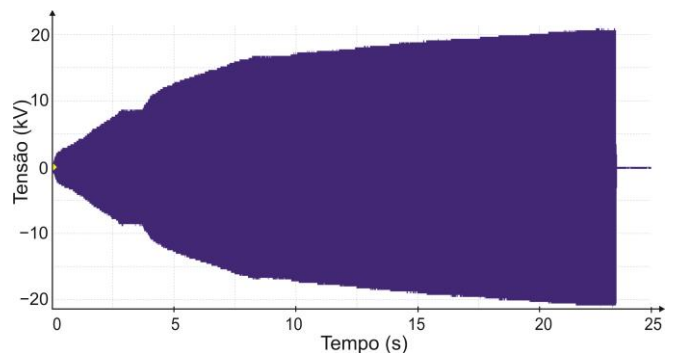


Figura 5. Tensões crescentes senoidais de 60 Hz aplicadas a amostra até o rompimento dielétrico do material, monitoradas pelo sistema de aquisição.

Dadas as limitações, intencionais, de fornecimento de corrente, à tensão nos eletrodos do TOI sofre uma brusca diminuição de amplitude, como pode ser observado por volta do instante de tempo de 23 segundos no ensaio detalhado mostrado na figura 6.

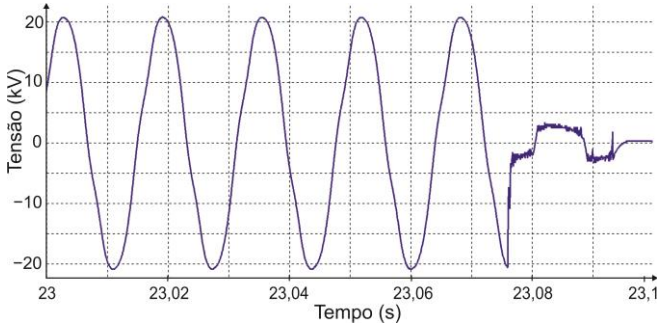


Figura 6. Tensões senoidais de 60 Hz aplicadas a amostra no instante do rompimento dielétrico do material, detalhe do sinal da figura 5 aos 23 segundos.

No instante do rompimento dielétrico, parte do polímero, de que é constituída a amostra, é transformado em carbono pelas altas temperaturas, o que cria um caminho condutor entre os eletrodos do TOI causando o aumento da corrente elétrica e conseqüente queda na tensão monitorada no ensaio (figura 6). O Material, após o ensaio, apresenta um orifício com as bordas carbonizadas, como pode ser observado nas imagens da figura 7.

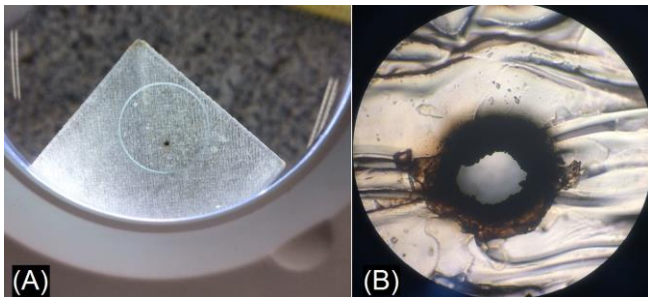


Figura 7. Tensões senoidais de 60 Hz aplicadas a amostra no instante do rompimento dielétrico do material, detalhe do sinal da figura 5 aos 23 segundos.

Os resultados apresentados foram coerentes com os apresentados por um dos fabricantes [14] para o material ABS antes da impressão. O fabricante do ABS apresentou uma rigidez dielétrica (independente da coloração) admitindo uma variação entre 20 e 25 kV/mm para o material antes de ser impresso. O resultado dos ensaios apresentaram diferentes rigidez dielétrica, em média, para os materiais ABS de pigmentação preta e translúcido, sendo que o material ABS preto a média foi 24,3 kV/mm enquanto o material translúcido foi de 20,2 kV/mm.

Ensaio da permissividade dielétrica

Nesta seção, a permissividade dielétrica dos materiais impressos foi medida usando-se um oscilador cujo período

do sinal de saída é diretamente proporcional a um determinado capacitor (componente sob teste). A permissividade dielétrica, ϵ , de um meio é uma constante física que relaciona a maneira como um campo elétrico interage com este meio, dada por:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1)$$

, onde ϵ_r é a permissividade relativa do material e ϵ_0 é a permissividade dielétrica no vácuo. Por outro lado a capacitância de um capacitor de placas paralelas é dada por:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2)$$

, onde A é a área da placa e d é a distância entre as placas que compõem o capacitor. Dado que a permissividade dielétrica no ar é muito próxima da do vácuo ($\epsilon_r = 1,0006$), a permissividade relativa do material pode ser obtida a partir de (1) e (2), sendo:

$$\epsilon_r = \frac{C_m}{C_0} \quad (3)$$

, onde C_m é a capacitância de um capacitor de placas paralelas contendo o material a ser caracterizado entre as placas metálicas, e C_0 é a capacitância do mesmo conjunto agora com ar entre as placas metálicas. De tal forma que através das medidas de capacitância seja possível a determinação da permissividade relativa do material.

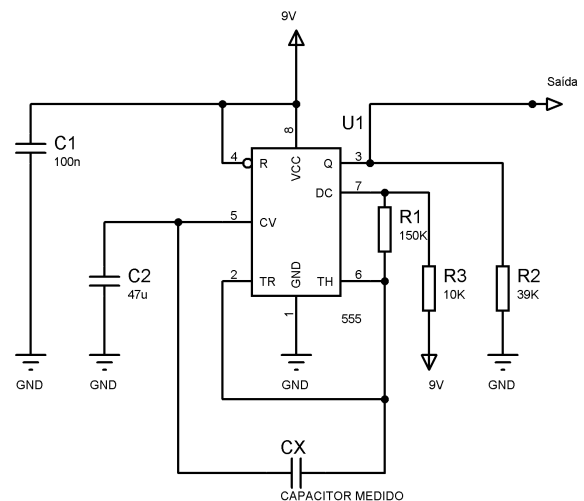


Figura 8. Circuito utilizado para as medidas da capacitância de um capacitor composto do material ABS caracterizado.

Foram realizados projeto e a montagem de um circuito oscilador de frequência variável baseado em um circuito biestável, como se observa na figura 8. Neste circuito oscilador o período é proporcional ao valor da capacitância, C_x , de tal modo que, o circuito pode ser usado para medição de indireta de capacitores através da medida direta

do período do sinal de saída do oscilador. Entretanto, dado que o circuito apresenta capacitâncias intrínsecas (parasitas) da ordem de dezenas de pF, é necessário a calibração do processo de medição para medições de capacitâncias de mesma ordem de grandeza, i.e. medições de capacitores de dezenas de pF.

A curva de calibração foi obtida a partir de 6 capacitores previamente medidos em um analisador de impedâncias HP4192. Os valores dos capacitores em pF, tomados como referência, e os períodos dos sinais de saída do circuito (figura 8) correspondentes foram registrados no gráfico da figura 9.

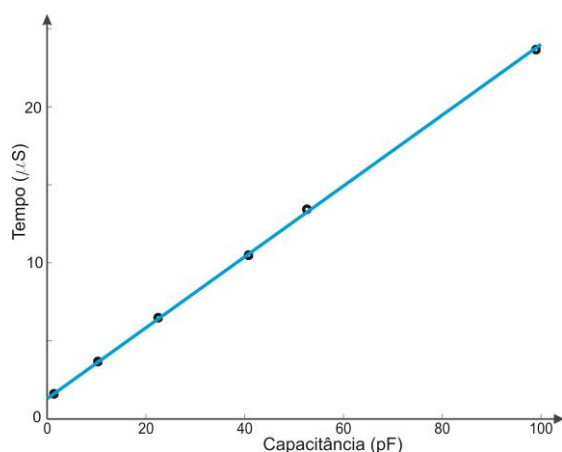


Figura 9. Curva de calibração do circuito medidor de capacitância, obtida a partir de capacitores aferidos em analisador de impedâncias calibrado.

Observa-se (Figura 9) a linearidade das medidas dos períodos em relação à capacitância, permitindo-se estabelecer uma correlação linear entre o período do sinal de saída e o valor de C_x expresso por:

$$C_x = -5,72 + 4,4T \quad (4)$$

, onde T é o período do sinal de saída do circuito (figura 8) em μ segundos e o valor de C_x é dado em pF.

A partir do circuito calibrado foram feitas as medições de capacitâncias com o material dielétrico impresso (corpo de provas) tanto na coloração preta quanto na translúcida. Os valores medidos com o material dielétrico foram comparados com o medido com o ar como dielétrico para, através da equação (3), obter-se a permissibilidade dielétrica dos materiais.

Resultados e Discussão

De acordo com os ensaios realizados, o ABS (Acrilonitrila Butadieno estireno) suporta tensões de até 20kV/mm. Sendo que as amostras de coloração preta apresentaram uma rigidez dielétrica até 20%, em média, maior que as amostras de coloração translúcida, ou seja, as amostras de coloração preta apresentaram a capacidade de suportar tensões de 24 kV/mm. Ambos os valores encontrados são coerentes com os apresentados pelo fabricante que indica como rigidez

dielétrica valores de 20 à 25 kV/mm. Apesar de pequeno o número de amostras, existem indicativos que o processo de impressão 3D (extrusão), se bem ajustado, não gera diminuição da rigidez dielétrica do material.

No entanto quanto à permissibilidade dielétrica, os ensaios apresentaram resultados inferiores aos previstos pelo fabricante do material. Enquanto o fabricante previu um ϵ_r entre 3,2 e 3,3, os ensaios apresentaram resultados entre 2,3 e 2,5. Sendo a média da permissibilidade dielétrica reativa das amostras de coloração preta de 2,36 e desvio padrão de 0,8, enquanto a média do material de coloração translúcida foi de 3,5 e o desvio padrão de 0,7.

Considerações Finais

Esses resultados são encorajadores pois permitem o levantamento de características importantes dos materiais processados por impressora 3D à serem utilizados em aplicações elétricas em diferentes classes de isolamento. De forma a garantir a operação, com segurança, e dentro das especificações dielétricas de protótipos e produtos desenvolvidos em impressoras 3D.

Apesar disto ainda seriam necessários ensaio com um número maior de cores e diferentes temperatura de extrusão (processo de impressão 3D) para que, com uma população mais abrangente de amostras, as conclusões pudessem ser usadas para relacionar parâmetros de impressão, material e coloração com as características dielétricas dos materiais impressos. De tal forma que, de posse das características do material antes da impressão e dos parâmetros de impressão as características dielétricas do material pudessem ser previstas.

Referências

- [1] Munaro M.; Akcelrud L. **Polyethylene blends: A Correlation study between morphology and environmental resistance**. Polymer Degradation and Stability, v 93, p 43-49, 2008.
- [2] Coutinho, F. M. B.; Melo I. L.; Santa Maria L. C. **Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações**. Instituto de Química. Polímeros: Ciências e tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.
- [3] J. H. Galeti, R. T. Higuti, C. Kitano and M. J. Connelly, "Polarimetric optical high-voltage sensor using synthetic-heterodyne demodulation and Hilbert transform with gain control feedback", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 23, pp. 417-423, 2017.
- [4] J. Galeti, C. Kitano and M. J. Connelly, "Improved synthetic-heterodyne Michelson interferometer vibrometer using phase and gain control feedback", Appl. Opt., vol. 54, pp. 10418-10424, 2015.
- [5] Bhushan, Bharatahd; Caspers, Matt; **An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication**, Microsystem Technologies, vol. 23, nº4, p 1117-1124, 2017.
- [6] Wasilkoski C. M. **Caracterização do polietileno de baixa densidade através da técnica de análise dinâmico-mecânica e comparação com a análise por impedância dielétrica**. Dissertação de mestrado. Curitiba, 2002.
- [7] Dissado, L. A.; Fothergill, J. C. **Electrical degradation and breakdown in polymers**, The redwood press, Wiltshire, England, 1992

- [8] Das_gupta D. K. **Polyethylene: Structure, morphology, molecular motuion and dielectric behaviour.** IEEE Electrical insulation magazine, vol. 10, n°3, p 5-15, 1994.
- [9] Wasilkoski C. M. **Caracterização do polietileno de baixa densidade através da técnica de análise dinâmico-mecânica e comparação com a análise por impedância dielétrica.** Dissertação de mestrado. Curitiba, 2002.
- [10] ABNT NBR 5405:2016 **Materiais isolantes sólidos Determinação da rigidez dielétrica sob freqüência industrial - Método de ensaio,** 2016
- [11] ABNT NBR 7559:2003 **Papel e Papelao Isolante Eletrico Determinação da rigidez dielétrica sob freqüência industrial - Método de ensaio,** 2003
- [12] ABNT NBR 1991:12133, **Líquidos isolantes elétricos Determinação de fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica),** 1991
- [13] IEC/TR-61869-3, **Instrument transformers - Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers,** IEC, Jul. 2011.
- [14] <https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/ElectricalPropertiesofPlastics.pdf> Acessado: 01/ago/2018.

CHARACTERIZATION OF POST-PROCESSED DIELECTRIC MATERIALS IN A 3D PRINTER.

Abstract— *Knowledge of the dielectric characteristics of insulating materials is essential in the development of electronic devices and components. On the other hand, new 3D printer technologies make it feasible to develop prototypes, and even low-scale production of electrical products. In this project we propose the measurement of the electrical permissivity and the voltage dielectric strength of materials after it have been proceed in a 3D printer. For this purpose, a prof body of 1 mm thickness with different materials was produced from a 3D printing. The generation of voltages and measurements required to obtain electrical permittivity and dielectric strength were obtained from the assembly of different equipment and according to ABNT-NBR 5405 (Solid insulation materials - Determination of dielectric strength under industrial frequency - Test method).*

Keywords—*Dielectric materials, electrical insulation, 3D printing, prototypes for high voltage.*

Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo 420673/2016-4) e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul (IFMS) (Processo 112-35/2017).