

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA UTILIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA TERMOCRÔMICO PARA DETECÇÃO DE FALHAS

Glaucio Costa Moraes
Marilda Munaro
Rafael Pires Machado
Vitoldo Swinka Filho

Resumo

Isoladores poliméricos tem fundamental importância no sistema elétrico, sendo responsáveis por suportar mecanicamente os cabos e isolar os materiais condutores para evitar descargas que podem causar acidentes. Falhas em isoladores podem causar interrupções no fornecimento de energia. Essas falhas, porém, são de difícil detecção, visto que os isoladores não apresentam sinais de estarem em processo de degradação avançado, sendo a falha normalmente detectável apenas quando realmente ocorre, e a interrupção no fornecimento de energia elétrica já ocorreu. Algumas técnicas são utilizadas, como ultrassom, termografia e isolômetros, porém com baixa efetividade de detecção de falhas em isoladores poliméricos. Uma técnica de maior efetividade representaria ganho significativo para as concessionárias distribuidoras. Para uma efetiva manutenção preventiva, se faz necessária a detecção prematura de eventuais falhas nos isoladores. O presente trabalho visa caracterizar materiais para o desenvolvimento de um sistema termocrômico à base de cera de parafina que seja capaz de detectar falhas prematuras em isoladores poliméricos tipo pino de linhas de distribuição de energia elétrica. Para caracterização do material, foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado por exposição à radiação ultravioleta e envelhecimento acelerado por exposição ao campo elétrico. Após os ensaios de envelhecimento, o material foi caracterizado eletricamente e físico-quimicamente. Ensaios de resistividade elétrica, polarização, despolarização e espectrometria de impedância mostraram que o material, mesmo após envelhecimento, manteve características típicas de um dielétrico. Em complemento, ensaios de espectroscopia por infravermelho, calorimetria exploratória diferencial e microscopia eletrônica de varredura mostraram que não houve degradação significativa na morfologia do material. Todos os ensaios, complementarmente, mostram que o material se apresentou como adequado para a aplicação como sensor nos isoladores poliméricos.

Palavras-chave: Isolador polimérico; Sensor de temperatura; Termocrômico; Cera de parafina.

Abstract

Polymeric insulators are of fundamental importance in the electrical system, being responsible for mechanically supporting cables and insulating conductive materials to prevent discharges that can cause accidents. Insulator failures can cause interruptions in the power supply. These failures, however, are difficult to detect, since the insulators show no signs of being in an advanced degradation process, the failure being normally detectable only when it actually occurs, and the interruption in the electricity supply has already occurred. Some techniques are used, such as ultrasound, thermography and isolometers, but with low effectiveness in detecting failures in polymeric insulators. A more effective technique would represent a significant gain for the power distribution companies. For an effective preventive maintenance, it is necessary to prematurely detect any failure in the insulators. The present work aims to characterize materials for the development of a thermochromic system based on paraffin wax that is capable of detecting premature failures in pin-type polymeric insulators of electric power distribution lines. In order to characterize the material, accelerated aging tests by exposure to ultraviolet radiation and accelerated aging by exposure to the electric field were performed. After the aging tests, the material was characterized electrically and physically-chemically. Tests of electrical resistivity, polarization, depolarization and impedance spectrometry showed that the material, even after aging, maintained typical characteristics of a dielectric. In addition, infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry and scanning electron microscopy tests showed that there was no significant degradation in the material's morphology. All tests, complementarily, show that the material presented itself as suitable for application as a sensor in polymeric insulators.

Keywords: Polymeric insulator; Temperature sensor; Thermochromic; Paraffin wax.

ARTIGO

INTRODUÇÃO

Isoladores são elementos de extrema importância em linhas de distribuição de energia elétrica, cujas principais funções são suportar esforços mecânicos e isolar os condutores submetidos a uma diferença de potencial elétrico em relação à terra ou a outro condutor, tudo isso ainda sujeitos à todo tipo de distúrbios meteorológicos [1].

No Brasil, vem sendo utilizados os isoladores poliméricos à base de polietileno de alta densidade, em gradativa substituição aos isoladores cerâmicos, de vidro e porcelana, por possuírem algumas vantagens operacionais, tais como menor peso e custo, além de serem mais adequados às redes compactas, que substituem gradativamente as redes convencionais [2].

Porém, como principal desvantagem desse isolador polimérico se deve ressaltar a dificuldade na detecção de falhas e a consequente diferenciação entre isoladores em boas condições e com defeitos operacionais no campo [3].

A perfuração de um isolador de pino provoca, em muitas situações, a interrupção do fornecimento de energia, motivada pela ocorrência de curto-circuito fase-terra no ponto do defeito, com a consequente atuação de algum dispositivo de proteção de sobrecorrente. Em algumas situações o sistema apresenta desligamento intermitente. Em ambas as situações esses desligamentos acarretam elevados custos devido à perda de receita pela interrupção do fornecimento de energia e pelo deslocamento de equipe de manutenção, entre outros fatores.

Normalmente, a perfuração do isolador ocorre no seu ponto de contato com o cabo, sem apresentar vestígios que possam ser visualizados do chão. Desse modo, a solução do problema de detecção de isoladores defeituosos torna-se cada vez mais necessária para as concessionárias de energia elétrica.

Atualmente, algumas técnicas são utilizadas na inspeção instrumental. Porém, esses equipamentos não demonstram elevada eficiência na detecção de falhas nos isoladores na rede elétrica. Técnicas óticas, como câmeras de infravermelho e ultravioleta, técnicas sonoras, como ultrassom, e técnicas elétricas, como isolômetros, são técnicas trabalhosas e de difícil aplicação, além de não

ARTIGO

apresentarem confiabilidade elevada na detecção de falhas nos isoladores.

Uma falha em um isolador detectada tardiamente pode aumentar os custos de manutenção das concessionárias distribuidoras. Porém, nenhuma técnica se mostra altamente eficiente para fácil detecção de falhas prematuras, nos isoladores em uso no campo. Por esse motivo, se faz necessário o desenvolvimento de uma forma de fazer essa detecção sem que uma eventual falha provoque um desligamento não planejado de uma linha de distribuição.

O presente trabalho visa caracterizar o material a ser utilizado no desenvolvimento de um sensor termosensível de ação irreversível, em isoladores poliméricos tipo pino, a fim de facilitar a detecção prematura das falhas ocorridas nesse tipo de isoladores.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

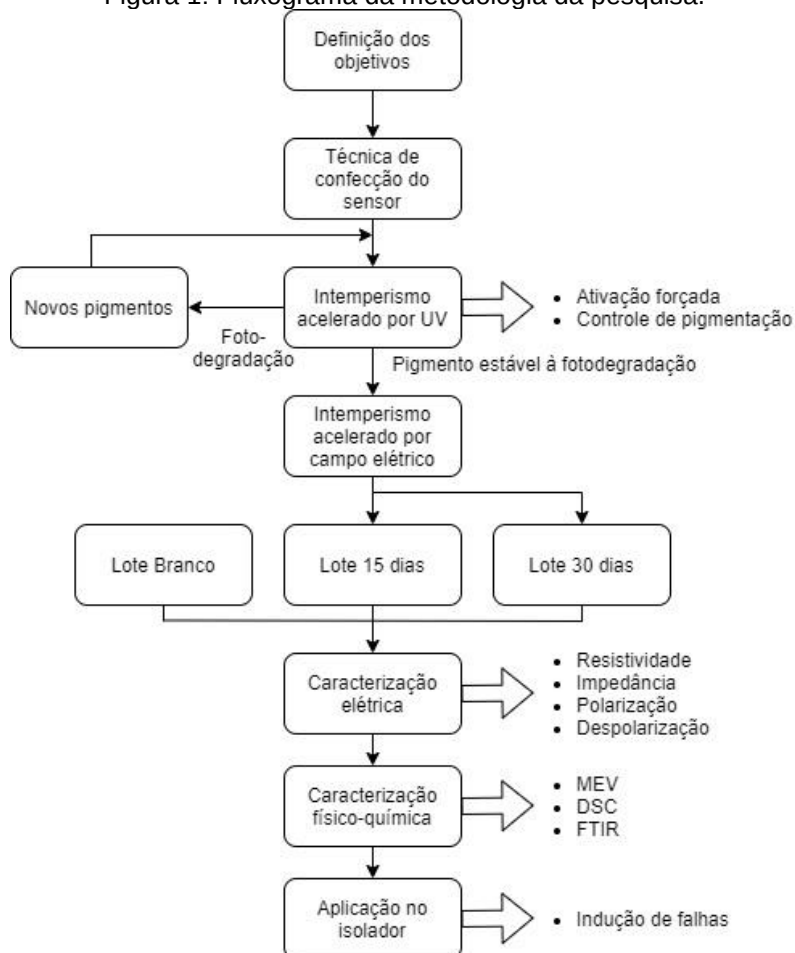
Os materiais utilizados no presente projeto estão listados na Tabela 1.

Tabela 1: Materiais utilizados no desenvolvimento do sensor termocrômico.

MATERIAL	NOME COMERCIAL
Parafina	Parafina BR 140/145°F - 1% e 2% óleo
Pigmento Laranja	43992/07 MB PO Laranja
Pigmento Magenta	44142/06 MB PO Magenta
Pigmento Violeta	Macrolex Violeta B Gran CHA 230333
Isolador Polimérico	Isolador de Pino Polimérico 15kV
Polímero	Filamento PLA 1.75mm Cinza Claro

O fluxograma da Figura 1 representa esquematicamente o passo a passo da pesquisa, explicado a seguir nesse trabalho.

Figura 1: Fluxograma da metodologia da pesquisa.



1.1 Técnica de Confecção do Sensor

A ideia de sensor desenvolvida consiste em duas camadas de parafina, sendo a inferior dopada com um pigmento colorido e a superior apenas com parafina pura. Na primeira etapa da confecção, as massas de parafina e de pigmento são verificadas em balança para a confecção da camada inferior do isolador na concentração desejada de pigmento. Após a pesagem, a parafina é aquecida ao menos a 60°C,

ARTIGO

para que toda a massa sólida passe para a fase líquida. Com a parafina líquida, o pigmento é adicionado ao sistema mantido em agitação, ainda aquecido, para que todo o pigmento se misture à parafina. Após a diluição do pigmento e cessado o aquecimento, a parafina levemente mais fria, em temperatura próxima ao ponto de fusão do material, é vertida no recipiente onde será produzido o sensor.

Após completa solidificação da primeira camada, dopada com pigmento, parafina pura é aquecida e liquefeita para, em processo similar, ser vertida para formar a camada superior do sensor.

A Figura 2 representa esquematicamente o sensor desenvolvido e a Figura 3 representa as etapas de confecção e aplicação do sensor no isolador.

Figura 2: Representação esquemática do sensor termocrômico desenvolvido.

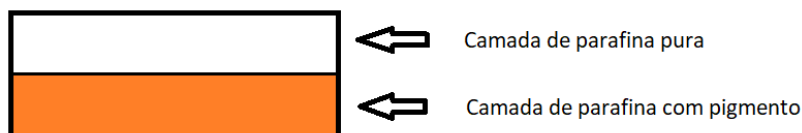
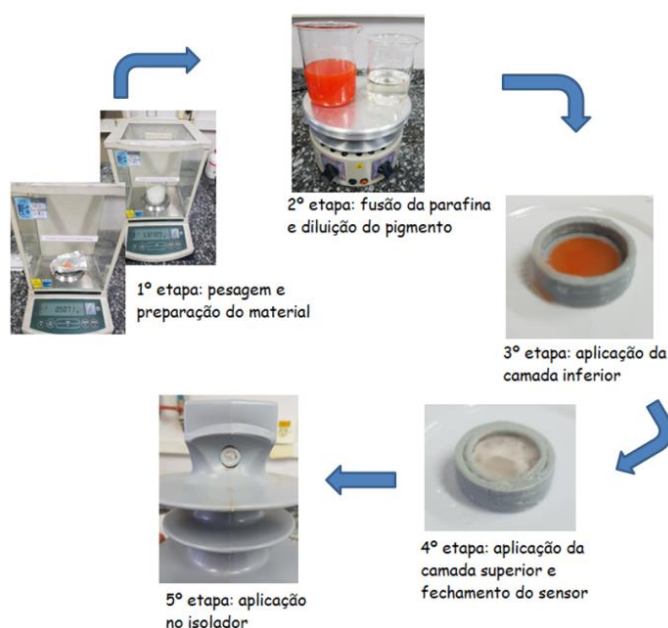


Figura 3: Representação esquemática das etapas de confecção sensor termocrômico desenvolvido e posterior aplicação no isolador.



A ativação do sensor ocorre em função da variação de temperatura do material. Com

ARTIGO

o aquecimento acima da temperatura de fusão da parafina, as duas camadas do sensor se fundem, possibilitando uma mudança de coloração do sensor.

1.2 Intemperismo acelerado por radiação ultravioleta (UV)

A exposição à radiação ultravioleta, característica inerente aos isoladores utilizados em ambiente externo, poderia dar início ao processo de fotodegradação, que pode provocar a degradação dos materiais, reduzindo a efetividade da mudança de coloração e, conseqüentemente, a efetividade do sensor na detecção de falhas [4]. Para avaliação do comportamento do sensor mediante exposição à radiação ultravioleta, foi avaliada somente a camada inferior do sensor, visto que é essa a camada que possui o pigmento colorido incorporado à parafina, mais susceptível ao processo de fotodegradação do que a parafina pura da camada superior do sensor. Amostras da camada inferior foram confeccionadas em recipientes maiores do que o recipiente do sensor, conforme ilustra a Figura 4, com o objetivo de aumentar a área superficial do material exposta à radiação ultravioleta. Três diferentes pigmentos foram utilizados para serem comparados nesse processo.

Esse processo de intemperismo acelerado se deu pela exposição contínua do material à radiação ultravioleta, com utilização de uma câmara cilíndrica com 20 centímetros de diâmetro, em tubo opaco, e uma lâmpada com 300W de potência, fabricante Osram, modelo Ultra-Vitalux, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4: Câmara utilizada no intemperismo acelerado por UV.



Para avaliação do desempenho dos materiais mediante exposição à radiação ultravioleta, foram feitas medições periódicas da coloração dos pigmentos utilizando um colorímetro, fabricante Instrutherm e modelo ACR-1023, que utiliza um sensor externo de geometria de medição de cor de $45^\circ/0^\circ$, e utiliza a escala RGB (red-green-blue) como parâmetro de medição.

O objetivo definido do ensaio foi de 3000 horas de exposição à radiação ultravioleta, valor estimado aos correspondentes 15 anos de vida útil, sendo este o tempo de vida médio para o isolador polimérico [6].

1.3 Intemperismo acelerado por campo elétrico

Seguidamente, amostras adicionais do sensor, com as duas camadas e também com cada camada separadamente, foram submetidas a um processo de envelhecimento elétrico acelerado em função do aumento da frequência do campo elétrico.

O envelhecimento acelerado por campo elétrico tem por objetivo submeter o sensor, em um tempo reduzido, a um estresse aproximado do real ocorrido em uso e ao longo da vida útil do isolador. Dessa forma, estima-se condição similar à real, com campo elétrico de valores aproximados e aumento da frequência do campo, para que se alcance o envelhecimento acelerado do sensor [5]. A Tabela 2 representa os valores de frequência e os tempos de envelhecimento utilizados em cada lote.

ARTIGO

Segundo Toledo et al. [6], um isolador polimérico possui vida útil estimada em aproximadamente 15 anos, dependendo das condições de uso. Desse modo, foram definidas 2 etapas do envelhecimento acelerado, induzindo cenários que representem 8 e 16 anos de exposição do sensor.

Tabela 2: Dados de frequência utilizados no envelhecimento elétrico acelerado.

FREQUÊNCIA NORMAL (HZ)	FREQUÊNCIA DE ENVELHECIMENTO (HZ)
60	12000
DIAS DE ENSAIO LOTE 1	DIAS DE ENSAIO LOTE 2
15	30
DIAS EQUIVALENTES	
3000	6000
ANOS EQUIVALENTES	
8,22	16,44

Para a realização do envelhecimento elétrico acelerado, foram utilizados um amplificador de alta tensão Trek modelo 20/20C estimulado por um gerador de função Agilent 33210A, sendo monitorado por um osciloscópio digital Tektronix TPS2024. Para o envelhecimento elétrico e posterior caracterização dos materiais, foram preparados 3 lotes de amostras, sendo 1 lote para envelhecimento de 15 dias, outra para 30 dias, e o terceiro para caracterização sem envelhecimento, sendo cada lote constituído das seguintes amostras:

- 1 amostra de parafina pura, representando a camada superior do sensor. Além disso, esse material representa o comportamento da base utilizada para a montagem do sensor;
- 1 amostra de parafina com diluição do pigmento para ocorrência do efeito termocrômico, na concentração de 0,3%, representando a camada inferior do sensor. Esse material representa as mudanças devido ao acréscimo do pigmento na base;
- 1 amostra representando o sensor completo, com a camada inferior de parafina com pigmento, na concentração de 0,3%, e a camada superior de parafina pura. Como é formada uma interface entre a camada de

ARTIGO

parafina e a camada com pigmento, os efeitos de interface poderiam gerar diferente comportamento para a amostra.

Essas amostras foram confeccionadas pela mesma metodologia descrita no item 2.1.

1.4 Resistividade superficial e volumétrica

Todas as amostras confeccionadas foram avaliadas por tensão contínua pelo método da resistividade superficial e volumétrica, sendo utilizada a norma técnica ASTM D 257 [7]. Para isso foi utilizado o equipamento modelo 4339B, fabricante Agilent.

Conforme preconizado na norma ASTM D 257 [7], as condições de laboratório foram fixadas na temperatura ambiente de 23°C e umidade relativa não maior que 75%. Para avaliação elétrica foi utilizada uma média de 256 pontos, medidos no intervalo de 1 minuto, após o atraso de 10 segundos, para não contabilizar o primeiro impulso de resposta da corrente de absorção. Após isso, o equipamento utiliza um algoritmo interno para medida da resistividade, utilizando parâmetros geométricos os quais foram medidos com um paquímetro digital Digitech e programados no equipamento.

1.5 Espectrometria por Impedância

Para avaliação da espectrometria por impedância foi seguida a norma técnica ASTM D 150 [8], sendo utilizado um analisador de impedância modelo SI 1260 e uma interface dielétrica modelo 1296, ambos do fabricante Solartron.

Esse ensaio foi realizado sob todas as amostras nas mesmas condições laboratoriais descritas no item 2.4. Além disso, foi utilizado um sinal de 5 V para estímulo da amostra e faixa de frequência de 1 MHz a 1 Hz.

1.6 Polarização e Despolarização

Sob as mesmas condições laboratoriais descritas no item 2.4, para todas as amostras foram realizados os ensaios de corrente elétrica de polarização e despolarização, tendo sido utilizadas uma fonte de tensão HP 6521A e um eletrômetro Keithley 617,

ARTIGO

além de um dispositivo para conexão desses às amostras analisadas. As curvas de polarização e despolarização foram construídas sequencialmente, ambas com 600 segundos de ensaio, sendo cada amostra colocada em curto circuito por iguais 600 segundos antes da realização dos ensaios.

1.7 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

Esse ensaio foi realizado seguindo a norma técnica ASTM D 3418 [9], visando identificar, comparativamente, eventuais variações no ponto de fusão do material antes e após o envelhecimento. Foi utilizado equipamento do fabricante Netzsch, modelo DSC 204 F1, com atmosfera inerte de nitrogênio, taxa de aquecimento de 10 °C/minuto, faixa de temperatura de 0 a 120 °C, tendo sido realizadas 3 varreduras com coletas de 10 pontos/°C.

1.8 Espectroscopia por Infravermelho (FTIR)

Esse ensaio foi realizado seguindo a norma técnica ASTM E 1252 [10], visando detectar eventuais resíduos de degradação do material após o envelhecimento elétrico acelerado. Foi utilizado o equipamento do fabricante Bruker, modelo Lumos, tendo sido utilizada a técnica ATR, com 6 pontos diferentes de varredura, do interior até a superfície da amostra.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1 Intemperismo acelerado por radiação ultravioleta

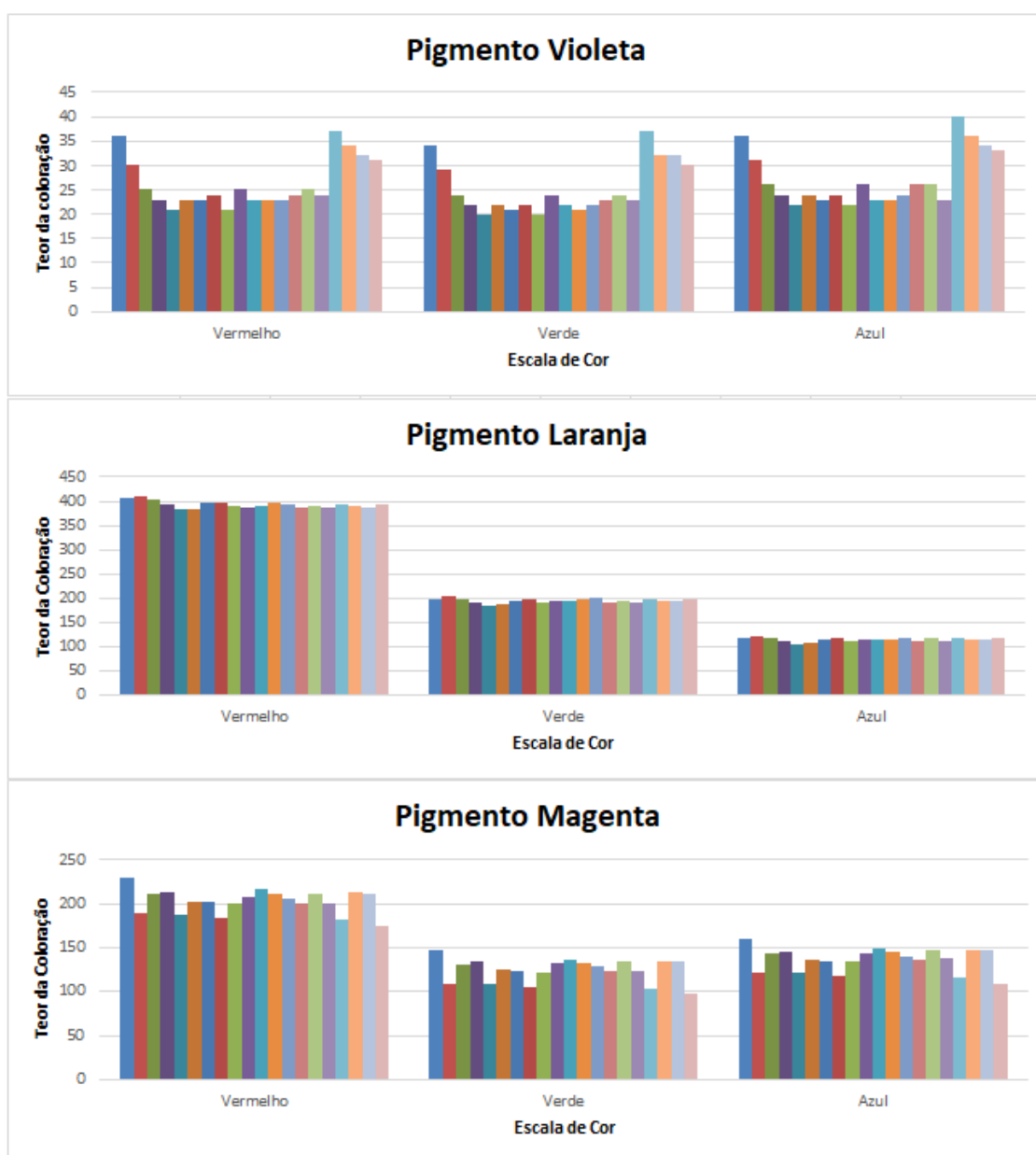
ARTIGO

O intemperismo acelerado por radiação ultravioleta foi realizado para avaliar o comportamento dos diferentes pigmentos mediante exposição à radiação ultravioleta, caracterizando o pigmento como estável ou não a fotodegradação [11].

As amostras foram semanalmente avaliadas com o uso de um colorímetro que utiliza a escala RGB (red-green-blue) de avaliação das cores.

A Figura 5 mostra a variação dos resultados dos três pigmentos na escala RGB ao longo do tempo de exposição dos pigmentos à radiação ultravioleta. Para cada pigmento, são apresentados três gráficos de barras (um gráfico para cada cor, conforme legenda), sendo cada barra a representação do valor obtido em cada análise, realizadas a cada 168 horas, aproximadamente. Dessa forma, cada conjunto de barras apresenta vinte valores, evoluindo cronologicamente da esquerda (Amostragem 1) para a direita (Amostragem 20). A variação desse resultado já era esperada devido à variação da condição ambiental no dia de cada medição. Porém, essa variação deve ser o menor quanto possível, representando uma estabilidade do pigmento.

Figura 5: Avaliação da degradação dos pigmentos em exposição ultravioleta na escala de cores RGB.



Avaliando os resultados da Figura 5, pode-se afirmar que dentre os três pigmentos avaliados, os pigmentos violeta e magenta apresentaram variações maiores na coloração ao longo das medidas, sendo mais instáveis quando comparados ao pigmento laranja. O pigmento laranja se mostrou estável à fotodegradação em relação aos demais pigmentos, não tendo apresentado variações significativas de coloração.

ARTIGO

3.2 Resistividade superficial e volumétrica

As tabelas 3 e 4 representam os resultados de resistividade superficial e volumétrica.

Tabela 3: Resistividade superficial das amostras

TEMPO DE ENVELHECIMENTO	RESISTIVIDADE SUPERFICIAL ($\Omega \cdot \text{CM}$)		
	PARAFINA PURA	0,3% PURO	0,3% COMPLETO
0	$7,1 \cdot 10^{17}$	$8,3 \cdot 10^{14}$	$6,9 \cdot 10^{14}$
15 dias	$9,0 \cdot 10^{17}$	$5,9 \cdot 10^{17}$	$5,5 \cdot 10^{17}$
30 dias	$2,3 \cdot 10^{17}$	$3,6 \cdot 10^{17}$	$7,7 \cdot 10^{17}$

Tabela 4: Resistividade volumétrica das amostras

TEMPO DE ENVELHECIMENTO	RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA (Ω)		
	PARAFINA PURA	0,3% PURO	0,3% COMPLETO
0	$2,4 \cdot 10^{16}$	$5,0 \cdot 10^{17}$	$3,4 \cdot 10^{15}$
15 dias	$8,5 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{17}$	$6,5 \cdot 10^{16}$
30 dias	$1,8 \cdot 10^{17}$	$5,8 \cdot 10^{16}$	$1,0 \cdot 10^{17}$

Avaliando as tabelas, pode-se observar comparativamente que as amostras não apresentaram variação significativa nas resistividades superficial e volumétrica em função do envelhecimento elétrico acelerado e da presença do pigmento. Independente do tempo de envelhecimento, as amostras apresentam valores de resistividade dentro do que é esperado para um material dielétrico, mostrando que o

material não foi impactado significativamente pelo envelhecimento dielétrico, implicando numa alta durabilidade desta propriedade.

3.3 Espectrometria de Impedância

Os ensaios de espectrometria de impedância foram realizados com o intuito de avaliar, no domínio da frequência, a possível formação de mecanismos de polarização no material.

As Figuras 6 a 8 mostram graficamente os resultados em função da capacitância real e imaginária.

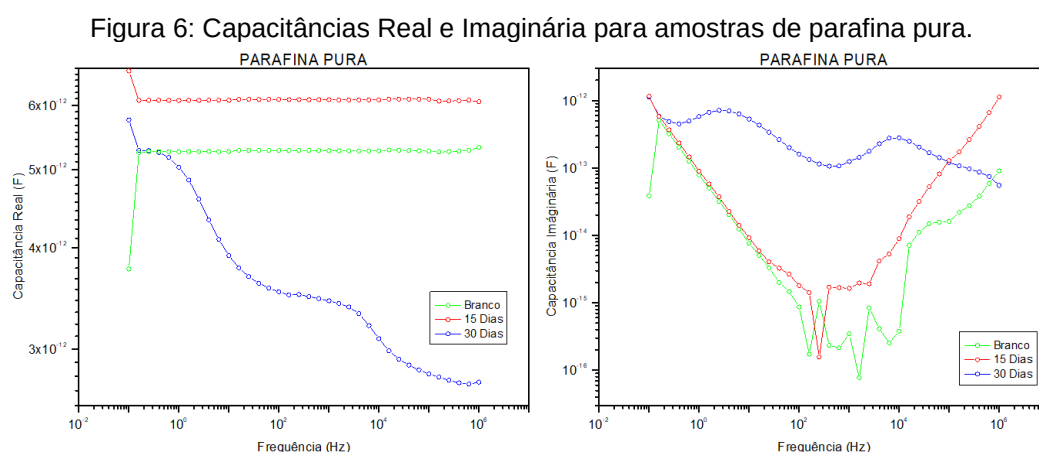


Figura 7: Capacitâncias Real e Imaginária para amostras de pigmento 0,3% puro.

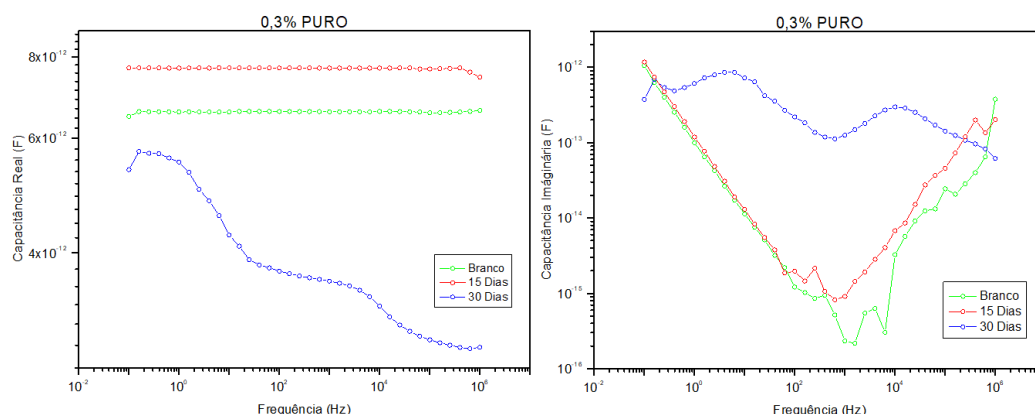
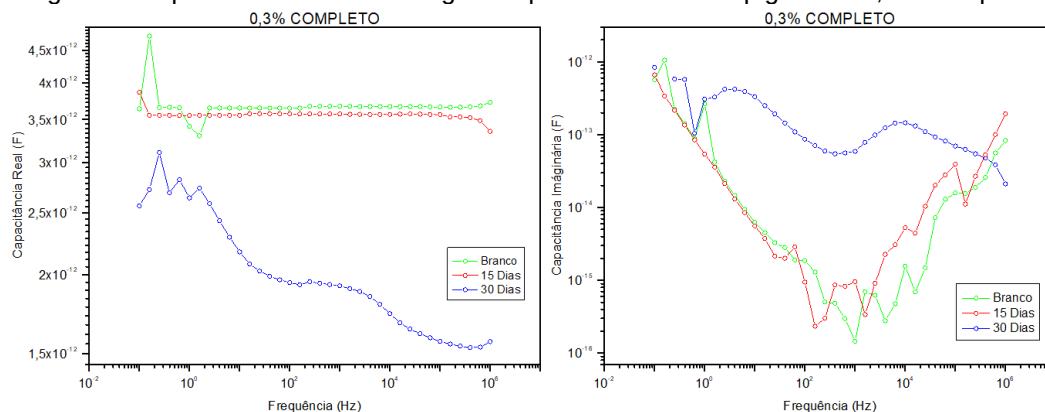


Figura 8: Capacitâncias Real e Imaginária para amostras de pigmento 0,3% completo.



Avaliando os resultados, pode-se observar a presença da componente de armazenamento e da componente de perdas nas amostras com maior tempo de envelhecimento elétrico acelerado. Esse comportamento mostra a ocorrência de cargas espaciais (frequência em torno de 102 Hz) e dipolo elétrico (frequência em torno de 104 Hz). As Figuras 6 e 7 representam amostras com camada única e a Figura 8 representa amostras com duas camadas de parafina. Essa diferença entre as amostras, com resultados similares, indica que a presença de uma interface entre as camadas do sistema não interfere na formação de diferentes mecanismos de relaxação. Esses resultados mostram que o material foi impactado pelo envelhecimento elétrico com a formação de mecanismos de polarização apenas nas amostras com envelhecimento extremo, compatível com o que se pode esperar do sensor quando em uso, próximo do fim da vida útil dos isoladores.

3.4 Polarização e Despolarização

Complementando a caracterização dielétrica, ensaios de polarização e despolarização foram realizados com o intuito de avaliar, no domínio do tempo, a possível formação de mecanismos de polarização no material. As Figuras 9 a 11 mostram esses resultados.

Figura 9: Polarização e Despolarização para amostra de parafina pura.

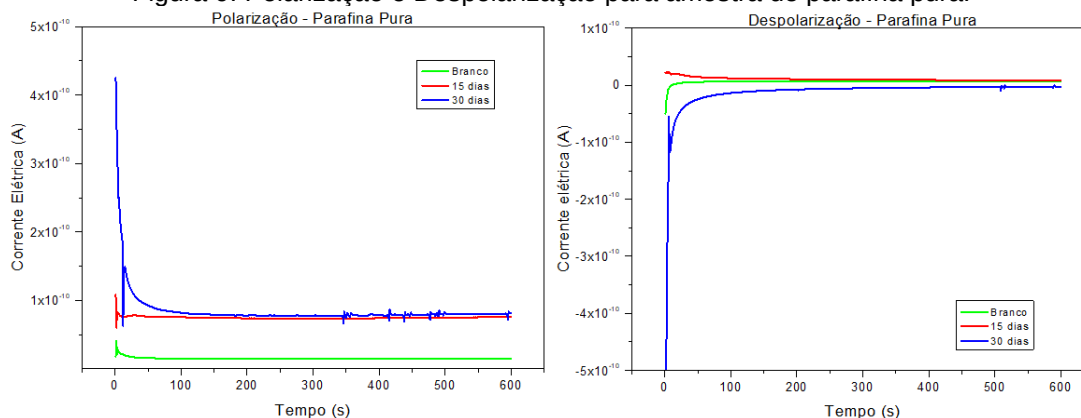


Figura 10: Polarização e Despolarização para amostra de pigmento 0,3% puro.

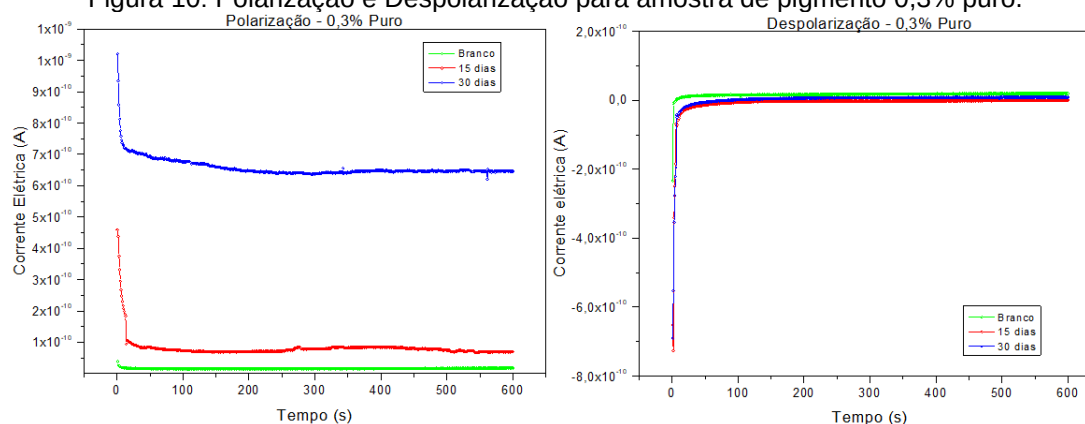
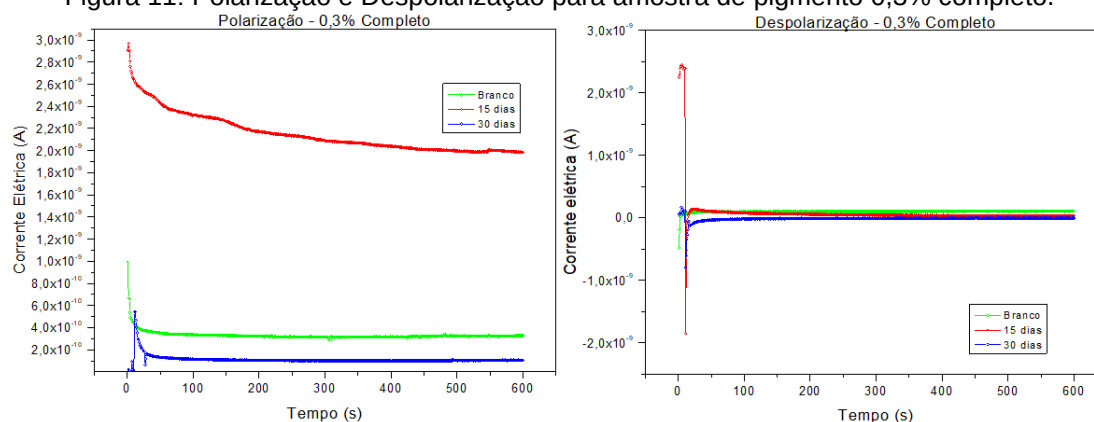


Figura 11: Polarização e Despolarização para amostra de pigmento 0,3% completo.



Avaliando os resultados, pode-se perceber que os fenômenos de polarização ocorrem, principalmente nas amostras com algum grau de envelhecimento, porém são totalmente eliminados quando o ensaio de despolarização se realiza. Além disso, pode-se perceber na Figura 11, que mesmo na presença de uma interface entre as duas camadas de parafina, não se observam fenômenos de polarização e despolarização diferentes dos mostrados nas amostras sem interface.

3.5 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Iniciando a caracterização físico-química, o ensaio de DSC foi realizado para monitorar eventual alteração no ponto de fusão do material mediante processo de envelhecimento elétrico.

A Figura 12 mostra graficamente a variação do ponto de fusão das amostras em função do envelhecimento elétrico. Já a Tabela 5 mostra numericamente esses valores, possibilitando uma avaliação detalhada dos resultados. Todos os valores do ponto de fusão representados são das amostras na terceira varredura no DSC, o que representa a curva do segundo aquecimento. Na caracterização físico-química não foram avaliadas as amostras do sensor completo, por serem os ensaios destrutivos ao material, não havendo influência da presença ou não da interface.

Figura 12: Curvas do segundo aquecimento para as amostras de parafina pura e parafina com 0,3% de pigmento. Neste gráfico, a amostra (Branco) representa a amostra sem envelhecimento.

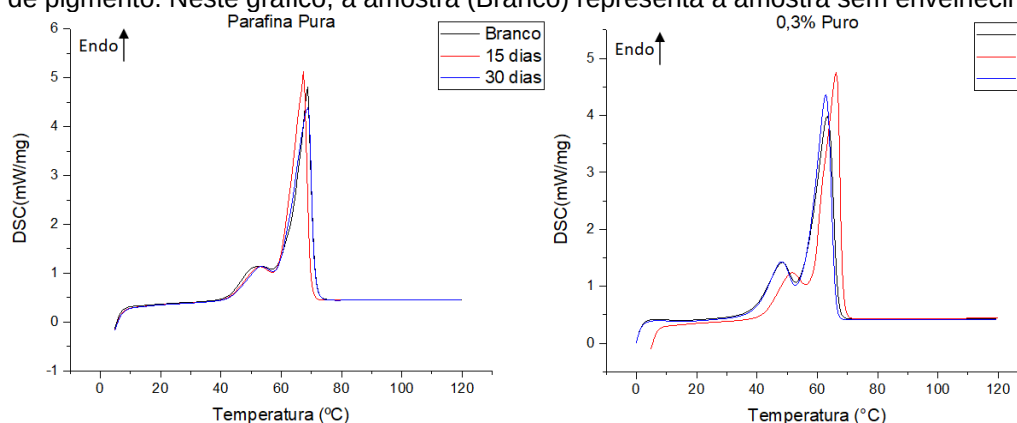


Tabela 5: Temperatura de fusão das amostras na curva de segundo aquecimento no DSC.

TEMPERATURA DE FUSÃO (°C)	PARAFINA PURA	0,3% PURO
Branco	65,4	66,2
15 dias	67,9	66,2
30 dias	67,1	65,1

Avaliando os gráficos e a tabela, pode-se perceber que não houve variação significativa do ponto de fusão do material comparativamente entre as amostras antes e depois do envelhecimento elétrico acelerado.

3.6 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

Complementando a caracterização físico-química, a Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) avalia eventuais resíduos de degradação que possam ter se formado nas amostras após o processo de envelhecimento elétrico acelerado.

As Figuras 13 e 14 ilustram esses resultados. Para essas análises, foi utilizado, para

ARTIGO

efeito comparativo, a parafina antes de qualquer tratamento térmico (Amostra Padrão). Isso foi feito para identificar eventuais alterações devido ao processo de confecção das amostras, tais como oxidação ou outra cisão de cadeia.

Figura 13: FTIR para amostra de parafina pura. Neste gráfico, a amostra (Branco) representa a amostra sem envelhecimento. O gráfico da direita é apenas uma ampliação na faixa de 1800 a 1600 cm^{-1} , região onde ocorrem quebra de dupla ligação ou formação de oxidação.

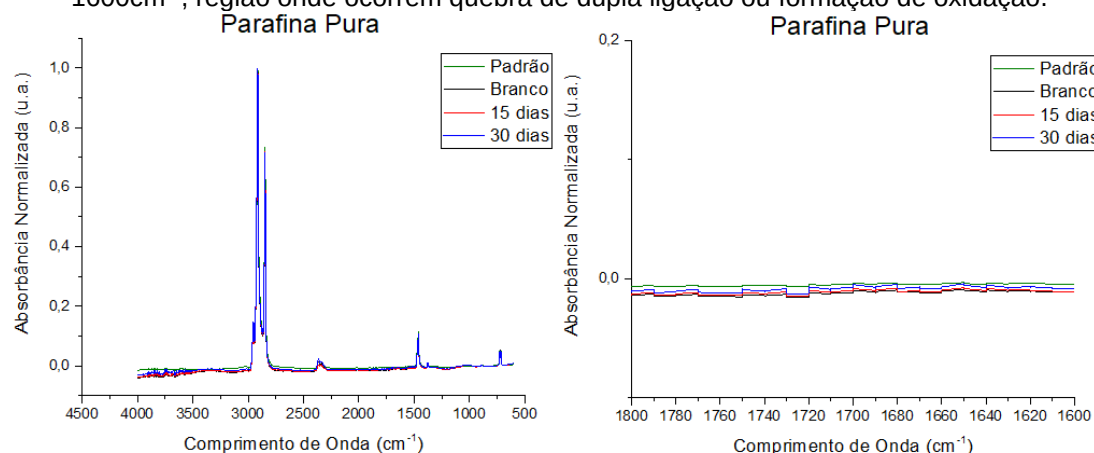
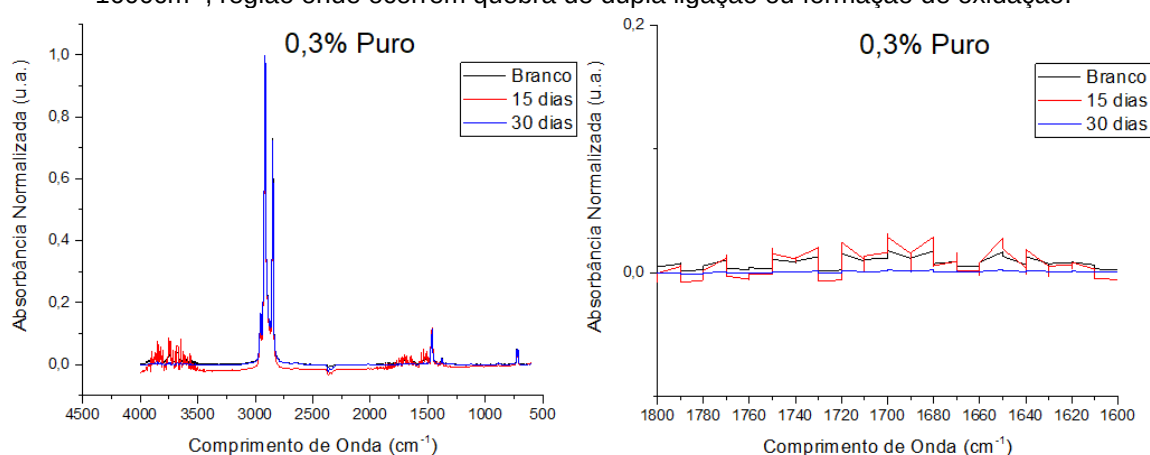


Figura 14: FTIR para amostra de pigmento 0,3% puro. Neste gráfico, a amostra (Branco) representa a amostra sem envelhecimento. O gráfico da direita é apenas uma ampliação na faixa de 1800 a 1600 cm^{-1} , região onde ocorrem quebra de dupla ligação ou formação de oxidação.



Avaliando os resultados de FTIR, com os gráficos à esquerda representando todo o espectro de comprimentos de onda e os gráficos à direita representando o

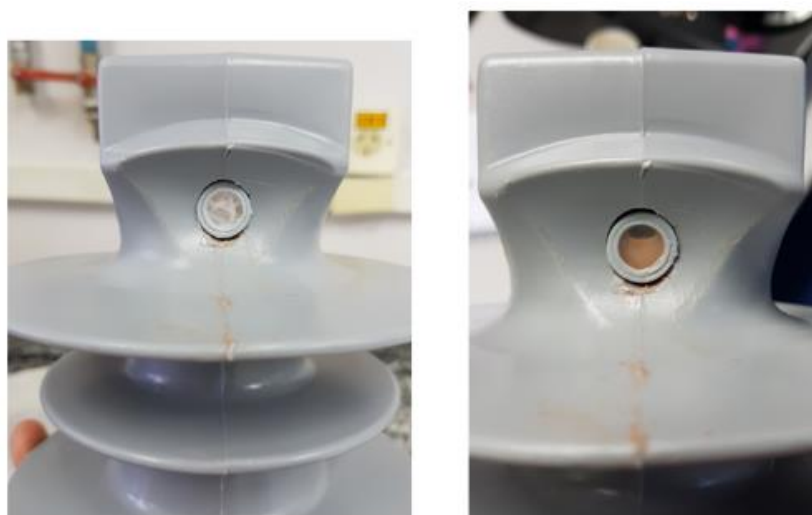
ARTIGO

intervalo específico de comprimento de onda em que deveriam aparecer bandas de insaturações $C=C$ e $C=O$, pode-se perceber que esses possíveis resíduos de degradação do material não se mostram presentes, o que evidencia que não houve degradação significativa do material mesmo após o envelhecimento elétrico acelerado.

3.7 Aplicação no isolador com ativação em estufa

Para encerramento das análises, foram feitos três ensaios de avaliação do processo de ativação do sensor em estufa, com o objetivo de visualizar a mudança de coloração e avaliar a efetividade dessa mudança como ferramenta de visualização do sensor ativado em uso nos isoladores. A Figura 15 mostra o antes e depois da ativação do sensor em estufa. Nota-se mudança de coloração no antes e depois da ativação em estufa, corroborando o proposto inicialmente e mostrando o material com capacidade de proporcionar mudança de coloração visualmente efetiva.

Figura 15: Antes (esquerda) e depois (direita) de aplicação do sensor no isolador com ativação em estufa.



CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foi apresentado um elemento sensor irreversível visando o uso em isoladores de distribuição poliméricos. Esse elemento foi caracterizado por medidas elétricas, térmicas e analíticas, demonstrando a sua funcionalidade.

No processo de envelhecimento dos pigmentos por exposição à radiação ultravioleta, constatou-se que o pigmento laranja se mostrou estável ao longo do tempo de ensaio, não tendo apresentado degradação fotoquímica, sendo definido como um pigmento capaz de suportar o uso no sensor desenvolvido.

Nos ensaios de caracterização dielétrica do material, não foram observados nos resultados dados que possam impedir a utilização do material como aplicável ao sensor, bem como nos ensaios de caracterização físico-química.

Por fim, uma proposta de montagem no isolador deste elemento sensor é apresentada.

REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, R.F. *Trilhamento elétrico sobre materiais poliméricos pela análise da energia absorvida devido as descargas elétricas superficiais*. Tese de D.Sc., PIPE/UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2014.
- [2] MARTINS, R.; SWINKA, V. "Development of a Thermochromic Polymer Insulator". *IEEE Latin America Transactions*, v. 16, n. 3, pp. 813–818, mar. 2018.
https://www.researchgate.net/publication/325133485_Development_of_a_Thermochromic_Polymer_Insulator
- [3] GUBANSKI, S.M.; DERNFALK, A.; ANDERSSON, J. HILLBORG, H. "Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. V.14, n.5, p.1065-1080, out. 2007.
- [4] WANG, S.; WANG, Z; HAO, C.; PEIJNENBURG, W.J.G.M. "A DFT/TDDFT study on the mechanisms of direct and indirect photodegradation of tetrabromobisphenol A in water". *Chemosphere*, v. 220, p. 40–46, 2019.

ARTIGO

[5] LEGUENZA, E.L. *Comportamento dielétrico, viscoelástico e físico-químico do polietileno reticulado envelhecido sob condições aceleradas de múltiplo estresse*. Tese de D.Sc., Programa de pós-graduação em Física – USP. São Carlos, SP, Brasil, 2003.

[6] TOLEDO, L.G.; OLIVEIRA JR., J.B.; MARTINS, A.J.A.L.; SILVA, M.E.S.R.; FREITAS, R.F.S.; SOUSA, R.G. “Estudo do comportamento térmico de isoladores poliméricos utilizados em linhas de alta tensão por meio de TG e DSC”. In: 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2009.

[7] ASTM – American Society for Testing Materials. “ASTM D257-14 - Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials”. In: Annual Book of ASTM Standards, 2014.

[8] ASTM – American Society for Testing Materials. “ASTM D150-18 - Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation”. In: Annual Book of ASTM Standards, 2018.

[9] ASTM – American Society for Testing Materials. “ASTM D3418-15 - Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry”. In: Annual Book of ASTM Standards, 2015.

[10] ASTM – American Society for Testing Materials. “ASTM D1252-98 - Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis”. In: Annual Book of ASTM Standards, 2013.

[11] VIG, A.S.; GUPTA, A.; PANDEY, O.P. “Efficient photodegradation of methylene blue (MB) under solar radiation by ZrC nanoparticles”. *Advanced Powder Technology*, v.29, p.2231-2242, sep.2018.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Abril 30, 2023; Aceito/Accepted: Agosto 29, 2023]