

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

GLAUCIO COSTA MORAES

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA UTILIZAÇÃO NO
DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA TERMOCRÔMICO PARA
DETECÇÃO DE FALHAS EM ISOLADORES POLIMÉRICOS DO TIPO
PINO**

Curitiba

2020

GLAUCIO COSTA MORAES

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA UTILIZAÇÃO NO
DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA TERMOCRÔMICO PARA
DETECÇÃO DE FALHAS EM ISOLADORES POLIMÉRICOS DO TIPO
PINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Tecnologia em Materiais, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof. Dra. Marilda Munaro

Coorientador: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

Coorientador: Prof. Me. Rafael Pires Machado

Curitiba

2020

M827c Moraes, Glaucio Costa.
Caracterização de materiais para utilização no desenvolvimento de sistema termocrômico para detecção de falhas em isoladores poliméricos do tipo pino / Glaucio Costa Moraes.
97 p. il. ; 30 cm.

Orientador: Profa. Dra. Marilda Munaro

Co-orientador: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

Co-orientador: Prof. Me. Rafael Pires Machado

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Institutos Lactec – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, 2020. Inclui Referências bibliográficas.

1. Isolador polimérico. 2. Sensor de temperatura. 3. Termocrômico. 4. Cera de parafina. I. Munaro, Marilda. II. Swinka Filho, Vitoldo. III. Machado Rafael Pires. IV. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Institutos Lactec – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia. III. Título.

CDD 621.31937

TERMO DE APROVAÇÃO

GLAUCIO COSTA MORAES

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA UTILIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA TERMOCRÔMICO PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM ISOLADORES POLIMÉRICOS DO TIPO PINO

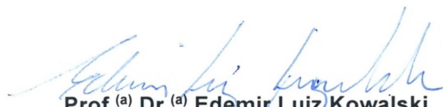
Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:



ORIENTADOR(A): Prof.^(a) Dr.^(a) Marilda Munaro
Mestrado Profissional em Desenvolvimento de Tecnologia do LACTEC



Prof.^(a) Dr.^(a) Lúcio de Medeiros
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



Prof.^(a) Dr.^(a) Edemir Luiz Kowalski
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



Prof.^(a) Dr.^(a) Isabel Romero Grova Wutkiewicz
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 30 de janeiro de 2020.

Dedico esse trabalho a Deus e a todos aqueles que de alguma forma
contribuíram para que ele se tornasse realidade.

“A vida começa todos os dias.”

Érico Veríssimo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e por todas as oportunidades a mim concedidas.

À minha esposa, Suellen, pelo apoio incondicional e incentivo em todos os momentos, independente das dificuldades encontradas.

Aos meus pais, Célia e Clóvis, por todo apoio e confiança ao longo do tempo.

À minha irmã, Thalita, pela amizade e apoio irrestrito.

À professora Marilda Munaro, pela orientação e pelos conselhos durante todo o processo.

Ao professor Rafael Pires Machado, pelas conversas, orientação, apoio e pelos diversos ensinamentos ao longo dos dois anos de curso.

Ao professor Vitoldo Swinka Filho, pelas dicas pontuais e precisas ao longo da confecção do trabalho.

Ao Lactec, pelo espaço e pelos equipamentos utilizados durante a realização dos experimentos.

Aos colegas da turma 13, pelo apoio e por todos os momentos de descontração durante as aulas e o processo de pesquisa e confecção desta dissertação.

A todos os pesquisadores, estagiários e bolsistas do Lactec que colaboraram, diretamente ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

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.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Isolador polimérico tipo pino	18
FIGURA 2 – Representação esquemática de descarga parcial interna (a), descarga parcial superficial (b) e Efeito Corona (c).	20
FIGURA 3 – Estrutura molecular e comportamento termocrômico da lactona de violeta cristal.....	27
FIGURA 4 – Polimerização esquemática do polietileno	28
FIGURA 5 – Classificação das ceras.	29
FIGURA 6 – Etapa de iniciação do processo de auto-oxidação.....	31
FIGURA 7 – Etapa de propagação do processo de auto-oxidação.....	31
FIGURA 8 – Etapa de terminação do processo de auto-oxidação.....	31
FIGURA 9 – Materiais condutores (a) e isolantes (b).	32
FIGURA 10 – Cargas em equilíbrio na ausência de campo elétrico (a) e polarização na presença de campo elétrico (b).	33
FIGURA 11 – Representação das diferentes correntes elétricas presentes em um material dielétrico exposto a uma tensão dc.	37
FIGURA 12 – Representação das diferentes correntes elétricas presentes em um material dielétrico exposto a uma tensão dc.	38
FIGURA 13 – Representação dos mecanismos de polarização em função da frequência do campo elétrico.	40
FIGURA 14 – Fluxograma da metodologia da pesquisa.	42
FIGURA 15 – Representação esquemática do sensor termocrômico desenvolvido.	43
FIGURA 16 – Impressora utilizada na confecção do recipiente do sensor.	43
FIGURA 17 – Recipiente utilizado para confecção do sensor.....	44
FIGURA 18 – Representação esquemática das etapas de confecção sensor termocrômico desenvolvido.....	44
FIGURA 19 – Câmara para envelhecimento por exposição à ultravioleta.	45
FIGURA 20 – Lote de amostras preparadas para a realização dos ensaios.....	47
FIGURA 21 – Equipamentos para envelhecimento elétrico do primeiro lote de amostras (30 dias).....	48
FIGURA 22 – Primeiro lote de amostras para envelhecimento elétrico (15 dias).....	48
FIGURA 23 – Segundo lote de amostras para envelhecimento elétrico (30 dias).....	49
FIGURA 24 – Equipamento para ensaio de resistividade elétrica do material.	50

FIGURA 25 – Equipamentos para ensaio de espectrometria por impedância.	50
FIGURA 26 – Dispositivo para colocação das amostras durante ensaio de polarização e despolarização.	51
FIGURA 27 – Fonte de tensão e eletrômetro para ensaio de polarização e despolarização.	52
FIGURA 28 – Equipamento de análise de Espectroscopia por Infravermelho (FTIR).	53
FIGURA 29 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV).	54
FIGURA 30 – Equipamento para análise de calorimetria diferencial de varredura (DSC).	55
FIGURA 31 – Amostras dos pigmentos envelhecidas em exposição à radiação ultravioleta.	56
FIGURA 32 – Avaliação da degradação dos pigmentos em exposição ultravioleta na escala de cores rgb.	57
FIGURA 33 – Capacitância real das amostras de parafina pura.	60
FIGURA 34 – Capacitância imaginária das amostras de parafina pura.	60
FIGURA 35 – Capacitância real das amostras de pigmento 0,1% puro.	61
FIGURA 36 – Capacitância imaginária das amostras de pigmento 0,1% puro.	61
FIGURA 37 – Capacitância real das amostras de pigmento 0,1% completo.	62
FIGURA 38 – Capacitância imaginária das amostras de pigmento 0,1% completo.	62
FIGURA 39 – Capacitância real das amostras de pigmento 0,2% puro.	63
FIGURA 40 – Capacitância imaginária das amostras de pigmento 0,2% puro.	64
FIGURA 41 – Capacitância real das amostras de pigmento 0,2% completo.	64
FIGURA 42 – Capacitância imaginária das amostras de pigmento 0,2% completo.	65
FIGURA 43 – Capacitância real das amostras de pigmento 0,3% puro.	66
FIGURA 44 – Capacitância imaginária das amostras de pigmento 0,3% puro.	66
FIGURA 45 – Capacitância real das amostras de pigmento 0,3% completo.	67
FIGURA 46 – Capacitância imaginária das amostras de pigmento 0,3% completo.	67
FIGURA 47 – Polarização das amostras de parafina pura.	68
FIGURA 48 – Despolarização das amostras de parafina pura.	68
FIGURA 49 – Polarização das amostras de pigmento 0,1% puro.	69
FIGURA 50 – Despolarização das amostras de pigmento 0,1% puro.	69
FIGURA 51 – Polarização das amostras de pigmento 0,1% completo.	70
FIGURA 52 – Despolarização das amostras de pigmento 0,1% completo.	70

FIGURA 53 – Polarização das amostras de pigmento 0,2% puro.....	71
FIGURA 54 – Despolarização das amostras de pigmento 0,2% puro.....	71
FIGURA 55 – Polarização das amostras de pigmento 0,2% completo.	72
FIGURA 56 – Despolarização das amostras de pigmento 0,2% completo.	72
FIGURA 57 – Polarização das amostras de pigmento 0,3% puro.....	73
FIGURA 58 – Despolarização das amostras de pigmento 0,3% puro.....	73
FIGURA 59 – Polarização das amostras de pigmento 0,3% completo.	74
FIGURA 60 – Despolarização das amostras de pigmento 0,3% completo.	74
FIGURA 61 – DSC das amostras de parafina pura.....	75
FIGURA 62 – DSC das amostras de pigmento 0,1% puro.	76
FIGURA 63 – DSC das amostras de pigmento 0,2% puro.....	77
FIGURA 64 – DSC das amostras de pigmento 0,3% puro.....	77
FIGURA 65 – FTIR das amostras de parafina pura.	79
FIGURA 66 – FTIR das amostras de parafina pura na região de 1800cm^{-1} a 1600cm^{-1}	79
FIGURA 67 – FTIR das amostras de pigmento 0,1% puro.	80
FIGURA 68 – FTIR das amostras de pigmento 0,1% puro na região de 1800cm^{-1} a 1600cm^{-1}	80
FIGURA 69 – FTIR das amostras de pigmento 0,2% puro.	81
FIGURA 70 – FTIR das amostras de pigmento 0,2% puro na região de 1800cm^{-1} a 1600cm^{-1}	81
FIGURA 71 – FTIR das amostras de pigmento 0,3% puro.	82
FIGURA 72 – FTIR das amostras de pigmento 0,3% puro na região de 2000cm^{-1} a 1600cm^{-1}	82
FIGURA 73 – MEV de superfície das amostras de parafina pura.	83
FIGURA 74 – MEV de superfície das amostras de pigmento 0,1% puro.	84
FIGURA 75 – MEV de superfície das amostras de pigmento 0,2% puro.	84
FIGURA 76 – MEV de superfície das amostras de pigmento 0,3% puro.	85
FIGURA 77 – Antes e depois de aplicação do sensor no isolador com ativação em estufa.	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Especificações técnicas aplicáveis aos sensores.....	22
TABELA 2 – Tipo de material do sensor	22
TABELA 3 – Meios de detecção utilizados em sensores	22
TABELA 4 – Fenômenos de conversão utilizados em sensores	23
TABELA 5 – Campos de aplicação de sensores.....	23
TABELA 6 – Tipos de estímulos.....	24
TABELA 7 – Materiais utilizados no desenvolvimento do sensor termocrômico.	41
TABELA 8 – Dados de frequência utilizados no envelhecimento elétrico acelerado.	46
TABELA 9 – Resistividade superficial das amostras.....	59
TABELA 10 – Resistividade volumétrica das amostras.....	59
TABELA 11 – Temperatura de cristalização das amostras analisadas no DSC.....	78
TABELA 12 – Temperatura de fusão das amostras analisadas no DSC.	78

LISTA DE SIGLAS

- PEAD – Polietileno de Alta Densidade
- UV – Ultravioleta
- SI – Sistema Internacional de Unidades
- BIPM – Instituto Internacional de Pesos e Medidas (*Bureau International des Poids et Mesures*)
- DC – Corrente contínua
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial
- FTIR – Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
- RGB – Vermelho Verde Azul (*Red Green Blue*)
- PLA – Políácido Láctico

LISTA DE SÍMBOLOS

μA	- pico ampère
μ	- Dipolo Induzido
q	- Carga elétrica
l	- Distância entre cargas
P	- Polarização
ϵ_0	- Permissividade elétrica no vácuo
X	- Susceptibilidade elétrica
E	- Campo elétrico
J	- Densidade de corrente
P_e	- Momento de dipolo na polarização eletrônica
N_e	- População de átomos na polarização eletrônica
α_e	- Polarizabilidade eletrônica
E_l	- Campo elétrico local
P_a	- Momento de dipolo na polarização atômica
N_a	- População de átomos na polarização atômica
α_a	- Polarizabilidade atômica
P_d	- Momento de dipolo permanente
N_d	- População de átomos na polarização dipolar
α_d	- Polarizabilidade dipolar
p	- Momento dipolar da molécula
k	- Constante de Boltzmann
T	- Temperatura
ϕ	- Função relaxação dielétrica
τ	- Tempo de relaxação
E_0	- Campo elétrico inicial
ω	- Frequência angular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	ISOLADORES	17
2.1.1	Isolador Polimérico Tipo Pino	17
2.1.2	Falhas em isoladores poliméricos	18
2.2	SENSORES	21
2.2.1	Tipos de sensores	21
2.2.2	Sensores de temperatura	24
2.3	TERMOCROMISMO	26
2.4	POLÍMEROS	27
2.4.1	Cera de parafina	28
2.5	FOTODEGRADAÇÃO	30
2.6	TEORIA DOS DIELÉTRICOS	32
2.6.1	Definição dos dielétricos	32
2.6.2	Polarização de dielétricos	33
2.6.3	Mecanismos de polarização	34
2.6.4	Resposta Dielétrica	36
2.6.5	Resposta dielétrica no domínio do tempo	36
2.6.6	Resposta dielétrica no domínio da frequência	38
3	MATERIAIS E MÉTODO	41
3.1	MATERIAIS	41
3.2	MÉTODO	41
3.2.1	Definição dos objetivos	42

3.2.2	Técnica de confecção do sensor termocrômico	42
3.2.3	Intemperismo acelerado por UV	45
3.2.4	Envelhecimento acelerado por campo elétrico	45
3.2.5	Caracterização elétrica	49
•	Resistividade elétrica	49
•	Espectrometria por Impedância	50
•	Polarização e Despolarização	51
3.2.6	Caracterização Físico-Química.....	52
•	Espectroscopia por Infravermelho (FTIR)	52
•	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	53
•	Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	Intemperismo acelerado por radiação ultravioleta.....	56
4.2	Resistividade superficial e volumétrica.....	58
4.3	Espectrometria de Impedância.....	60
4.4	Polarização e Despolarização	68
4.5	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	75
4.6	Espectroscopia no Infravermelho (FTIR).....	78
4.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	83
4.8	Aplicação no isolador com ativação em estufa	85
5	CONCLUSÕES	87
6	TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	89

1 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 à outro condutor, tudo isso ainda sujeitos à todo tipo de distúrbios meteorológicos. (SILVA, 2014).

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 (MARTINS *et al*, 2018).

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 (GUBANSKI *et al*, 2007).

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 apresentarem confiabilidade elevada na detecção de falhas nos isoladores.

O presente trabalho visa caracterizar materiais para o desenvolvimento de um sensor termocrômico para aplicação em campo, à base de parafina tendo por base um sensor desenvolvido para conectores do tipo cunha (AKISHINO, 2014), que seja capaz de detectar falhas prematuras em isoladores poliméricos nas redes de distribuição de energia elétrica.

1.1 OBJETIVOS

Caracterizar materiais para serem utilizados no futuro desenvolvimento de um sistema termocrômico aplicável em isoladores poliméricos tipo pino que seja capaz de indicar, através da mudança de coloração, que o isolador apresenta algum defeito.

Em complemento ao objetivo geral, norteiam esse trabalho os seguintes objetivos específicos:

1. Desenvolver sistema termocrômico tendo como base o sensor desenvolvido por Akishino (2014), originalmente usado para detecção de falhas em conectores do tipo cunha;
2. Avaliar comportamento do pigmento utilizado no sistema termocrômico em câmara de intemperismo acelerado a fim de constatar eventual fotodegradação do pigmento exposto à radiação ultravioleta;
3. Realizar a caracterização dielétrica do sensor termocrômico, com análises de resistividade, impedância, polarização, despolarização, microscopia, calorimetria e espectroscopia no infravermelho, para prever comportamento do mesmo após a sua aplicação no isolador polimérico;

1.2 JUSTIFICATIVA

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.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Estruturalmente, o presente trabalho se apresenta da seguinte maneira:

No capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica de todos os assuntos envolvidos, abordando na seguinte ordem os seguintes tópicos, com seus subtópicos correspondentes: Isoladores, Sensores, Termocromismo, Polímeros, Fotodegradação e a Teoria dos Dielétricos.

No capítulo 3 serão listados todos os materiais utilizados no projeto, bem como a metodologia aplicada em todas as etapas do projeto.

No capítulo 4 serão apresentados todos os resultados experimentais obtidos ao longo do projeto, bem como as discussões pontuais de cada resultado.

Por fim, no capítulo 5, serão apresentadas as conclusões do trabalho, bem como listados os eventuais trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos sequencialmente ao tema proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ISOLADORES

Os isoladores são componentes do sistema elétrico capazes de isolar eletricamente os condutores submetidos a uma diferença de potencial elétrico em relação a terra ou a outro condutor, além de prover a sustentação mecânica. Podem ser fabricados principalmente com três tipos de materiais: cerâmica, vidro e material polimérico. Cada tipo possui características técnicas específicas e essas características devem ser levadas em conta de acordo com o tipo de aplicação do isolador. (MAMEDE, 2005; BARROS, 2016).

O presente trabalho tem como foco de pesquisa os isoladores poliméricos do tipo pino, sendo apenas esse tipo detalhado a seguir.

2.1.1 Isolador Polimérico Tipo Pino

Isoladores poliméricos tipo pino podem ser produzidos com diferentes compostos poliméricos: borracha de silicone, resinas epóxi, etileno propileno ou polietileno de alta densidade, sendo este último o mais usado comercialmente no Brasil (MARTINS, 2015).

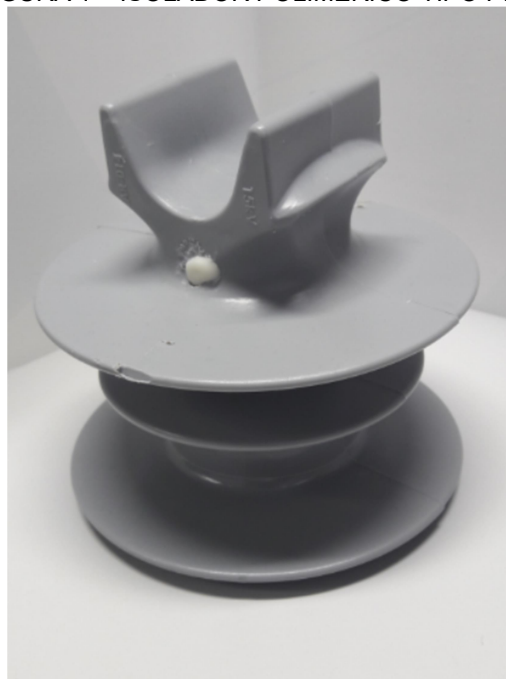
Em detrimento dos isoladores cerâmicos e de vidro, os poliméricos possuem relativas vantagens e desvantagens. Menor custo, menor peso, boa resistência às intempéries e ao vandalismo e uma maior hidrofobicidade podem ser listados como vantagens operacionais dos isoladores poliméricos. Já como desvantagem está o fato de o isolador polimérico apresentar uma maior dificuldade de detecção de falhas internas em relação aos demais tipos de isoladores. Normalmente, isoladores com defeito somente são detectados quando o mesmo já está deteriorado, ou quando ocorre uma falha no sistema elétrico ocasionada pelo isolador defeituoso (COSTA, 2009; SHINOHARA, 2017).

Outro ponto relevante é que, por se tratar de um composto orgânico, podem ocorrer interações dinâmicas entre o isolador e o meio que o envolve, como por exemplo, radiação ultravioleta, poluição e umidade. Essa interação entre o isolador e as intempéries pode provocar diversos danos ao isolador, como por exemplo, perda de cor, perda de resistência mecânica, fraturas, riscos, erosão e abertura de arcos elétricos (THOMAZINI, 2009; BARROS, 2016).

Isoladores poliméricos são fabricados com expectativa de vida útil em torno de 15 anos. Por possuir vida útil relativamente longa, é importante que se tenham meios de detectar falhas prematuras nos isoladores em uso (TOLEDO et al, 2009).

A Figura 1 ilustra um isolador polimérico tipo pino.

FIGURA 1 – ISOLADOR POLIMÉRICO TIPO PINO



FONTE: O Autor (2019).

2.1.2 Falhas em isoladores poliméricos

Isoladores poliméricos em serviço estão expostos a todo tipo de intempéries, que podem acelerar o processo natural de envelhecimento do polímero. Raios, chuva, calor, radiação ultravioleta, dentre outros fenômenos, podem alterar algumas características físico-químicas do material. Dentre os principais problemas enfrentados pelos isoladores está a erosão, que é a perda irreversível de material, podendo aumentar os pontos de depósito de poluição e diminuir a hidrofobicidade do isolador, e conseqüentemente desencadear diversas falhas elétricas do isolador (BEZERRA et al, 2010; BEZERRA, 2015).

Quando se aborda a questão de falhas em isoladores, pode se destacar dois modos gerais: falhas superficiais e falhas volumétricas. Esses dois modos se diferenciam na região geral do isolador onde podem ocorrer. Falhas superficiais

ocorrem na superfície e falhas volumétricas ocorrem na parte interna do material do isolador.

Falhas superficiais podem ser separadas em três tipos principais:

- Trilhamento elétrico – causado principalmente pela erosão na superfície do material polimérico. Nesse caso, ocorre a formação de um caminho condutor permanente no isolador, provocado pela perda de material polimérico superficial (SILVA, 2014).
- Redução da impedância característica causada pela degradação da superfície por agentes ambientais – UV, calor e/ou sujidades podem atuar nesse processo, ocasionando redução da capacidade dielétrica do isolador ao longo do tempo.
- Descargas parciais – no caso da falha superficial, a descarga parcial que ocorre é o chamado Efeito Corona. Esse fenômeno quando o campo elétrico ao redor do isolador ultrapassa a rigidez dielétrica do material isolante. Em situações normais, este efeito ocorrerá em tensões maiores que 50 kV. O Efeito Corona ocorre pontualmente no isolador, originando no local descargas luminosas oriundas do processo de ionização do ar ao redor do dielétrico. Essas descargas possuem coloração azulada, observáveis apenas em ambiente escuro. A ocorrência do Efeito Corona pode causar fissuramento ou erosão do material polimérico, devido à formação de ozônio na interface entre o isolador e a atmosfera ao seu redor. Esse desgaste iniciado pela descarga Corona pode desencadear outros tipos de falhas no isolador polimérico (SOUZA, 2015; RIBEIRO, 2017).

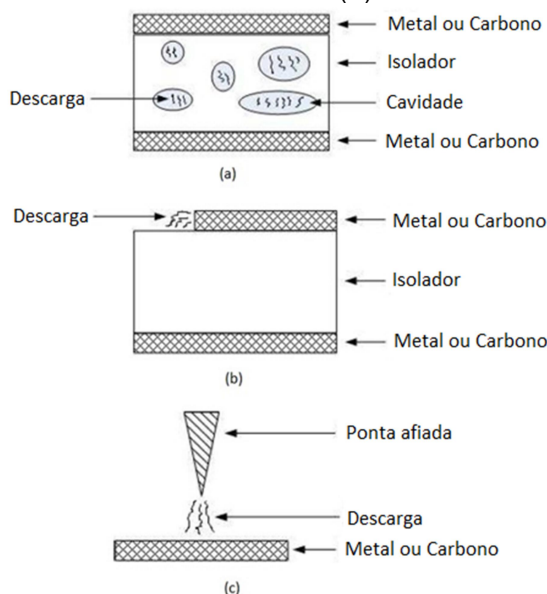
Já as falhas volumétricas são apresentadas nas seguintes formas:

- Falhas ou imperfeições no material – os isoladores poliméricos são fabricados pelo processo de injeção do polímero em alta temperatura e pressão. Esse processo gera isoladores com alto grau de impenetrabilidade e número mínimo de vazios internos na estrutura. De todo modo, não é possível evitar por completo a ocorrência de formação de vazios dentro da estrutura, que podem estar preenchidos com ar ao invés de material polimérico. A presença desses vazios pode ocasionar redução da capacidade dielétrica do isolador (LOPES, 2018).

- Caminhos condutores – assim como o trilhamento elétrico, também são causados pela erosão do material polimérico. Porém, ocorrem quando a erosão se dá internamente, e não apenas na superfície do material. Nesse caso, além do trilhamento elétrico superficial, caminhos condutores se formam no interior do isolador. Estes caminhos apresentam uma redução na impedância do isolador, gerando caminhos preferenciais de condução elétrica de maneira intermitente ou até mesmo permanentemente (MARTINS, 2015; WERNECK *et al*, 2013).
- Descargas parciais internas – em comparação ao efeito corona, a descarga parcial interna também ocorre quando o campo elétrico interno gerado excede ao limite do material, gerando uma descarga elétrica no vazio do material. O que diferencia os dois fenômenos é que o Corona ocorre na superfície, enquanto o fenômeno de descarga parcial interna é originado pontualmente onde cavidades estejam presentes no material polimérico (SILVA, 2005; SUWANASRY, 2013).

Esquemáticamente, as descargas parciais, sejam elas superficiais ou volumétricas, podem ser representadas pela Figura 2.

FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE DESCARGA PARCIAL INTERNA (A), DESCARGA PARCIAL SUPERFICIAL (B) E EFEITO CORONA (C).



FONTE: Adaptado de Suwanasry (2013).

Na Figura 2 (a), uma descarga parcial ocorre nas cavidades internas do material, quando o campo elétrico interno supera o limite do material. Na figura 2 (b) uma descarga parcial superficial ocorre no limite entre as superfícies do metal e do isolador. Na Figura 2 (c), a descarga corona ocorre entre a superfície do material e alguma ponta metálica próxima ao material, gerando a descarga externa entre diferentes pontos.

Todas essas falhas podem produzir aquecimento no material e, conseqüentemente, serem detectadas por um sensor termosensível (MARTINS, 2015; BEZERRA *et al*, 2010).

O sensor a ser desenvolvido no presente trabalho visa detectar essas falhas mediante aquecimento e acionamento do sistema termocrômico.

2.2 SENSORES

Em uma definição ampla, podem ser considerados sensores os dispositivos que recebem um estímulo e emitem uma resposta ao estímulo recebido. Esse estímulo pode se originar de diversas formas, bem como a resposta do sensor ao estímulo. Isso faz com que os sensores possam ser aplicados em diversas formas de monitoramento de variáveis (FRADEN, 1993).

2.2.1 Tipos de sensores

Conforme citado na definição, sensores são dispositivos que recebem um estímulo e emitem uma resposta. Esses dispositivos são sensíveis a diferentes formas de energia do ambiente, relacionando essa sensibilidade a alguma grandeza que precisa ser medida no sistema (THOMAZINI, 2005).

Sensores, de uma forma geral, possuem um simples conceito de operação: uma propriedade física do sensor precisa ser alterada por um estímulo externo, e assim ocasionar algum tipo de sinal, normalmente um sinal elétrico, que seja capaz de representar a alteração na variável de estímulo captada pelo sensor (FRADEN, 1993).

Combinando a definição com o amplo universo de unidades de medida, pode-se concluir que sensores podem ter aplicação prática em diversos tipos de sistemas de medição e controle de variáveis de interesse. Para facilitar a

abordagem, podem-se classificar os sensores características específicas, conforme tabelas 1 a 6.

A Tabela 1 classifica os sensores por possíveis especificações técnicas, aplicáveis ou não a cada tipo de sensor.

TABELA 1 – Especificações técnicas aplicáveis aos sensores

Sensibilidade	Faixa operacional
Estabilidade	Resolução
Precisão	Seletividade
Velocidade de resposta	Condições ambientais
Características de sobrecarga	Linearidade
Tempo de vida	Formato de saída
Custo, tamanho, peso	Outros

FONTE: Adaptado de Fraden (1993).

Pode-se observar na Tabela 1 que diferentes especificações podem ser aplicadas aos diferentes tipos de sensores. A aplicação do sensor que vai definir os tipos de especificações importantes para cada caso.

A Tabela 2 classifica os sensores pelo tipo de material com o qual o sensor é confeccionado.

TABELA 2 – Tipo de material do sensor

Inorgânico	Orgânico
Condutor	Isolante
Semicondutor	Líquido
Gás	Plasma
Biológico	Outros

FONTE: Adaptado de Fraden (1993).

A Tabela 3 mostra os possíveis meios de detecção utilizados em sensores.

TABELA 3 – Meios de detecção utilizados em sensores

Biológico	Químico
Elétrico	Magnético
Onda eletromagnética	Radioatividade
Temperatura	Outros

FONTE: Adaptado de Fraden (1993).

Na Tabela 3 pode-se perceber que a variabilidade de possibilidades de tipos de sensores. Com diversos meios de detecção possíveis, a tecnologia em torno dos sensores precisa ser adaptável a diferentes condições operacionais.

A Tabela 4 mostra exemplos de possíveis fenômenos de conversão existentes em sensores.

TABELA 4 – Fenômenos de conversão utilizados em sensores

Físico	Termoelétrico Fotoelétrico Eletromagnético Termoelástico Fotoelástico Outros
Químico	Transformação química Transformação física Espectroscopia Outros
Biológico	Transformação bioquímica Transformação física Espectroscopia Outros

FONTE: Adaptado de Fraden (1993).

A Tabela 5 lista alguns, dentre tantos possíveis, exemplos de campos de aplicação de sensores na indústria.

TABELA 5 – Campos de aplicação de sensores

Agricultura	Automotivo
Construção civil	Meteorologia
Comércio	Telecomunicações
Energia	Brinquedos
Saúde	Setor espacial
Produção	Outros
Militar	
Medições científicas	

FONTE: Adaptado de Fraden (1993).

A Tabela 6 mostra os tipos de estímulo possíveis nos sensores.

TABELA 6 – Tipos de estímulos

Acústico	Comprimento de onda Espectro Velocidade de onda Outros	Elétrico	Carga Corrente Voltagem Outros
Biológico	Biomassa Concentração Estado Outros	Mecânico	Posição Aceleração Força Outros
Químico	Concentração Estado Identidade Outros	Térmico	Temperatura Fluxo de calor Calor específico Outros

FONTE: Adaptado de Fraden (1993).

As Tabelas 1 a 6 poderiam ser bem mais amplas. Porém, o principal objetivo nessa abordagem sobre sensores, unidades de medida e tipos de sensores é mostrar que o universo dos sensores é bastante amplo, com diversas características e aplicações. Desse modo, um estudo mais aprofundado se faria necessário oportunamente, por não ser o foco principal do presente trabalho.

2.2.2 Sensores de temperatura

Seguindo definição de Thomazini, sensores de temperatura são aqueles que recebem um estímulo na forma de calor e emitem uma resposta a esse estímulo, seja ele um estímulo direto ou indireto. Os sensores de temperatura podem ser de diversos tipos, sendo mais comumente utilizados os seguintes: termômetros de expansão, termistores, termopares, termoresistores, par bimetalico, sensores eletrônicos e pirômetros (THOMAZINI, 2005).

Termômetros de expansão de fluidos são sensores que utilizam o princípio de dilatação de líquidos mediante a variação de temperatura. O aparelho é calibrado na escala de variação de temperatura, sendo possível a medição da temperatura em função da dilatação ou contração do líquido presente no termômetro (FRANÇA, 2007; MOREIRA, 2008).

Termistores são compostos por materiais semicondutores sensíveis à variação de temperatura. A variação na resistência elétrica do material semicondutor indica indiretamente a mudança de temperatura (THOMAZINI, 2005; FRANÇA, 2007).

Termopares são sensores em que dois fios de metais diferentes são colocados em contato com o meio do qual se quer medir a temperatura. A variação de temperatura faz com que uma diferença de potencial surja entre os fios e essa tensão é proporcional à temperatura. Dessa forma, com equipamento calibrado e padronizado para diferentes valores de tensão, é possível medir a temperatura do meio (MOREIRA, 2002; NORTHROP, 2005).

Termoresistores são resistores que atuam em função da característica de variação da resistência elétrica de materiais metálicos em função da variação de temperatura. Desse modo, é possível prever o comportamento dessa resistência elétrica com a variação da temperatura, modelando assim o comportamento dos materiais e utilizando esses materiais em sensores de temperatura (NORTHROP, 2005).

Sensores de par bimetálico utilizados em termostatos. Caracterizam-se por possuir um conjunto de duas chapas metálicas de materiais com coeficientes de dilatação térmica diferentes entre si. Com a variação da temperatura, a chapa inicialmente linear sofrerá alguma deformação, indicando aumento ou diminuição da temperatura operacional para a qual ela foi projetada (NORTHROP, 2005; FRANÇA, 2007).

Sensores eletrônicos são uma ampla gama de sistemas cujos princípios de funcionamento variam de acordo com o tipo de material em uso, sendo por exemplo sensores do tipo diodo, transistores, circuitos integrados, etc. Todos utilizam princípios de elétrica e eletrônica para monitoramento da temperatura nos sistemas aos quais são aplicados (THOMAZINI, 2005).

Pirômetros, assim como os sensores de infravermelho, usam a radiação de um corpo para medição da temperatura, sem a necessidade de um contato entre o sensor e o corpo. Não são tão confiáveis, pois podem medir ao mesmo tempo a radiação do corpo e a radiação do ambiente que esteja sendo refletida pelo corpo, por isso são menos utilizados que os sensores de infravermelho (THOMAZINI, 2005).

Avaliando todos os principais tipos de sensores de temperatura citados, pode-se concluir que o sensor do projeto, apresentado mais adiante, se difere dos demais, pois pode, de maneira simples, identificar a ocorrência de falhas no isolador e, de maneira irreversível, evitar que a falha, mesmo quando não identificada no

exato momento em que ocorre, deixe de ser identificada posteriormente pelas equipes de manutenção do sistema elétrico.

2.3 TERMOCROMISMO

Termocromismo se define como o fenômeno de mudança de coloração em função da temperatura. Tal fenômeno pode ocorrer por interações físicas e/ou químicas entre os componentes do sistema, de forma direta ou indireta. No caso do termocromismo direto, o fenômeno ocorre por influência da temperatura nos compostos orgânicos. Já o termocromismo indireto ocorre quando a temperatura influencia não diretamente no composto, mas sim no meio no qual o composto está inserido. O resultado prático é o mesmo nos dois casos, sendo a ocorrência de cada um dos tipos consequência direta dos compostos disponíveis para a elaboração dos sistemas termocrômicos (SEEBOTH et al, 2014; DE SOUZA, 2014).

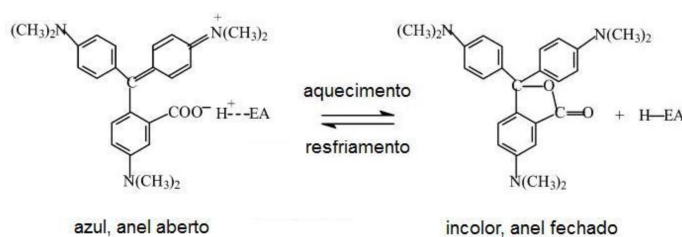
Normalmente, para ação termocrômica em algum sistema, são adicionados pigmentos e/ou corantes ao composto em aplicação, a fim de se obter o resultado desejado na avaliação do termocromismo do composto.

Usualmente, quando se demandam sistemas termocrômicos, os sistemas com corantes leuco são os mais utilizados. Eles são uma escolha comum principalmente por possuírem como característica um termocromismo reversível, ou seja, podem ser ou não coloridos em função da faixa de temperatura à qual são submetidos, podendo ser especificamente escolhidos para aplicação em cada tipo de sistema, de acordo com a faixa de variação de temperatura de cada sistema. Essa reversibilidade do termocromismo dos corantes leuco ocorre devido à interação do corante com o solvente em função da temperatura, ou seja, eles são coloridos quando se encontram no estado sólido, e incolores mediante aumento de temperatura, devido à fusão do solvente no qual se encontra o corante (AKISHINO, 2014; PANAK, 2018).

Entretanto, uma característica estrutural dos corantes leuco deve ser ressaltada: a presença de insaturação na molécula. Essa insaturação torna o corante leuco mais suscetível à fotodegradação, e como os isoladores são aplicados em ambientes externos, o uso dos corantes leuco fica inviabilizado. A fotodegradação será abordada mais adiante nesse trabalho.

A Figura 3 mostra um exemplo da estrutura de um corante leuco, com a presença das insaturações na molécula, bem como a mudança na estrutura mediante aquecimento ou resfriamento.

FIGURA 3 – ESTRUTURA MOLECULAR E COMPORTAMENTO TERMOCRÔMICO DA LACTONA DE VIOLETA CRISTAL



FONTES: Akishino (2014).

Segundo Seeboth (2014), as propriedades termocrômicas de polímeros podem ser definidas de três formas distintas:

- *Polímeros com propriedades termocrômicas quimicamente inerentes;*
- *Polímeros dopados com pigmentos termocrômicos;*
- *Polímeros dopados com pigmentos sem propriedades termocrômicas.*

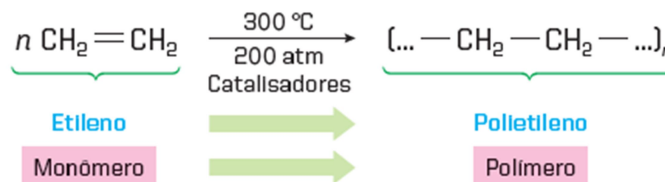
Segundo as definições de Seeboth (2014) e avaliando os materiais disponíveis, será desenvolvido sistema termocrômico à base de parafina industrial macrocristalina dopada com pigmento sem propriedades termocrômicas inerentes.

2.4 POLÍMEROS

Segundo a definição etimológica, a palavra polímero vem do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidades). Desse modo, pode-se definir um polímero como uma macromolécula formada por muitas unidades de uma unidade de repetição denominada de mero, sendo essas unidades interligadas entre si por ligações covalentes. De acordo com o tipo de mero, o tamanho da cadeia polimérica, o tipo de ligação covalente presente e, principalmente, o comportamento mecânico da molécula, os polímeros são classificados em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO JR., 2006).

A Figura 4 exemplifica esquematicamente uma reação de polimerização, destacando o monômero original e o polímero formado.

FIGURA 4 – POLIMERIZAÇÃO ESQUEMÁTICA DO POLIETILENO



FONTE: Feltre (2008).

Nessa reação, o monômero etileno reage, em condições específicas de reação, formando o polímero denominado polietileno, de cadeia longa e elevado peso molecular.

As características físico-químicas dos polímeros são variáveis e dependem principalmente da estrutura química e do tamanho da cadeia. Isso faz com que os polímeros tenham ampla gama de diferentes moléculas, conseqüentemente, com diversas aplicações industriais.

2.4.1 Cera de parafina

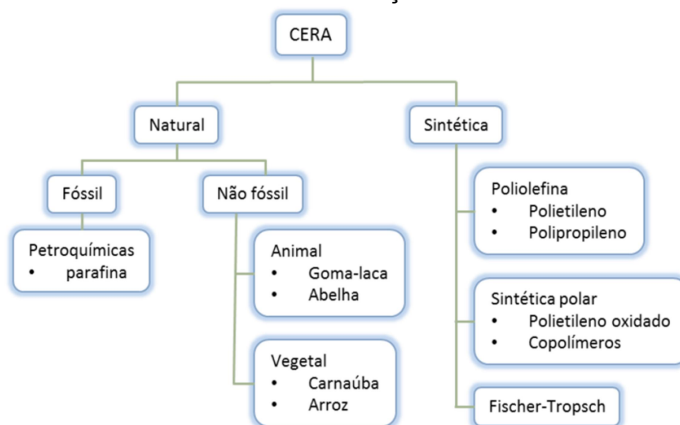
Mesmo não sendo classificada como polímero, por não possuir cadeia tão longa como os polímeros, a parafina possui características físico-químicas bem definidas, sendo formada por grupos funcionais $-\text{CH}_2-$ que se repetem de 18 a 50 vezes na cadeia. Possui massa molar menor que a do PE (polietileno), podendo ser considerada como um oligômero do PE. Por essa razão, a cera de parafina foi o material definido para a elaboração do sistema termocrômico do presente trabalho.

Dentro do grupo das ceras, que podem se originar de diversas fontes, conforme mostra a Figura 5, a cera de parafina se destaca por ser a única de origem mineral, proveniente do processo de refino do petróleo cru (AKISHINO, 2014).

Dentre algumas características relevantes, pode ser destacado o fato de ser quimicamente inerte e estável, característica extremamente importante no funcionamento e durabilidade do sistema termocrômico utilizada nesse trabalho (LUYT *et al*, 2008).

Por estarem situadas numa faixa entre 18 e 50 átomos de carbono, as ceras de parafina podem apresentar diferentes características entre si, sendo a principal delas o ponto de fusão, normalmente variando entre 30°C e 90°C. Dessa forma, a cera de parafina é comercializada principalmente com base no ponto de fusão da molécula, o que influencia diretamente no uso ao qual será destinada (BENNETT, 2011; AKISHINO *et al*, 2016).

FIGURA 5 – CLASSIFICAÇÃO DAS CERAS.



FONTE: Akishino (2014).

A cera de parafina, mesmo não sendo classificada como um polímero por possuir cadeias moleculares mais curtas, possui características físico-químicas similares ao polímero polietileno (AKISHINO, 2014).

Mesmo sem possuir propriedades termocrômicas inerentes, quando dopada com aditivos que também não possuem propriedades termocrômicas, a parafina pode apresentar termocromismo de forma indireta, ou seja, ela se torna termocrômica pela interação entre a cera e um aditivo. Isso pode se dar, por exemplo, com a diluição de um pigmento colorido em camada de parafina conjugada com outra camada sem a diluição do pigmento. Com o aquecimento do sistema, as duas camadas se fundem, tornando o conjunto em um sistema termocrômico. (SEEBOTH *et al*, 2014).

O exemplo citado acima será melhor explicado quando a metodologia do projeto for detalhada mais adiante.

2.5 FOTODEGRADAÇÃO

Quando se fala em degradação de polímeros, a estrutura básica de um polímero deve ser citada. Com a presença de unidades básicas (meros) ligadas entre si formando as cadeias longas, pode-se afirmar que a primeira etapa da degradação sempre se dará com o rompimento de uma ligação química covalente entre duas dessas unidades básicas formadoras do polímero (DE PAOLI, 2008).

Toda ligação química possui uma quantidade de energia relacionada e, para que uma ligação se quebre, uma quantidade de energia maior do que a energia de ligação deve ser fornecida a essa ligação. Essa energia pode ser fornecida de diferentes formas: luz, radiação gama, calor ou cisalhamento. Na presença de energia suficiente, a molécula absorve essa energia, provocando o rompimento de uma ligação química, gerando uma molécula em um estado eletrônico excitado, possibilitando a degradação dessa molécula (DE PAOLI, 2008; WANG, 2019).

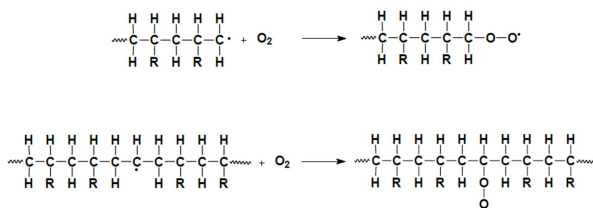
No caso do sistema termocrômico desenvolvido nesse trabalho, aplicado em isoladores colocados em ambiente externo, a principal exposição causadora de degradação à qual ele será submetido é a radiação ultravioleta, que pode fornecer a energia necessária para o processo de fotólise (fotodegradação) na molécula do composto polimérico. Segundo De Paoli (2008), a fotólise (foto + lisis) é o rompimento de ligação química por reação fotoquímica causada por absorção de luz de energia correspondente a uma transição eletrônica ou por transferência de energia de um sensibilizador em seu estado excitado.

Partindo desse princípio, fotodegradação pode ser definida como a decomposição ou dissociação de compostos químicos causada pela luz ou pela radiação ultravioleta. Em compostos orgânicos coloridos, a fotodegradação pode ser claramente evidenciada pela perda de coloração do composto mediante absorção da luz incidida sobre o composto. Já para compostos sem cor, esse processo se evidencia pelo amarelamento do material (VIG et al, 2018).

A energia fornecida, caso seja suficiente para romper a ligação C-H presente na molécula da cera de parafina, gera um radical livre na molécula, iniciando o processo denominado de auto-oxidação. Segundo De Paoli (2008), esse processo ocorre em três etapas: iniciação, propagação e terminação. A iniciação ocorre a partir da formação do primeiro radical alquila, em consequência da incidência de energia suficiente para a quebra da ligação covalente C-H, e da reação

desse radical alquila com o oxigênio presente no meio. A Figura 6 representa esquematicamente o processo de iniciação, seja ela com a reação do oxigênio na extremidade ou no meio de uma molécula do polímero.

FIGURA 6 – ETAPA DE INICIAÇÃO DO PROCESSO DE AUTO-OXIDAÇÃO.



FONTE: De Paoli (2008).

Na etapa seguinte, a propagação, o macroradical peroxila atacará outra molécula do polímero, retirando dela um átomo de hidrogênio e formando um hidroperóxido e um novo macroradical alquila, conforme representado na Figura 7.

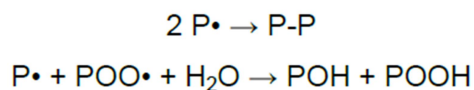
FIGURA 7 – ETAPA DE PROPAGAÇÃO DO PROCESSO DE AUTO-OXIDAÇÃO.



FONTE: De Paoli (2008).

A terminação, última etapa do processo de auto-oxidação, ocorre de duas possíveis formas: pela recombinação entre dois radicais alquila formados ou pela reação entre dois macroradicais peroxila e uma molécula de água, formando um álcool terminal e um hidroperóxido, conforme mostrado na Figura 8.

FIGURA 8 – ETAPA DE TERMINAÇÃO DO PROCESSO DE AUTO-OXIDAÇÃO.



FONTE: De Paoli (2008).

Com o exposto no processo de auto-oxidação de um polímero, o comportamento é similar para a fotodegradação dos corantes orgânicos. Por isso, o presente trabalho será realizado com pigmento inorgânico, a fim de prevenir a

fotodegradação do sistema termocrômico a ser desenvolvido. Adicionalmente, uma etapa da pesquisa será a avaliação do pigmento em câmara de envelhecimento acelerado.

2.6 TEORIA DOS DIELÉTRICOS

2.6.1 Definição dos dielétricos

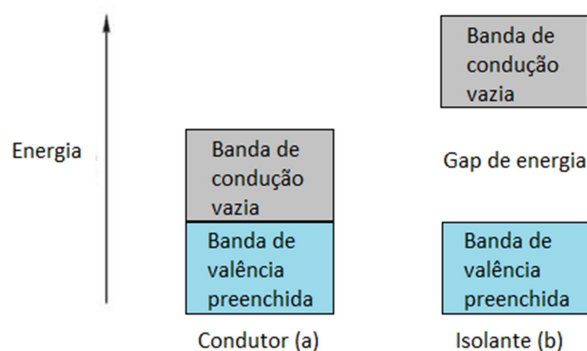
Por definição, um dielétrico é um material que possui capacidade de, através de um ou mais mecanismos do processo de polarização, armazenar cargas quando submetido a um campo elétrico externo (TAREIEV, 1978).

Já um material isolante, é um dielétrico que se aplica para evitar a passagem de corrente em um dispositivo (TAREIEV, 1978)

Em nível molecular, pode se afirmar que os isolantes possuem uma lacuna de energia entre a camada de valência, totalmente preenchida, e a camada de condução, totalmente vazia. Esse gap de energia, que é a energia necessária para um salto eletrônico entre as camadas de valência e condução, faz com que o material apresente um comportamento eletricamente isolante (REZENDE, 2004).

A Figura 9 ilustra esquematicamente a diferença entre um material condutor e um material isolante.

FIGURA 9 – MATERIAIS CONDUTORES (A) E ISOLANTES (B).



FONTE: Adaptado de Martins (2015).

Enquanto em um material condutor não há *gap* de energia entre as camadas de valência e condução, em um material isolante esse *gap* existe e é

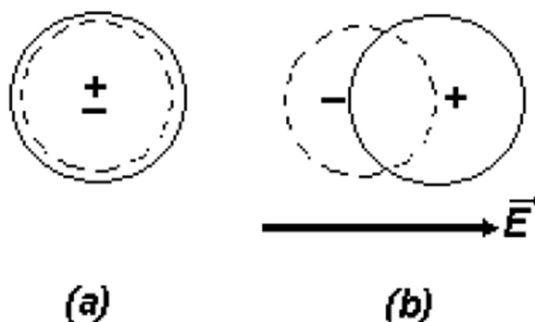
relativamente elevado, o que dificulta a movimentação de elétrons entre as camadas, caracterizando o material como um isolante.

2.6.2 Polarização de dielétricos

Os materiais dielétricos possuem íons ou moléculas que se encontram em equilíbrio natural. Porém, sob o efeito de um campo elétrico externo constante, essas cargas apresentam pequenos deslocamentos ou reorientações na distribuição espacial. Mesmo havendo movimentação de cargas elétricas, em geral essa movimentação é desprezível a nível de formação de corrente. Esse fenômeno de deslocamento dos elementos internos de um dielétrico é chamado de Polarização (TAREIEV, 1978).

A Figura 10 ilustra didaticamente esse processo, representando um único par de cargas opostas, com e sem a presença do campo elétrico.

FIGURA 10 – CARGAS EM EQUILÍBRIO NA AUSÊNCIA DE CAMPO ELÉTRICO (A) E POLARIZAÇÃO NA PRESENÇA DE CAMPO ELÉTRICO (B).



FONTE: Adaptado de Gomes (2008).

Quando sujeito à ação de um campo elétrico as distribuições de cargas moleculares e atômicas nos dielétricos sofrem alterações em suas posições de equilíbrio, onde as cargas positivas e negativas de módulo q são separadas por um distância l , gerando assim os dipolos elétricos. A equação 1 representa o momento do dipolo induzido μ , em função da carga q e da distância l que separa as cargas:

$$\mu = q.l \quad (1)$$

O momento de dipolo induzido gerado é o que dá origem ao processo de polarização do material. A polarização P é diretamente proporcional ao campo elétrico E , em função da susceptibilidade elétrica X e da permissividade no vácuo ϵ_0 , sendo expressa pela equação 2:

$$P = \epsilon_0 \cdot X \cdot E \quad (2)$$

Desse modo, conforme equação 3, a polarização P pode ser medida em função da densidade de corrente J , que representa a taxa de variação da polarização P ao longo do tempo, sendo:

$$J(t) = \frac{dP(t)}{dt} \quad (3)$$

2.6.3 Mecanismos de polarização

A polarização pode ocorrer de diferentes formas, comumente chamadas de mecanismos de polarização. Esses mecanismos podem estar relacionados à orientação de dipolos permanentes, ao deslocamento das cargas ou pela descontinuidade de fase do material. A polarização total do material é igual a soma de todos os mecanismos presentes no material (JONSCHER, 1983).

Dentre os principais, os mecanismos a seguir são os de maior relevância para a pesquisa desenvolvida nesse trabalho:

- Polarização Eletrônica – mecanismo de ação rápida, ocorrendo em intervalos de tempo de até 10^{-15} segundo. Caracteriza-se pelo deslocamento da nuvem eletrônica carregada negativamente em relação ao núcleo. O momento de dipolo na polarização eletrônica pode ser obtido conforme a equação 4, dada por:

$$P_e = N_e \alpha_e E_l \quad (4)$$

Sendo N_e a população de átomos, α_e a polarizabilidade eletrônica e E_l o campo elétrico local (BOTCHER, 1992).

- Polarização Iônica ou Polarização Atômica – mecanismo de ação mais lenta, em relação à polarização eletrônica, tendo como característica o deslocamento mútuo entre cátions e ânions, em direções opostas. Ocorre em intervalos de tempo de até 10^{-13} segundo e o momento de dipolo iônico ou atômico pode ser obtido pela equação 5:

$$P_a = N_a \alpha_a E_l \quad (5)$$

Sendo N_a a população de átomos, α_a a polarizabilidade atômica e E_l o campo elétrico local (BOTCHER, 1992).

- Polarização dipolar ou dipolo elétrico – mecanismo que ocorre com a orientação dos dipolos permanentes presentes no dielétrico. É um mecanismo mais lento, ocorrendo em um intervalo de até 10^{-6} segundo, sendo fortemente dependente da temperatura do meio e o momento de dipolo permanente pode ser obtido pela equação 6:

$$P_d = N_d \alpha_d E_l \quad (6)$$

Sendo N_d a população de átomos, E_l o campo elétrico local e α_d a polarizabilidade dipolar que é dada por $\alpha_d = \frac{p^2}{3kT}$, sendo p o momento dipolar da molécula, k a constante de Boltzmann e T a temperatura em Kelvin (BOTCHER, 1992).

- Polarização por cargas espaciais – mecanismo que ocorre na interface dielétrico/eletrodo, principalmente quando podem existir imperfeições nesse contato. Nesse mecanismo, cargas se movem em direção aos eletrodos, não sendo totalmente neutralizadas por causa das imperfeições no contato, formando assim um acúmulo de cargas característico desse mecanismo (BOTCHER, 1992).

2.6.4 Resposta Dielétrica

Conforme visto anteriormente, cada mecanismo de polarização pode ou não ocorrer principalmente em função do tempo de resposta e da variação do campo elétrico ao qual o material esteja submetido.

Quando o campo elétrico é constante, os mecanismos de formação mais lenta tendem a se estabilizar e se tornam mais relevantes. Já para um campo elétrico variável, os mecanismos mais lentos não se estabilizam, sendo mais facilmente detectáveis os mecanismos mais rápidos (KURTZ, 1979 e YOSHIDA, 1986).

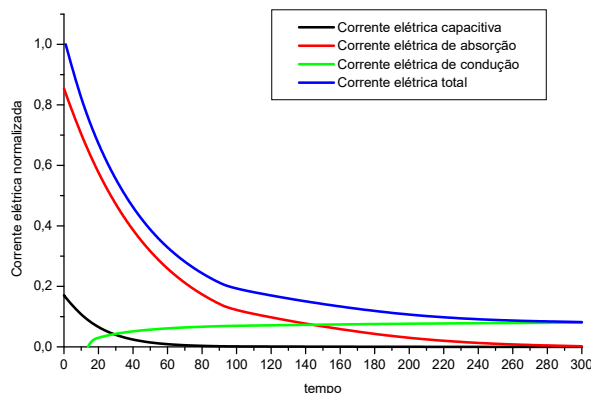
Desse modo, para se avaliar o comportamento dos mecanismos de polarização de um material, deve-se avaliar em diferentes condições quanto à resposta desses mecanismos, sendo o domínio do tempo e o domínio da frequência os dois modos de avaliação da resposta dielétrica de um material sujeito a um campo elétrico, seja esse campo constante ou variável.

2.6.5 Resposta dielétrica no domínio do tempo

Quando submetido a uma tensão DC, um material dielétrico pode apresentar diferentes tipos de corrente elétrica. Corrente elétrica capacitiva, que é aquela responsável por realizar a carga do capacitor. Corrente elétrica de absorção, responsável pela polarização do material. E a corrente elétrica de condução, que é a corrente que efetivamente flui através do material (COELHO, 2012).

A soma dessas três correntes representa a corrente elétrica total observada no material, conforme ilustra a Figura 11.

FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO DAS DIFERENTES CORRENTES ELÉTRICAS PRESENTES EM UM MATERIAL DIELÉTRICO EXPOSTO A UMA TENSÃO DC.



FONTE: Scholz (2013).

Considerando que a resposta de cada excitação seja a soma das respostas para cada excitação anterior individual, a polarização $P(t)$ se define como representado na equação 7:

$$P(t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t \phi(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (7)$$

Sendo ϕ a função relaxação dielétrica e τ o tempo de relaxação da polarização.

De forma que a polarização em presença de um campo elétrico constante, representada pela equação 8 seja dada por:

$$P(t) = E_0 \varepsilon_0 \int_0^t \phi(\tau) d\tau \quad (8)$$

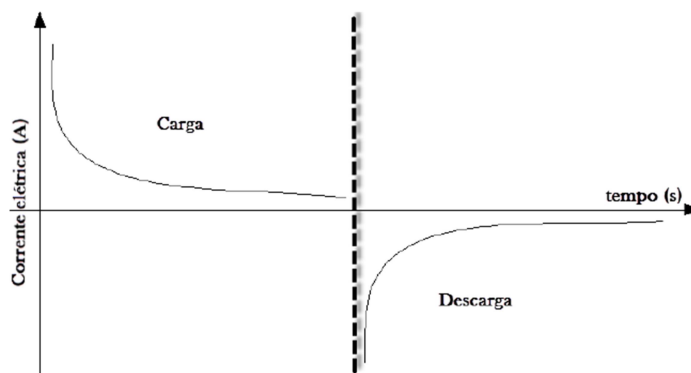
Sendo assim, a função resposta dielétrica no domínio do tempo, $\phi(t)$, se define como sendo a resposta provocada pela variação do campo elétrico na forma de uma função degrau (GROSS, 1971).

Para avaliação dos mecanismos de polarização lentos, como por exemplo a polarização por formação de dipolo elétrico, se faz necessária uma avaliação da resposta dielétrica na presença de um campo elétrico constante, com a verificação da corrente elétrica no material em função do tempo. A fim de se eliminar os efeitos das correntes capacitivas e de condução nos processos de polarização, se faz

necessária a avaliação da corrente em um longo intervalo de tempo, considerando que as correntes capacitiva e de condução estarão em equilíbrio com a corrente de absorção. Desse modo, é possível avaliar a ocorrência dos mecanismos mais lentos e comparar os níveis de corrente elétrica permeando o material. Analogamente, se pode comparar os diferentes materiais em função da corrente elétrica presente no processo de polarização.

A Figura 12 ilustra os processos de polarização e despolarização observando-se a resposta dielétrica no domínio do tempo.

FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DAS DIFERENTES CORRENTES ELÉTRICAS PRESENTES EM UM MATERIAL DIELÉTRICO EXPOSTO A UMA TENSÃO DC.



FONTE: Hernaski (2013).

Pode-se observar, na Figura 12, que no processo de carga, ou polarização, a presença do campo elétrico faz com que a corrente tenda a um valor constante ao longo de um tempo tendendo ao infinito. Já quando o campo elétrico é retirado, será observada uma corrente de descarga, ou despolarização, levando o material novamente ao estágio de equilíbrio presente anteriormente ao processo de polarização.

2.6.6 Resposta dielétrica no domínio da frequência

Aplicando-se a Transformada de Fourier na equação 7, tem-se a polarização P em função da frequência do campo elétrico E , representada pela equação 11:

$$P(\omega) = \varepsilon_0 \chi(\omega)E(\omega) \quad (11)$$

Sendo $P(\omega)$ e $E(\omega)$ respectivamente as transformadas da polarização e do campo elétrico dependentes do tempo e ω a frequência angular. Já a função susceptibilidade $X(\omega)$ depende da frequência e é definida através da transformada da função resposta $\phi(t)$, como representado na equação 12:

$$X(\omega) = X'(\omega) - iX''(\omega) = \int_0^{\infty} \phi(t)e^{-i\omega t} dt \quad (12)$$

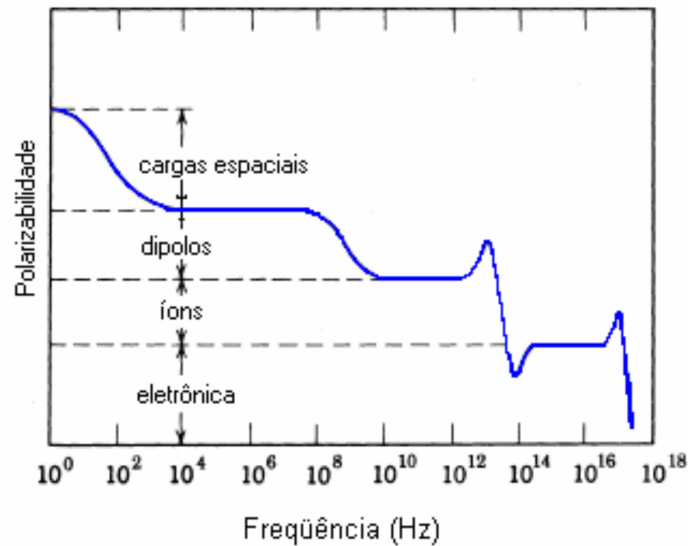
Onde a parte real da susceptibilidade $X'(\omega)$ fornece a amplitude da polarização e a parte imaginária $X''(\omega)$ está relacionada com a reatância do material.

Em contraponto ao citado na resposta no domínio do tempo, ainda sobre o campo elétrico, pode-se concluir que os diferentes mecanismos de polarização vão ocorrer principalmente em função da intensidade e da frequência do campo elétrico. Os mecanismos de dipolo e cargas espaciais ocorrem nas faixas de frequência mais baixas, demandando menor energia para ocorrer, por se tratar apenas de uma orientação espacial das cargas. Já os mecanismos de polarização iônica e eletrônica ocorrem nas faixas de frequência mais elevadas, demandando maior energia, por se tratar de mecanismos de separação ou transporte de cargas (GENTILINI, 2012).

Cada um dos mecanismos pode ser avaliado separadamente através de análise espectroscópica do comportamento de resposta do material em função da variação da frequência de um campo elétrico alternado. Avaliando graficamente essa resposta, podem-se verificar regiões onde a polarizabilidade varia fortemente com a frequência. Essas regiões são chamadas de regiões de dispersão e estão associadas especificamente com cada tipo de mecanismo presente no material (GUERRA, 2004).

A Figura 13 mostra graficamente a ocorrência dos mecanismos em função da frequência do campo elétrico atuando no material.

FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO DOS MECANISMOS DE POLARIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DO CAMPO ELÉTRICO.



FONTE: Kowalski (2006).

Pela avaliação da Figura 13, pode-se perceber que mecanismos de polarização por cargas espaciais ocorrem em frequências de até 10^2 Hz. Mecanismos de formação de dipolos ocorrem em até 10^8 Hz. Mecanismos de polarização iônica ocorrem em torno de 10^{14} Hz e mecanismos de polarização eletrônica ocorrem em frequência mais elevadas, de até 10^{18} Hz.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados no presente projeto estão listados na Tabela 7.

TABELA 7 – Materiais utilizados no desenvolvimento do sensor termocrômico.

	Material	Nome Comercial	Fornecedor
Cera	Parafina industrial macrocristalina	PARAFINA BR 60/63°C - 1% e 2% óleo	Petrobrás
Pigmentos	Pigmento Laranja	Colorfix 43992/07 MB PO LARANJA	Colorfix
	Pigmento Magenta	Colorfix 44142/06 MB PO MAGENTA	Colorfix
	Pigmento Violeta	Colormix Macrolex Violeta B Gran CHA 230333	Lanxess
Isolador	Isolador polimérico	Isolador de Pino Polimérico 15kV	Ancora Industrial
Polímero	PLA	Poliácido Láctico	Boa Impressão 3D

FONTE: O Autor (2019).

3.2 MÉTODO

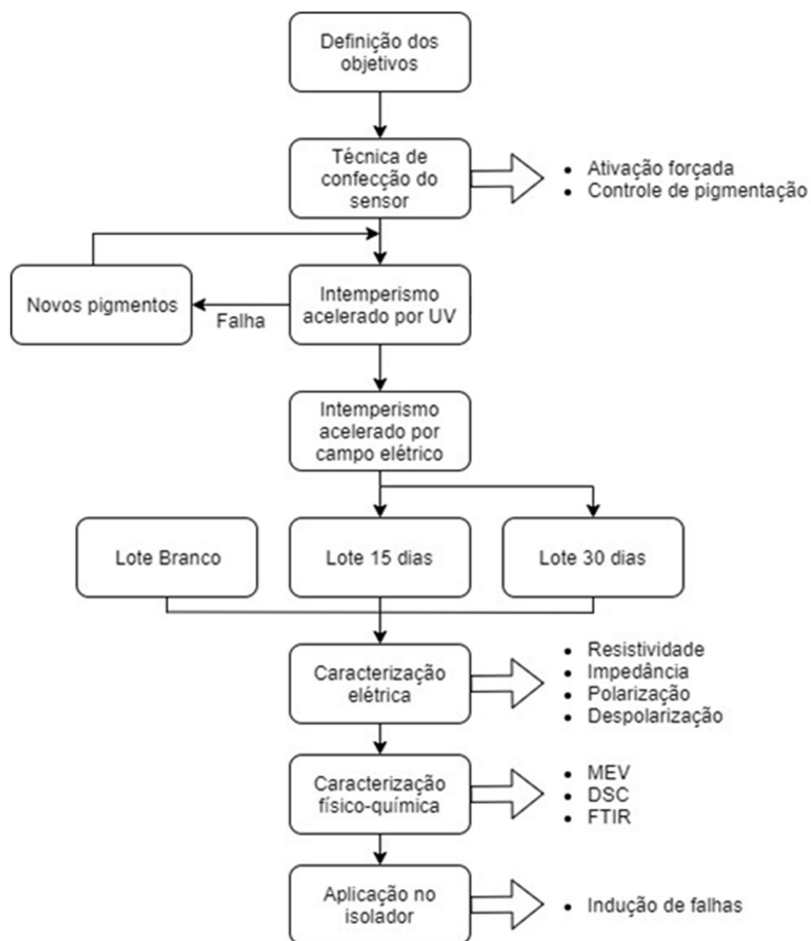
Como relatado anteriormente, o presente trabalho fundamenta-se na dificuldade de se detectar falhas em isoladores poliméricos tipo pino nas linhas de distribuição de energia elétrica.

Pesquisas de campo podem ser definidas como quantitativa-descritiva, exploratório e experimental. Segundo Marconi e Lakatos (2017), uma pesquisa exploratória se define como uma investigação de pesquisa empírica cujo objetivo principal é desenvolver hipóteses para a solução de um problema, e uma pesquisa experimental tende a complementar a pesquisa exploratória, sendo aquela que testa as hipóteses levantadas, corroborando ou descartando tal hipótese como solução do problema.

Seguindo essas definições, o presente trabalho visa levantar uma hipótese, bem como corroborá-la como uma solução para o problema enfrentado na dificuldade de detecção de falhas em isoladores poliméricos tipo pino.

O fluxograma da Figura 14 representa esquematicamente o passo a passo da pesquisa, que será explicado detalhadamente a seguir.

FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DA PESQUISA.



FONTE: O Autor (2019).

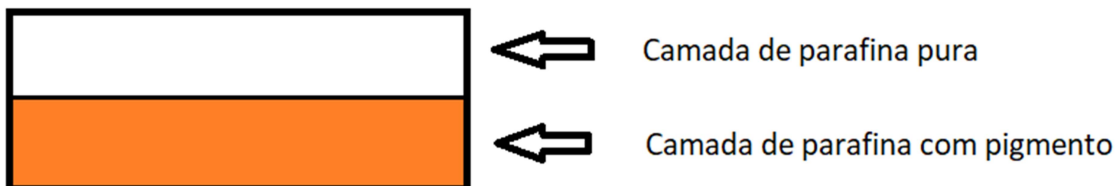
3.2.1 Definição dos objetivos

Com a situação problema proposta, envolvendo a dificuldade na detecção de falhas prematuras nos isoladores poliméricos tipo pino, foram definidos os objetivos envolvidos na pesquisa, focados principalmente na caracterização da cera de parafina como um dielétrico capaz de ser aplicado no desenvolvimento de um sensor termocrômico aplicável aos isoladores poliméricos.

3.2.2 Técnica de confecção do sensor termocrômico

O sensor desenvolvido consiste em um sistema com duas camadas, sendo a camada inferior uma camada de parafina dopada com pigmento colorido e a camada superior com parafina pura. A Figura 15 representa esquematicamente o sensor desenvolvido.

FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SENSOR TERMOCRÔMICO DESENVOLVIDO.



FONTE: O Autor (2019).

Antes da confecção do sensor, se faz necessária a confecção do recipiente no qual o sensor será produzido. O recipiente será impresso utilizando uma impressora 3D (marca Stella e modelo 2) e o polímero PLA, o poliácido láctico. A Figura 16 apresenta a impressora utilizada e a Figura 17 representa o recipiente impresso, inicialmente vazio e sequencialmente com as camadas do sensor já aplicadas.

FIGURA 16 – IMPRESSORA UTILIZADA NA CONFEÇÃO DO RECIPIENTE DO SENSOR.



FONTE: O Autor (2019).

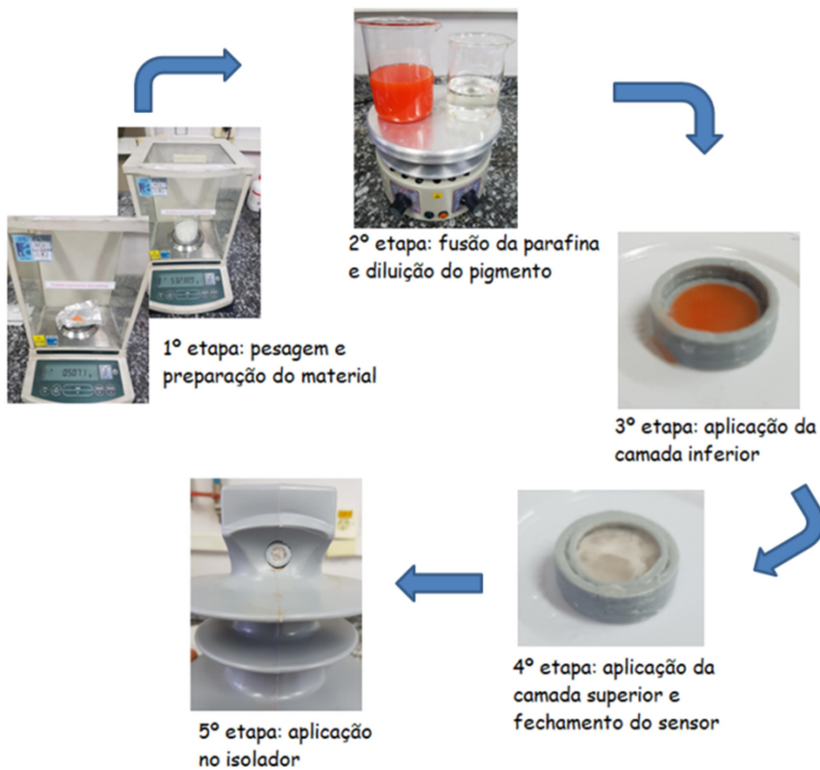
FIGURA 17 – RECIPIENTE UTILIZADO PARA CONFECCÃO DO SENSOR.



FONTE: O Autor (2019).

A Figura 18 representa esquematicamente as etapas de desenvolvimento do sensor termocrômico.

FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ETAPAS DE CONFECCÃO SENSOR TERMOCRÔMICO DESENVOLVIDO.



FONTE: O Autor (2019).

O processo de ativação consiste na fusão entre as duas camadas, fazendo com que a camada superior, anteriormente apenas com parafina pura, se converta em uma camada colorida, pela fusão com a camada inferior dopada com pigmento.

3.2.3 Intemperismo acelerado por UV

Como o sensor será aplicado nos isoladores em ambiente externo, será necessário avaliar como o sensor se comportará mediante exposição às intempéries, principalmente a radiação ultravioleta.

Para avaliação do desempenho dos materiais mediante exposição à radiação ultravioleta, serão feitas medições 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 como parâmetro de medição. A escala RGB (*Red-Green-Blue*, ou Vermelho-Verde-Azul em português) representa as medições, em uma escala de valores que varia de 0 a 1023, o teor de cada uma das três cores da escala nas amostras avaliadas. Para entendimento, na escala de valores, 0 significa ausência da cor em questão e 1023 significa a presença total da cor avaliada. O resultado das análises será sempre o conjunto das 3 cores avaliadas na escala.

A Figura 19 mostra a câmara utilizada no envelhecimento acelerado por exposição à radiação ultravioleta.

FIGURA 19 – CÂMARA PARA ENVELHECIMENTO POR EXPOSIÇÃO À ULTRAVIOLETA.



FONTE: O Autor (2019).

3.2.4 Envelhecimento acelerado por campo elétrico

Após a definição do pigmento a ser utilizado, a etapa seguinte consiste no envelhecimento elétrico para posterior caracterização do material.

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 ao real, com campo elétrico de valores aproximados e aumento da frequência do campo, para que se alcance o envelhecimento acelerado do sensor (LEGUENZA, 2003).

Segundo Toledo et al. (2009), um isolador polimérico possui vida útil estimada em 15 anos. Desse modo, foram definidas 2 etapas do envelhecimento acelerado, induzindo cenários que representem 8 e 16 anos de exposição do sensor. Assim, será possível avaliar a tendência degradativa em função do tempo de exposição.

As amostras utilizadas possuem a espessura aproximada de 3 mm. A espessura do isolamento na cabeça do isolador, possui uma distancia entre fase e terra de 3 cm. Para uma tensão de 8 kV em um isolador, para o mesmo campo elétrico foi aplicado 800 V sob as amostras.

A Tabela 8 ilustra os valores de frequência normal e frequência utilizada no ensaio de envelhecimento, bem como o tempo correspondente para cada ensaio.

TABELA 8 – Dados de frequência utilizados no envelhecimento elétrico acelerado.

FREQUÊNCIA NORMAL (Hz)	FREQUÊNCIA DE ENVELHECIMENTO (Hz)
60	12000
DIAS EQUIVALENTES	
1	200
DIAS DE ENSAIO LOTE 1	
15	30
DIAS EQUIVALENTES	
3000	6000
ANOS EQUIVALENTES	
8,22	16,44

FONTE: O Autor (2019).

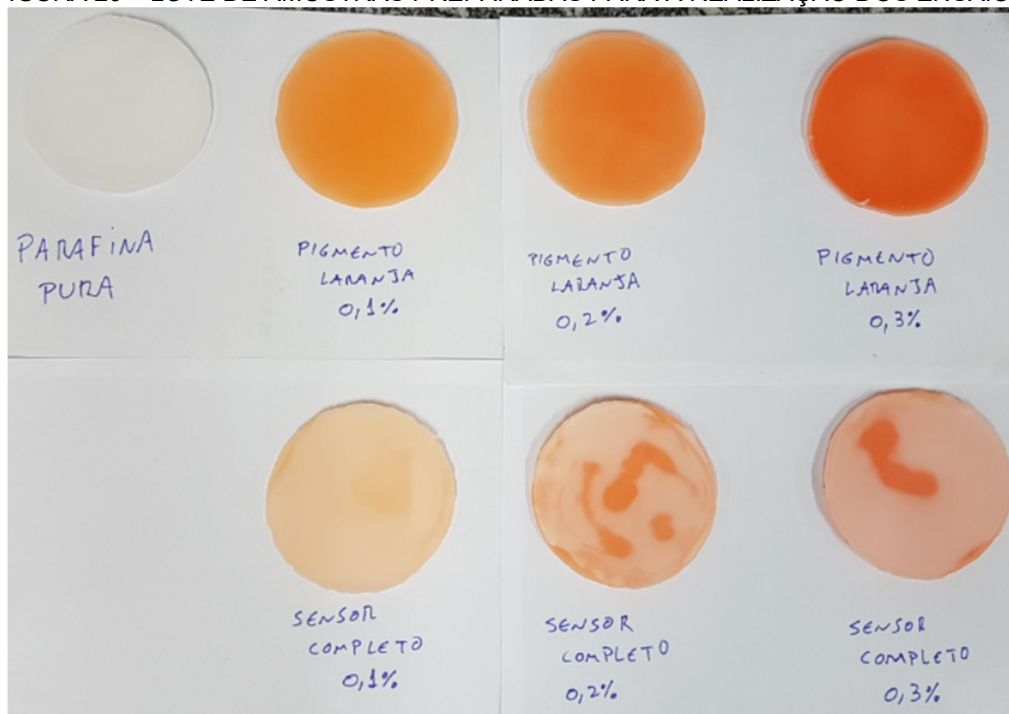
Para realização do ensaio foram utilizados uma fonte de tensão (Trek modelo 20/20C), um gerador de função (Agilent 33210A) e um osciloscópio (Tektronix TPS2024).

Para o envelhecimento elétrico e posterior caracterização dos materiais, foram preparados 3 lotes de amostras para envelhecimento elétrico e posterior caracterização, sendo cada lote constituído das seguintes amostras:

- 1 amostra de parafina pura, representando a camada superior do sensor;
- 3 amostras de parafina com diluição do pigmento para ocorrência do efeito termocrômico, nas concentrações de 0,1%, 0,2% e 0,3%;
- 3 amostras representando o sensor completo, com a camada inferior de parafina com pigmento, nas concentrações de 0,1%, 0,2% e 0,3%, e a camada superior de parafina pura.

A Figura 20 representa um lote de amostras produzidas para o envelhecimento elétrico.

FIGURA 20 – LOTE DE AMOSTRAS PREPARADAS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.



FONTE: O Autor (2019).

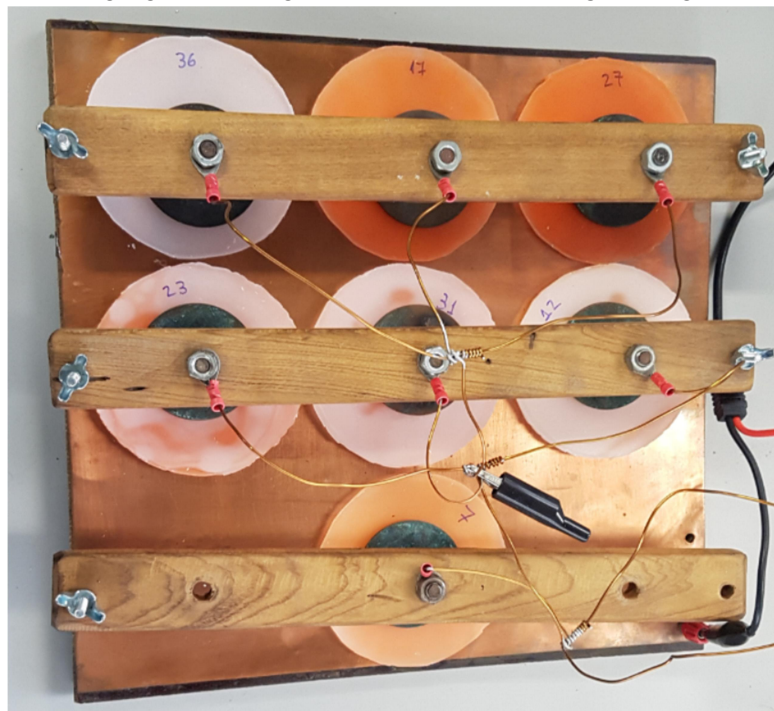
A Figura 21 mostra os equipamentos utilizados no ensaio de envelhecimento elétrico acelerado. Já as Figuras 22 e 23 mostram as amostras dispostas para ensaio.

FIGURA 21 – EQUIPAMENTOS PARA ENVELHECIMENTO ELÉTRICO DO PRIMEIRO LOTE DE AMOSTRAS (30 DIAS).



FONTE: O Autor (2019).

FIGURA 22 – PRIMEIRO LOTE DE AMOSTRAS PARA ENVELHECIMENTO ELÉTRICO (15 DIAS).



FONTE: O Autor (2019).

FIGURA 23 – SEGUNDO LOTE DE AMOSTRAS PARA ENVELHECIMENTO ELÉTRICO (30 DIAS).



FONTE: O Autor (2019).

3.2.5 Caracterização elétrica

Para avaliação do desempenho do material, antes e após o envelhecimento elétrico acelerado, se mostram relevantes ensaios que possam mostrar como o material se comportou, e se o material manteve, mesmo após o envelhecimento elétrico, características de um material dielétrico. Desse modo, a caracterização elétrica foi definida com a realização dos seguintes ensaios:

- Resistividade elétrica

O ensaio de resistividade tem por objetivo avaliar a resistividade elétrica do material, a fim de avaliar as propriedades dielétricas desse material. Esse ensaio foi realizado seguindo norma técnica ASTM D 257 (ASTM, 2014).

A Figura 24 ilustra o equipamento utilizado para realização do ensaio de resistividade elétrica, fabricante Agilent, modelo 4339B.

FIGURA 24 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO MATERIAL.



FONTE: O Autor (2019).

- Espectrometria por Impedância

A Espectrometria por Impedância tem como objetivo avaliar, no domínio da frequência, eventual ocorrência de mecanismos de relaxação dielétrica no material, pois o mesmo está constantemente sujeito ao campo elétrico, e a polarização pode ser um problema na aplicação do sensor. Esse ensaio foi realizado seguindo a norma técnica ASTM D 150 (ASTM, 2018).

A Figura 25 ilustra o equipamento analisador de impedância, fabricante Solartron, modelo SI 1260, e a interface dielétrica, fabricante Solartron, modelo 1296, equipamentos utilizados para análise de Espectrometria por Impedância.

FIGURA 25 – EQUIPAMENTOS PARA ENSAIO DE ESPECTROMETRIA POR IMPEDÂNCIA.



FONTE: O Autor (2019).

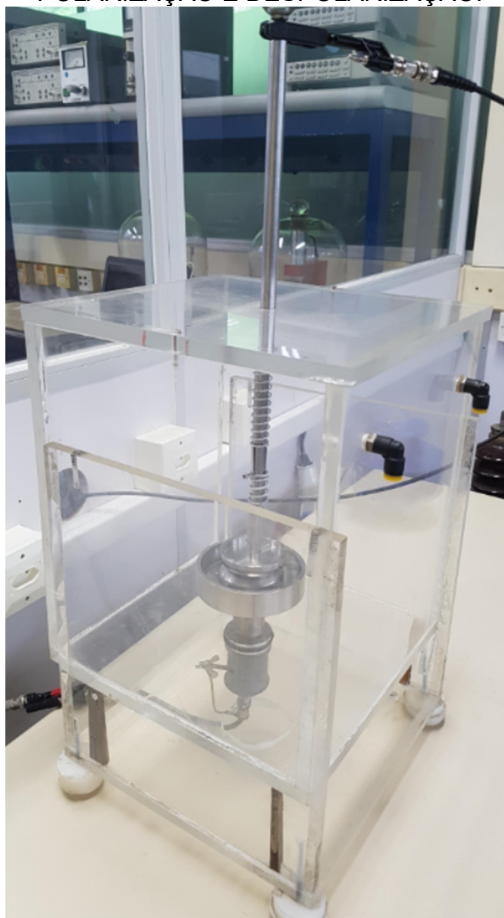
- Polarização e Despolarização

Os ensaios de Polarização e Despolarização, realizados sequencialmente, visam identificar e mensurar, no domínio do tempo, a magnitude de uma eventual polarização do material. Para realização desses ensaios são utilizadas uma fonte de tensão (HP 6521A) e um eletrômetro (Keithley 617), além de um dispositivo para conexão desses à amostra analisada.

O ensaio consiste inicialmente em colocar a amostra em curto-circuito durante 600 segundos. Após esse tempo, a polarização é iniciada e ocorre durante 600 segundos. Como última etapa, a despolarização da amostra ocorre também durante 600 segundos. Com isso, as curvas de polarização e despolarização são construídas.

As Figuras 26 e 27 ilustram esses equipamentos.

FIGURA 26 – DISPOSITIVO PARA COLOCAÇÃO DAS AMOSTRAS DURANTE ENSAIO DE POLARIZAÇÃO E DESPOLARIZAÇÃO.



FONTE: O Autor (2019).

FIGURA 27 – FONTE DE TENSÃO E ELETRÔMETRO PARA ENSAIO DE POLARIZAÇÃO E DESPOLARIZAÇÃO.



FONTE: O Autor (2019).

3.2.6 Caracterização Físico-Química

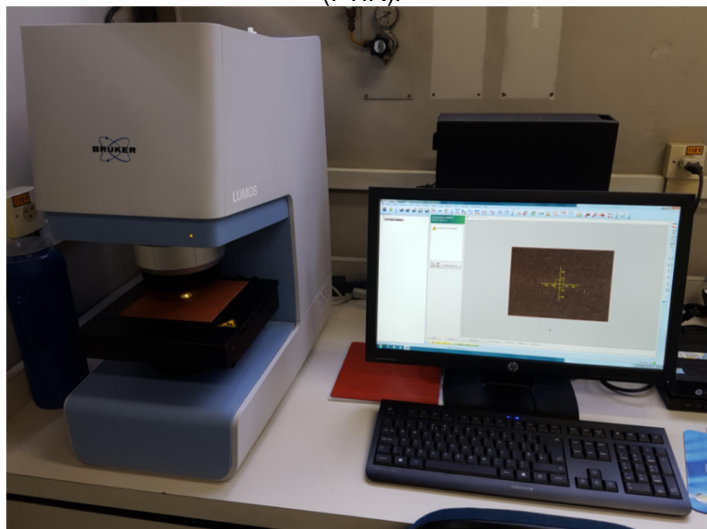
Adicionalmente à caracterização elétrica, foram definidos os seguintes ensaios de caracterização química do material:

- Espectroscopia por Infravermelho (FTIR)

A Espectroscopia por Infravermelho visa identificar a presença de possíveis grupos carbônicos oriundos da degradação pelo envelhecimento elétrico do material. Esse ensaio permite avaliar o comportamento do material mediante envelhecimento, sendo fundamental na caracterização do sensor como viável para a aplicação no isolador polimérico. Esse ensaio foi realizado seguindo a norma técnica ASTM E 1252 (ASTM, 2013).

A Figura 28 ilustra o equipamento de análise de Espectroscopia por Infravermelho (FTIR). Foi utilizado o equipamento do fabricante Bruker, modelo Lumos. Para essa análise, a amostra foi cortada com auxílio de um estilete e foi feita análise em perfil. Foi utilizada a técnica de ATR, com 6 pontos diferentes de varredura, do interior até a superfície da amostra.

FIGURA 28 – EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA POR INFRAVERMELHO (FTIR).



FONTE: O Autor (2019).

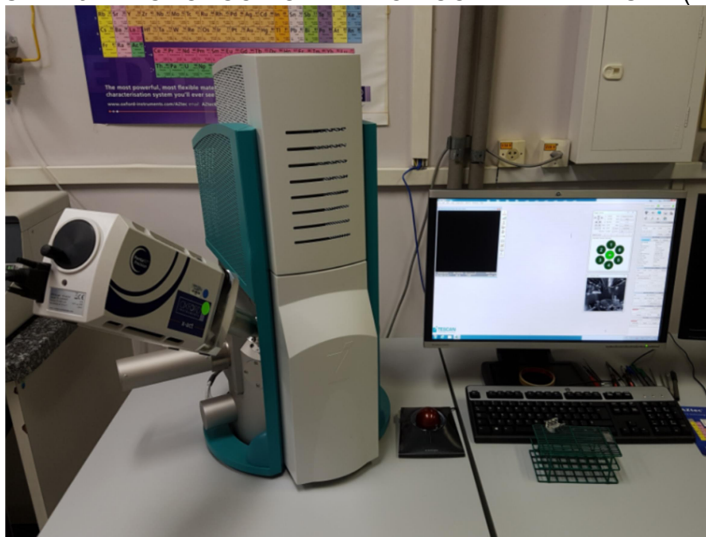
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura visa identificar possíveis alterações morfológicas na estrutura do material, antes e depois do envelhecimento acelerado realizado.

Para realização do ensaio, por se tratar de material dielétrico, ou seja, que tende a não conduzir eletricidade, se faz necessária a realização do procedimento de metalização, onde é feita a deposição de íons metálicos na amostra, para facilitar o processo de condução de elétrons e a formação das imagens no microscópio. Nesse caso, foram utilizados íons do metal ouro. Após a metalização, as amostras são normalmente inseridas e analisadas no microscópio eletrônico de varredura, com temperatura ambiente de 20 graus Celsius.

A Figura 29 ilustra o microscópio eletrônico de varredura utilizado. Fabricante Tescan e modelo Vega 3.

FIGURA 29 – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).



FONTE: O Autor (2019).

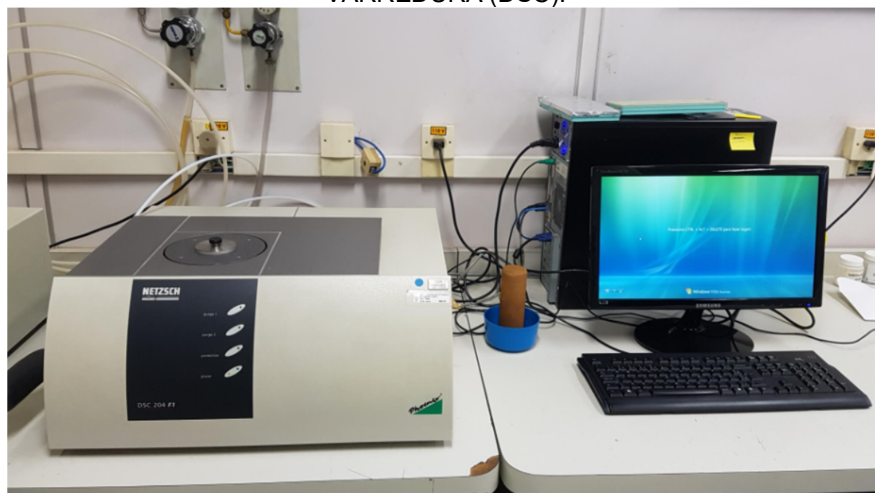
- Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) é um ensaio térmico que mede as temperaturas e o fluxo de calor associado com as transições dos materiais em função da temperatura e do tempo. Esse ensaio permite identificar, comparativamente, eventuais variações no ponto de fusão do material antes e após o envelhecimento, sendo importante ferramenta para acompanhar o desempenho do material. Esse ensaio foi realizado seguindo a norma técnica ASTM D 3418 (ASTM, 2015).

O ensaio foi realizado em atmosfera inerte de nitrogênio, com taxa de aquecimento de 10 graus Celsius por minuto, faixa de temperatura de 0 °C a 120 °C, tendo sido realizadas 3 varreduras com coletas de 10 pontos por grau Celsius.

A Figura 30 ilustra o equipamento utilizado para a análise de DSC, fabricante Netzsch, modelo DSC 204 F1.

FIGURA 30 – EQUIPAMENTO PARA ANÁLISE DE CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).



FONTE: O Autor (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

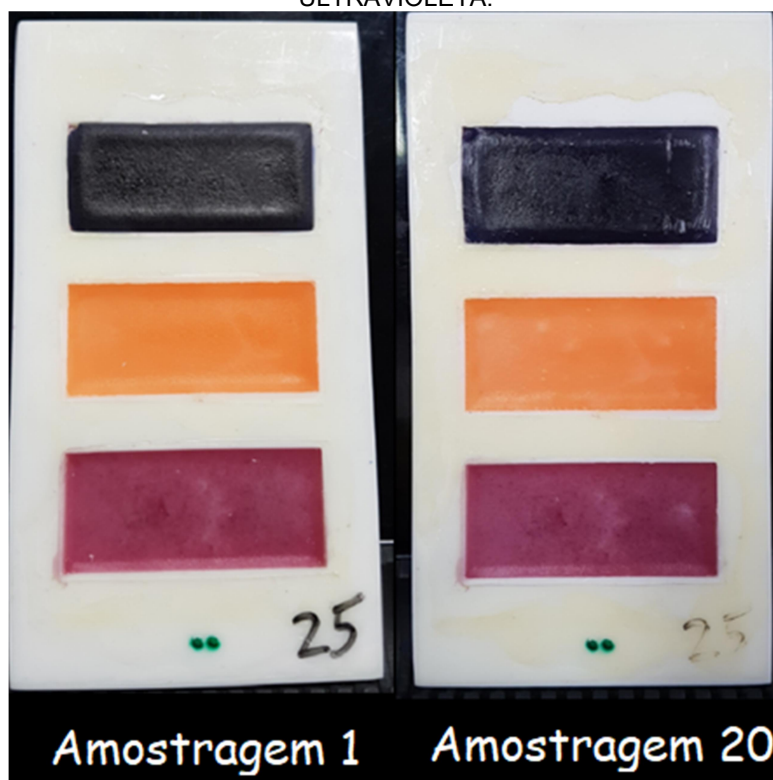
4.1 Intemperismo acelerado por radiação ultravioleta

O intemperismo acelerado por radiação ultravioleta visa avaliar o comportamento dos diferentes pigmentos mediante exposição à radiação ultravioleta, caracterizando o pigmento como estável ou não a essa exposição.

Durante o processo de envelhecimento, que atingiu o total de 3118 horas de exposição à radiação ultravioleta, as amostras foram semanalmente avaliadas com o uso do colorímetro.

A Figura 31 ilustra as amostras em dois momentos distintos: as amostras antes do início do envelhecimento (Amostragem 1), e as amostras na última coleta de dados no colorímetro antes do encerramento do ensaio (Amostragem 20).

FIGURA 31 – AMOSTRAS DOS PIGMENTOS ENVELHECIDAS EM EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA.



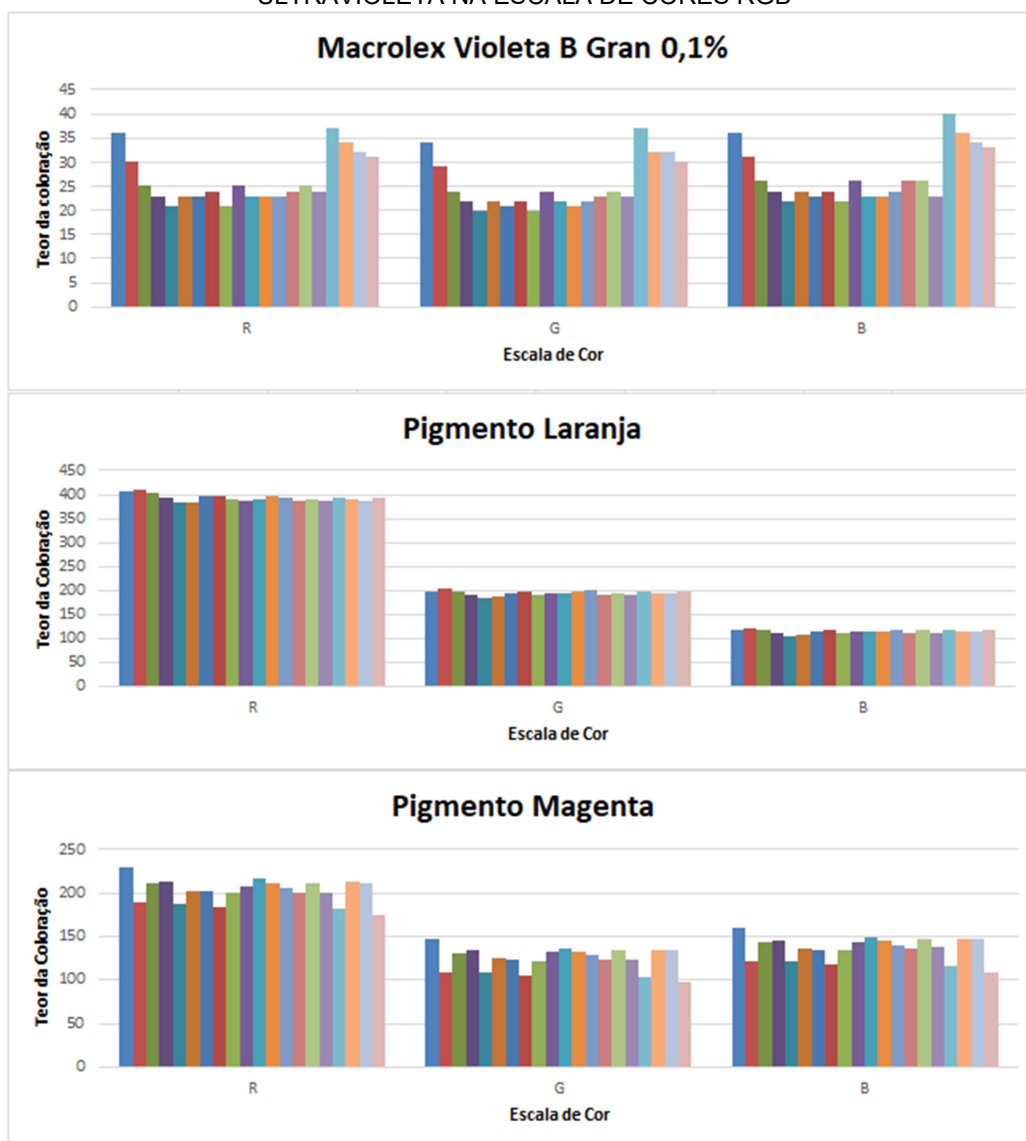
FONTE: O Autor (2019).

Como citado na metodologia, a avaliação pelo colorímetro mostra como resultado uma combinação de valores na escala RGB, que representam, respectivamente, os teores de vermelho, verde e azul, em escala adimensional que

varia de 0 a 1023. Desse modo, será apresentado graficamente um conjunto onde cada gráfico representa a variação do teor de cada uma das cores da escala.

A Figura 32 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, sendo cada barra a representação do valor obtido em cada análise, realizadas a cada 164 horas, aproximadamente. Dessa forma, cada conjunto de barras apresenta vinte valores, evoluindo cronologicamente da esquerda (Amostragem 1) para a direita (Amostragem 20).

FIGURA 32 – AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DOS PIGMENTOS EM EXPOSIÇÃO ULTRAVIOLETA NA ESCALA DE CORES RGB



FONTE: O Autor (2019).

Pela avaliação do descritivo técnico dos pigmentos, pode-se constatar que os pigmentos violeta e magenta são compostos orgânicos e o pigmento laranja é um composto inorgânico (LANXESS, 2009; COLORFIX, 2019).

Observando a Figura 32, pela análise dos resultados dos três pigmentos (violeta, laranja e magenta) na escala *RGB* ao longo do tempo total de envelhecimento por exposição à radiação ultravioleta, pode-se constatar uma maior estabilidade do pigmento laranja nas três cores da escala. Os pigmentos violeta e magenta apresentaram maior instabilidade ao longo do tempo, tendo inclusive apresentado variações positivas e negativas dos resultados. Esses resultados experimentais corroboram o que se esperava, pois por ser um pigmento inorgânico, o pigmento laranja se mostra naturalmente mais resistente à degradação por exposição à radiação ultravioleta.

Desse modo, o pigmento escolhido para confecção do sensor termocrômico foi o pigmento laranja, sendo esse o único pigmento utilizado nas demais etapas da pesquisa.

4.2 Resistividade superficial e volumétrica

Conforme os materiais e métodos, cada lote de amostras possui sete amostras diferentes, sendo uma amostra de parafina pura, três amostras com diferentes concentrações de pigmento, representando apenas a camada inferior do sensor, e três amostras representando o sensor completo, com a camada inferior com diferentes concentrações de pigmento e a camada superior com parafina pura.

As Tabelas 9 e 10 mostram os valores de resistividade superficial e volumétrica de todas as amostras analisadas ao longo do projeto. Na primeira linha se observam as amostras sem envelhecimento. Na segunda e terceira linhas, as amostras com diferentes tempos de envelhecimento elétrico acelerado.

TABELA 9 – Resistividade superficial das amostras

Tempo de envelhecimento	Resistividade Superficial ($\Omega \cdot \text{cm}$)						
	Parafina Pura	0,1% Puro	0,1% Completo	0,2% Puro	0,2% Completo	0,3% Puro	0,3% Completo
0	$7,1 \cdot 10^{17}$	$5,5 \cdot 10^{14}$	$7,3 \cdot 10^{14}$	$5,4 \cdot 10^{14}$	$7,1 \cdot 10^{14}$	$8,3 \cdot 10^{14}$	$6,9 \cdot 10^{14}$
15 dias	$9,0 \cdot 10^{17}$	$8,4 \cdot 10^{18}$	$2,1 \cdot 10^{18}$	$4,9 \cdot 10^{17}$	$3,5 \cdot 10^{18}$	$5,9 \cdot 10^{17}$	$5,5 \cdot 10^{17}$
30 dias	$2,3 \cdot 10^{17}$	$6,2 \cdot 10^{17}$	$8,2 \cdot 10^{17}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$7,5 \cdot 10^{18}$	$3,6 \cdot 10^{17}$	$7,7 \cdot 10^{17}$

FONTE: O Autor (2019).

Na Tabela 9 pode-se observar que não houve variação significativa na resistividade superficial das amostras, independente da concentração e do tempo de envelhecimento elétrico. Constatou-se, inclusive, que em alguns casos a resistividade se elevou após o envelhecimento elétrico das amostras.

TABELA 10 – Resistividade volumétrica das amostras

Tempo de envelhecimento	Resistividade Volumétrica (Ω)						
	Parafina Pura	0,1% Puro	0,1% Completo	0,2% Puro	0,2% Completo	0,3% Puro	0,3% Completo
0	$2,4 \cdot 10^{16}$	$2,6 \cdot 10^{16}$	$7,1 \cdot 10^{15}$	$1,1 \cdot 10^{15}$	$8,0 \cdot 10^{15}$	$5,0 \cdot 10^{17}$	$3,4 \cdot 10^{15}$
15 dias	$8,5 \cdot 10^{16}$	$1,9 \cdot 10^{17}$	$7,4 \cdot 10^{16}$	$1,7 \cdot 10^{17}$	$9,5 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{17}$	$6,5 \cdot 10^{16}$
30 dias	$1,8 \cdot 10^{17}$	$9,8 \cdot 10^{16}$	$1,6 \cdot 10^{17}$	$5,6 \cdot 10^{16}$	$1,6 \cdot 10^{17}$	$5,8 \cdot 10^{16}$	$1,0 \cdot 10^{17}$

FONTE: O Autor (2019).

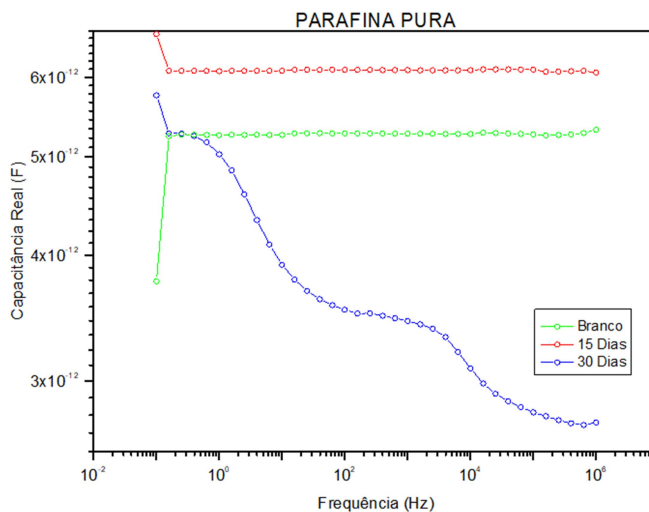
Analogamente, na Tabela 10 pode-se observar que não houve variação significativa também na resistividade volumétrica das amostras, inclusive tendo ocorrido aumento da resistividade em alguns casos.

Desse modo, tanto na resistividade superficial quanto na resistividade volumétrica, pode-se concluir que as propriedades dielétricas do material se mantiveram efetivas mesmo com o envelhecimento elétrico das amostras.

4.3 Espectrometria de Impedância

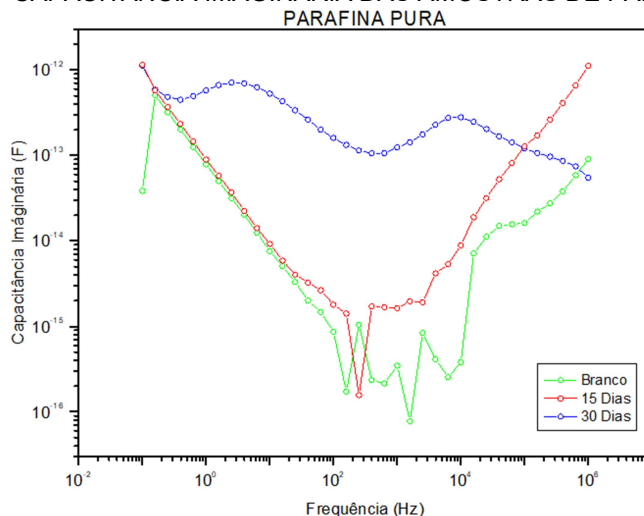
As Figuras a seguir, 33 a 46, ilustram os resultados das análises de espectrometria de impedância. Esses ensaios visam avaliar o comportamento da resposta dielétrica do material no domínio da frequência, antes e após envelhecimento elétrico acelerado, e avaliar os mecanismos de ressonância presentes no material.

FIGURA 33 – CAPACITÂNCIA REAL DAS AMOSTRAS DE PARAFINA PURA.



Fonte: O Autor (2019).

FIGURA 34 – CAPACITÂNCIA IMAGINÁRIA DAS AMOSTRAS DE PARAFINA PURA.

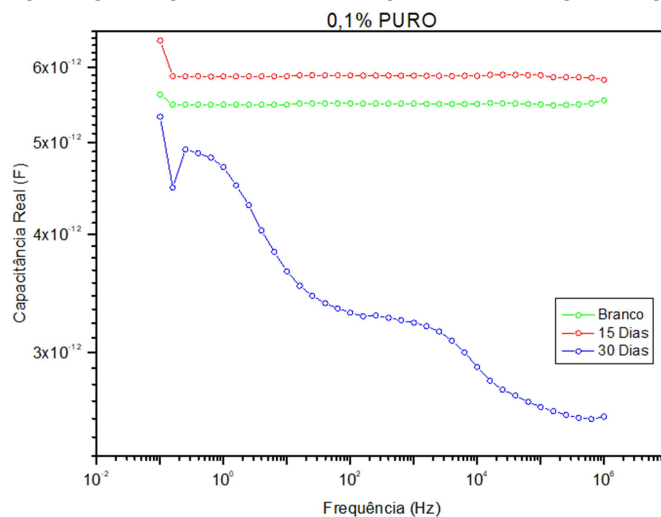


Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 33, pode-se observar a componente de armazenamento nas amostras de parafina pura. Esse comportamento mostra a ocorrência de cargas

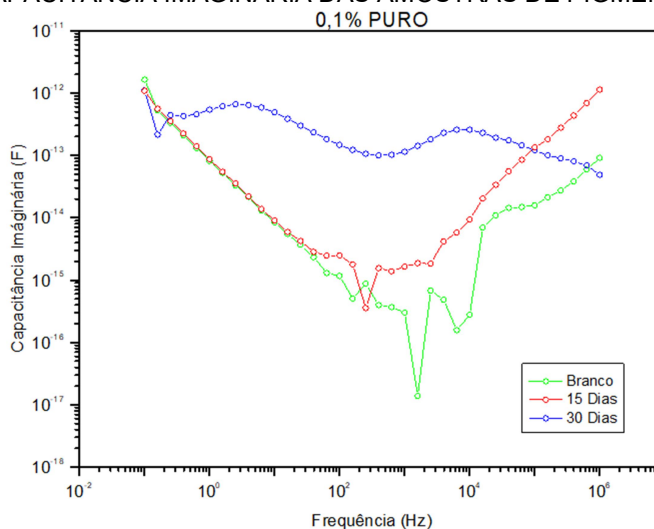
espaciais (frequência em torno de 10^2 Hz) e dipolo elétrico (frequência em torno de 10^4 Hz), evidenciado na amostra com 30 dias de envelhecimento. Na amostra sem envelhecimento e com envelhecimento intermediário de 15 dias não se observam mecanismos similares. Já na Figura 34 observa-se a presença de uma componente de perda, a qual reforça o comportamento apresentado na componente de armazenamento. Os mecanismos de relaxação dielétrica também ocorreram apenas na amostra com 30 dias de envelhecimento elétrico acelerado.

FIGURA 35 – CAPACITÂNCIA REAL DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

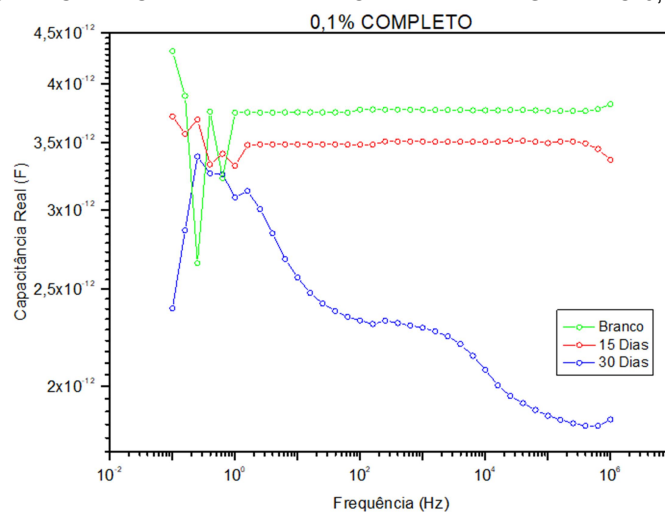
FIGURA 36 – CAPACITÂNCIA IMAGINÁRIA DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

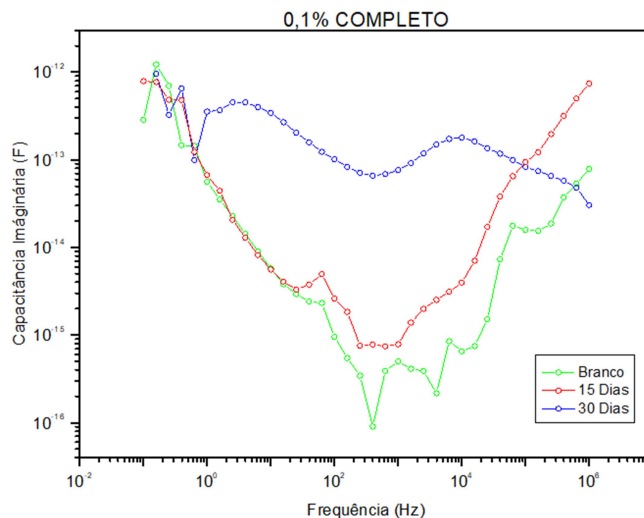
Avaliando amostras com presença de pigmento na parafina em concentração de 0,1%, observa-se na Figura 35 a presença da componente de armazenamento nestas amostras em função do envelhecimento elétrico acelerado. Já na Figura 36 observa-se, a componente de perda destas amostras. Esses comportamentos mostram a ocorrência de cargas espaciais (frequência em torno de 10^2 Hz) e dipolo elétrico (frequência em torno de 10^4 Hz) para a amostra com 30 dias de envelhecimento acelerado, similar às amostras de parafina pura (Figuras 33 e 34). Essas duas figuras avaliam apenas a camada inferior, sem a presença da camada superior com parafina pura.

FIGURA 37 – CAPACITÂNCIA REAL DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% COMPLETO.



Fonte: O Autor (2019).

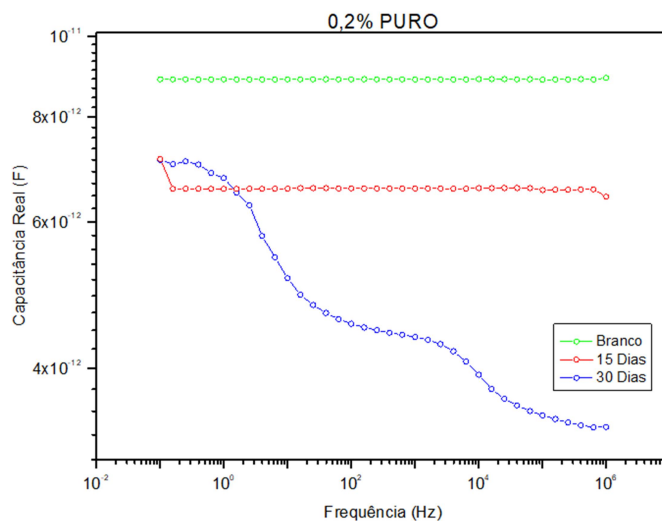
FIGURA 38 – CAPACITÂNCIA IMAGINÁRIA DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% COMPLETO.



Fonte: O Autor (2019).

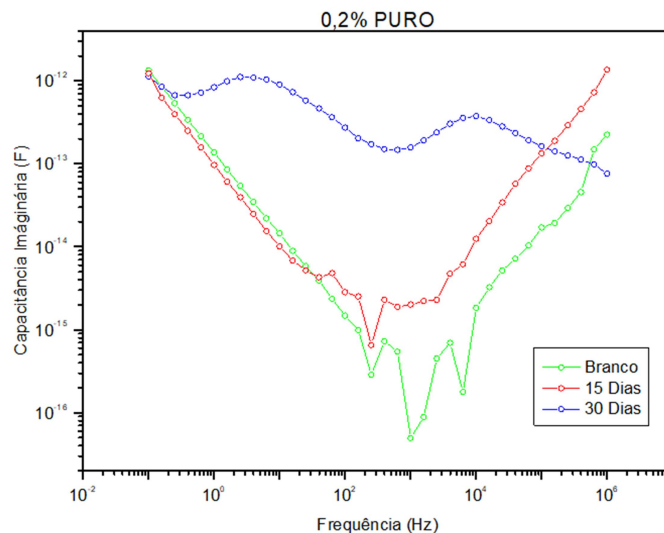
Já na Figura 37, com o sensor completo e a camada inferior com concentração de 0,1% de pigmento, pode-se observar a presença da componente de armazenamento nas amostras. Na Figura 38 observa-se a componente de perda para estas amostras. Esse comportamento mostra a ocorrência de cargas espaciais (frequência em torno de 10^2 Hz) e dipolo elétrico (frequência em torno de 10^4 Hz) na amostra com 30 dias de envelhecimento. Essas duas últimas figuras mostram que a presença da uma interface entre as duas camadas não interfere na formação de diferentes mecanismos de relaxação, uma vez que o comportamento foi similar com ocorrido sem a presença da interface entre as diferentes camadas do sensor. Embora não se tenha medido efeitos de Maxwell-Wagner, pode-se afirmar isso por comparação as amostra de parafina pura e de uma única camada.

FIGURA 39 – CAPACITÂNCIA REAL DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

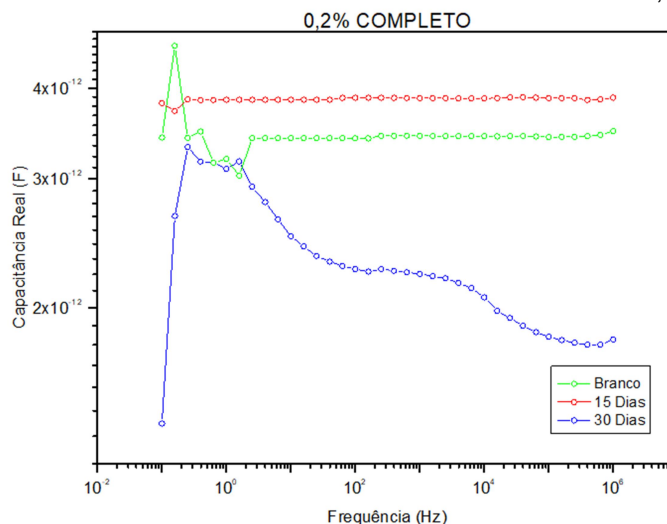
FIGURA 40 – CAPACITÂNCIA IMAGINÁRIA DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

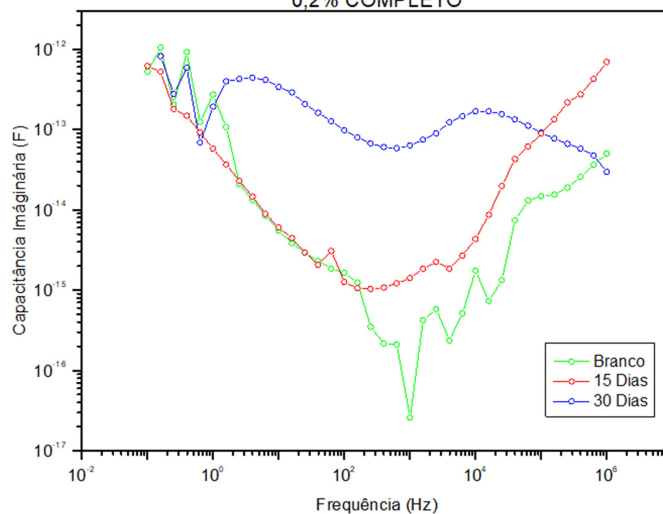
Avaliando amostras com presença de pigmento na parafina em concentração de 0,2%, observa-se na Figura 39 a presença da componente de armazenamento nestas amostras em função do envelhecimento elétrico acelerado. Já na Figura 40 observa-se, a componente de perda destas amostras. Esses comportamentos mostram a ocorrência de cargas espaciais (frequência em torno de 10^2 Hz) e dipolo elétrico (frequência em torno de 10^4 Hz) para a amostra com 30 dias de envelhecimento acelerado, similar às amostras de parafina pura (Figuras 33 e 34). Essas duas figuras avaliam apenas a camada inferior com pigmento.

FIGURA 41 – CAPACITÂNCIA REAL DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% COMPLETO.



Fonte: O Autor (2019).

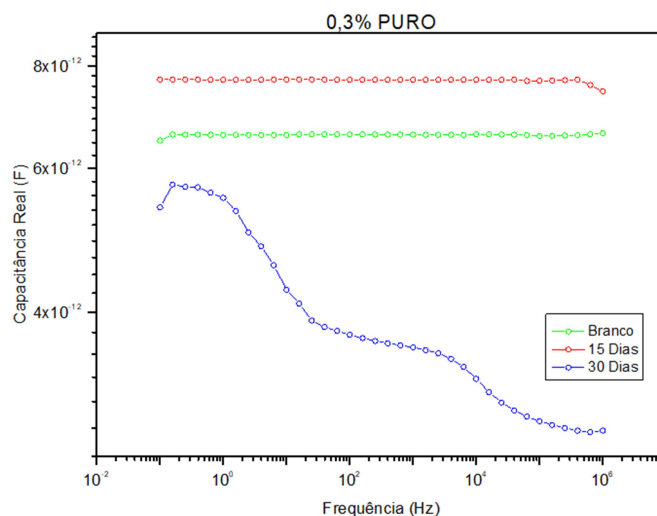
FIGURA 42 – CAPACITÂNCIA IMAGINÁRIA DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% COMPLETO.



Fonte: O Autor (2019).

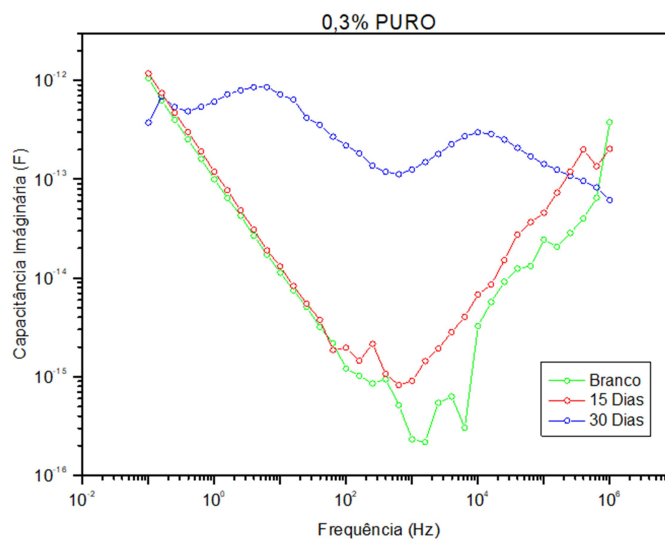
Já na Figura 41, com o sensor completo e a camada inferior com concentração de 0,2% de pigmento, pode-se observar a presença da componente de armazenamento nas amostras. Na Figura 42 observa-se a componente de perda para estas amostras. Esse comportamento mostra a ocorrência de cargas espaciais (frequência em torno de 10^2 Hz) e dipolo elétrico (frequência em torno de 10^4 Hz) na amostra com 30 dias de envelhecimento. Essas duas últimas figuras mostram que a presença da uma interface entre as duas camadas não interfere na formação de diferentes mecanismos de relaxação, uma vez que o comportamento foi similar com ocorrido sem a presença da interface entre as diferentes camadas do sensor. Embora não se tenha medido efeitos de Maxwell-Wagner, pode-se afirmar isso por comparação as amostra de parafina pura e de uma única camada.

FIGURA 43 – CAPACITÂNCIA REAL DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

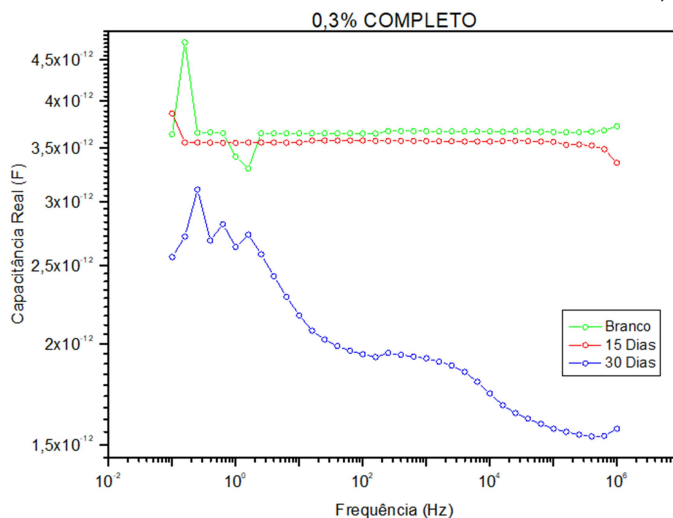
FIGURA 44 – CAPACITÂNCIA IMAGINÁRIA DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

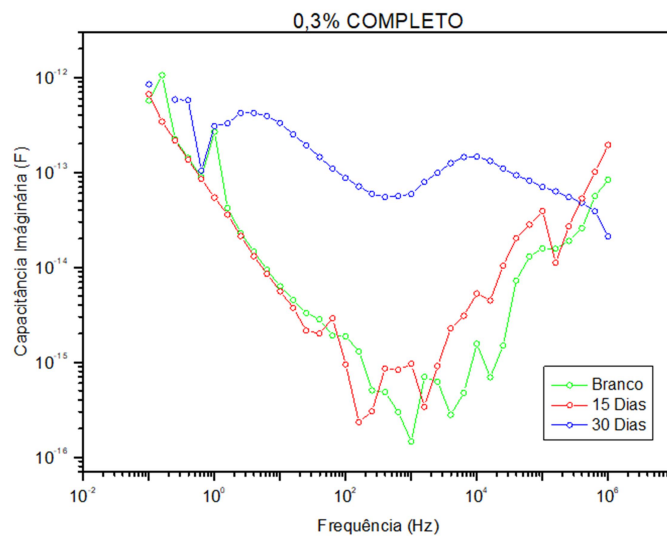
Avaliando amostras com presença de pigmento na parafina em concentração de 0,3%, observa-se na Figura 43 a presença da componente de armazenamento nestas amostras em função do envelhecimento elétrico acelerado. Já na Figura 44 observa-se, a componente de perda destas amostras. Esses comportamentos mostram a ocorrência de cargas espaciais (frequência em torno de 10^2 Hz) e dipolo elétrico (frequência em torno de 10^4 Hz) para a amostra com 30 dias de envelhecimento acelerado, similar às amostras de parafina pura (Figuras 33 e 34). Essas duas figuras avaliam apenas a camada inferior com pigmento.

FIGURA 45 – CAPACITÂNCIA REAL DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% COMPLETO.



Fonte: O Autor (2019).

FIGURA 46 – CAPACITÂNCIA IMAGINÁRIA DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% COMPLETO.



Fonte: O Autor (2019).

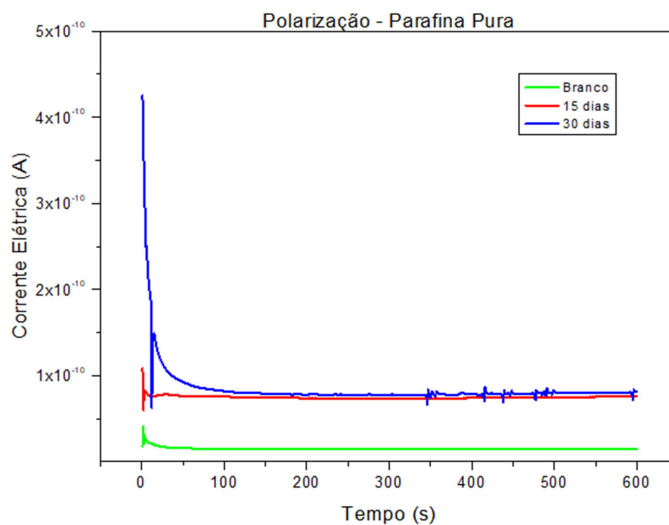
Já na Figura 45, com o sensor completo e a camada inferior com concentração de 0,3% de pigmento, pode-se observar a presença da componente de armazenamento nas amostras. Na Figura 46 observa-se a componente de perda para estas amostras. Esse comportamento mostra a ocorrência de cargas espaciais (frequência em torno de 10^2 Hz) e dipolo elétrico (frequência em torno de 10^4 Hz) na amostra com 30 dias de envelhecimento. Essas duas últimas figuras mostram que a presença da uma interface entre as duas camadas não interfere na formação de diferentes mecanismos de relaxação, uma vez que o comportamento foi similar com

ocorrido sem a presença da interface entre as diferentes camadas do sensor. Embora não se tenha medido efeitos de Maxwell-Wagner, pode-se afirmar isso por comparação as amostra de parafina pura e de uma única camada.

4.4 Polarização e Despolarização

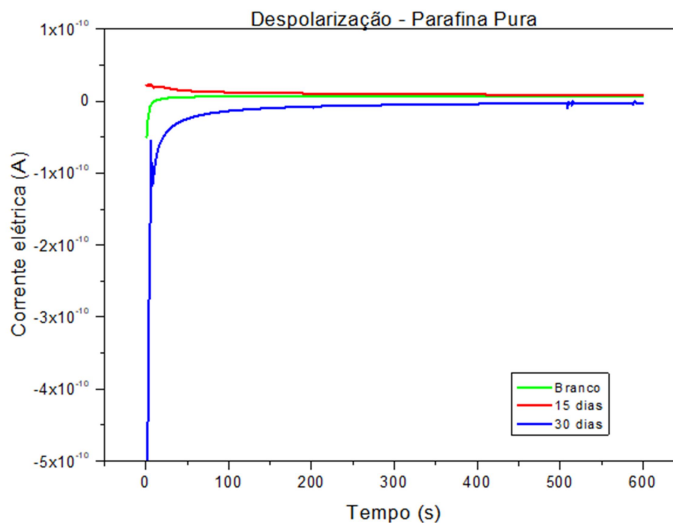
As figuras a seguir, 47 a 60, ilustram os resultados das análises de polarização e despolarização das amostras. Esses ensaios visam avaliar o comportamento da resposta dielétrica do material no domínio do tempo, antes e após envelhecimento elétrico acelerado.

FIGURA 47 – POLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PARAFINA PURA.



Fonte: O Autor (2019).

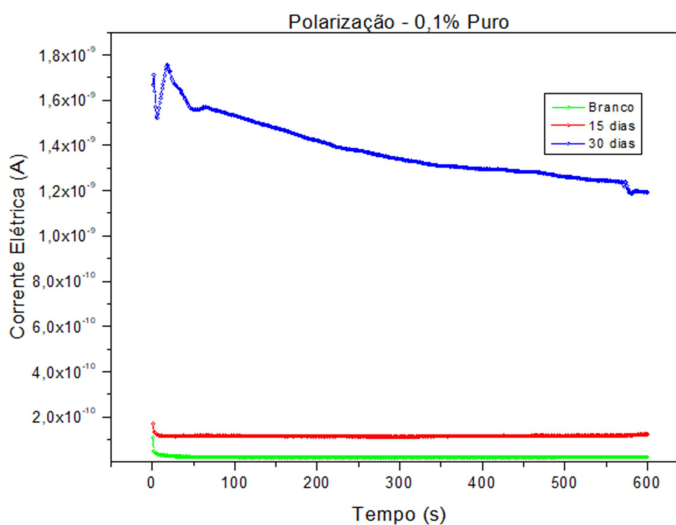
FIGURA 48 – DESPOLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PARAFINA PURA.



Fonte: O Autor (2019).

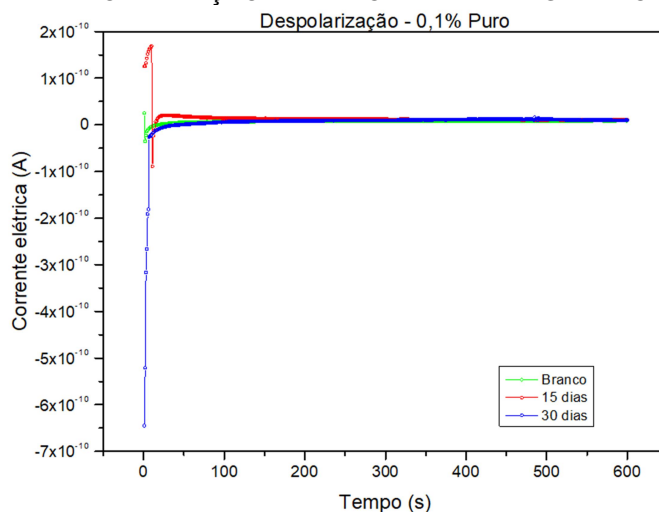
Na Figura 47, pode-se observar pequena variação na ordem de grandeza das correntes de polarização entre as amostras de parafina pura envelhecidas e a amostra sem envelhecimento. Já na Figura 48, pode-se observar que todas as amostras retornam ao nível de corrente muito baixo, na ordem de pA, quando submetidas ao processo de despolarização.

FIGURA 49 – POLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

FIGURA 50 – DESPOLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% PURO.

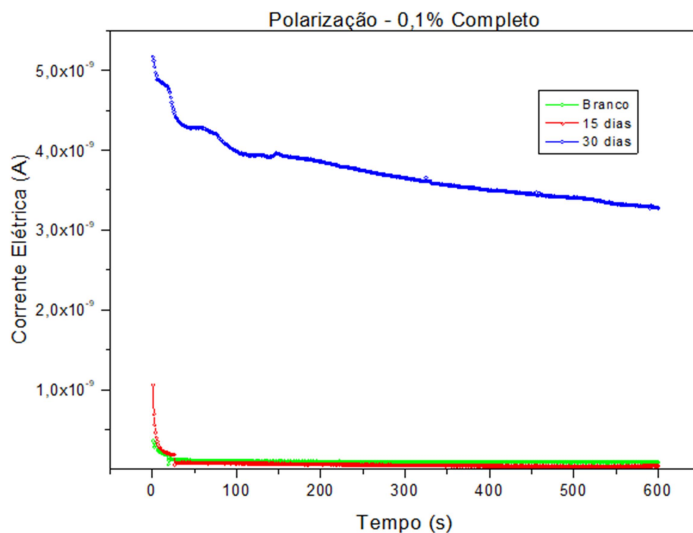


Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 49, pode-se observar pequena variação na ordem de grandeza das correntes de polarização entre as amostras de pigmento 0,1% puro

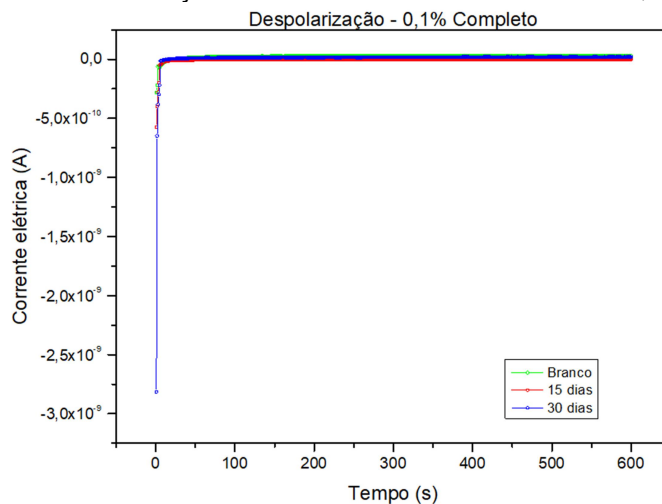
envelhecidas e a amostra sem envelhecimento. Já na Figura 50, pode-se observar que todas as amostras retornam ao nível de corrente muito baixo, na ordem de pA, quando submetidas ao processo de despolarização.

FIGURA 51 – POLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% COMPLETO.



Fonte: O Autor (2019).

FIGURA 52 – DESPOLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% COMPLETO.

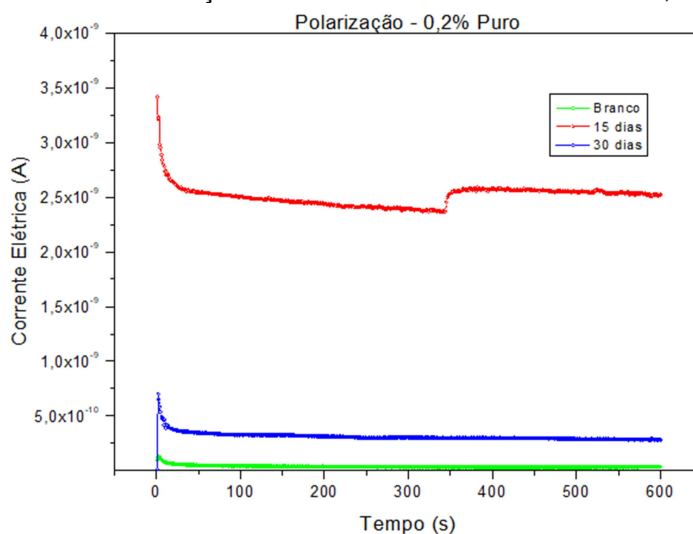


Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 51, pode-se observar pequena variação na ordem de grandeza das correntes de polarização entre as amostras de pigmento 0,1% completo envelhecidas e a amostra sem envelhecimento. Já na Figura 52, pode-se observar que todas as amostras retornam ao nível de corrente muito baixo, na ordem de pA, quando submetidas ao processo de despolarização. Apesar da ocorrência dos

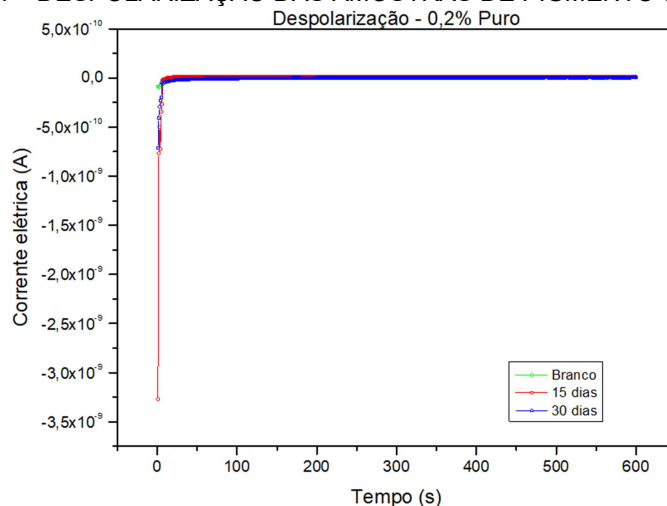
fenômenos de polarização, pode-se afirmar que nas amostras com as duas camadas, parafina pura e parafina dopada com pigmento, não se observaram efeitos de interface entre as duas camadas, pois o comportamento foi similar ao ocorrido nas amostras sem a presença da interface.

FIGURA 53 – POLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

FIGURA 54 – DESPOLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% PURO.

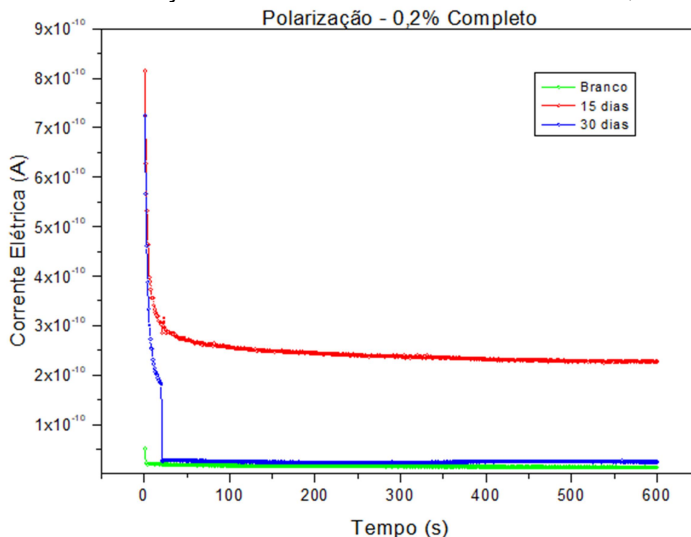


Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 53, pode-se observar pequena variação na ordem de grandeza das correntes de polarização entre as amostras de pigmento 0,2% puro envelhecidas e a amostra sem envelhecimento. Já na Figura 54, pode-se observar

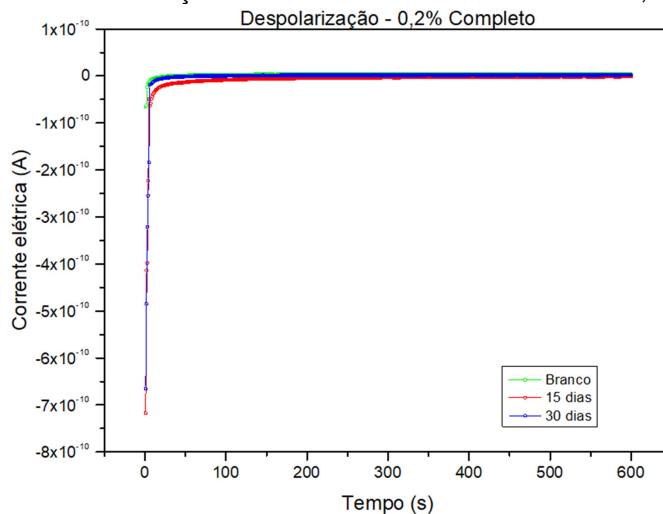
que todas as amostras retornam ao nível de corrente muito baixo, na ordem de pA, quando submetidas ao processo de despolarização.

FIGURA 55 – POLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% COMPLETO.



Fonte: O Autor (2019).

FIGURA 56 – DESPOLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% COMPLETO.

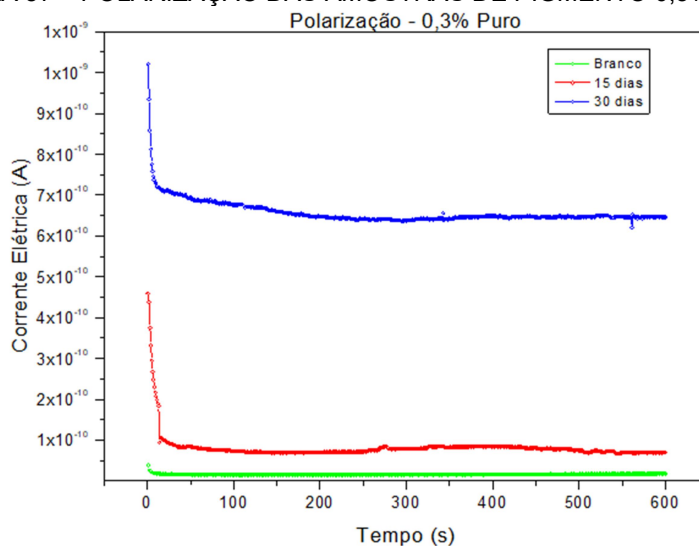


Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 55, pode-se observar pequena variação na ordem de grandeza das correntes de polarização entre as amostras de pigmento 0,2% completo envelhecidas e a amostra sem envelhecimento. Já na Figura 56, pode-se observar que todas as amostras retornam ao nível de corrente muito baixo, na ordem de pA, quando submetidas ao processo de despolarização. Apesar da ocorrência dos

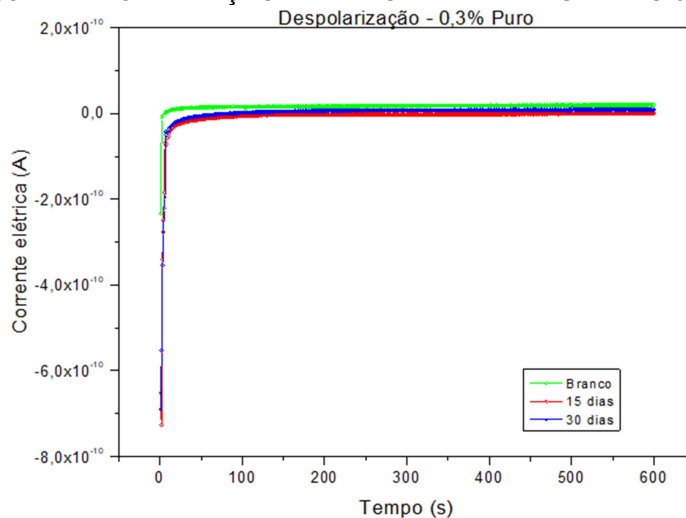
fenômenos de polarização, pode-se afirmar que nas amostras com as duas camadas, parafina pura e parafina dopada com pigmento, não se observaram efeitos de interface entre as duas camadas, pois o comportamento foi similar ao ocorrido nas amostras sem a presença da interface.

FIGURA 57 – POLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

FIGURA 58 – DESPOLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% PURO.



Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 57, pode-se observar pequena variação na ordem de grandeza das correntes de polarização entre as amostras de pigmento 0,3% puro envelhecidas e a amostra sem envelhecimento. Já na Figura 58, pode-se observar

que todas as amostras retornam ao nível de corrente muito baixo, na ordem de pA, quando submetidas ao processo de despolarização.

FIGURA 59 – POLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% COMPLETO.

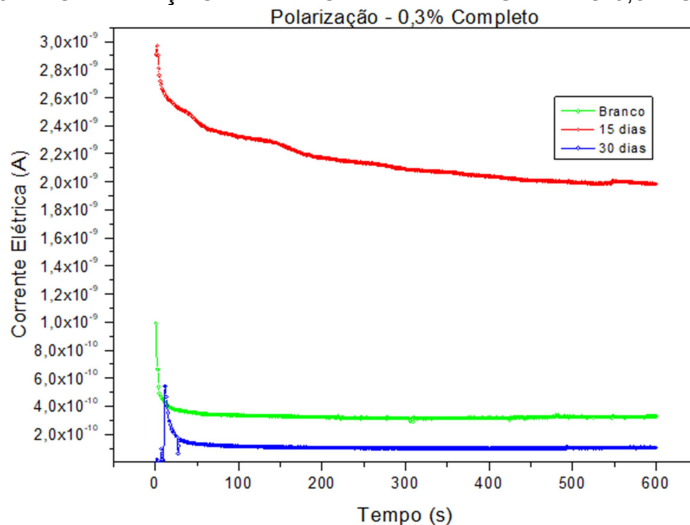
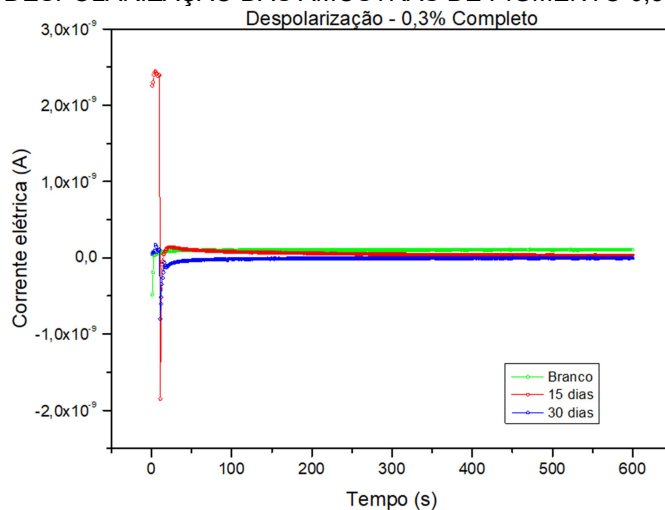


FIGURA 60 – DESPOLARIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% COMPLETO.



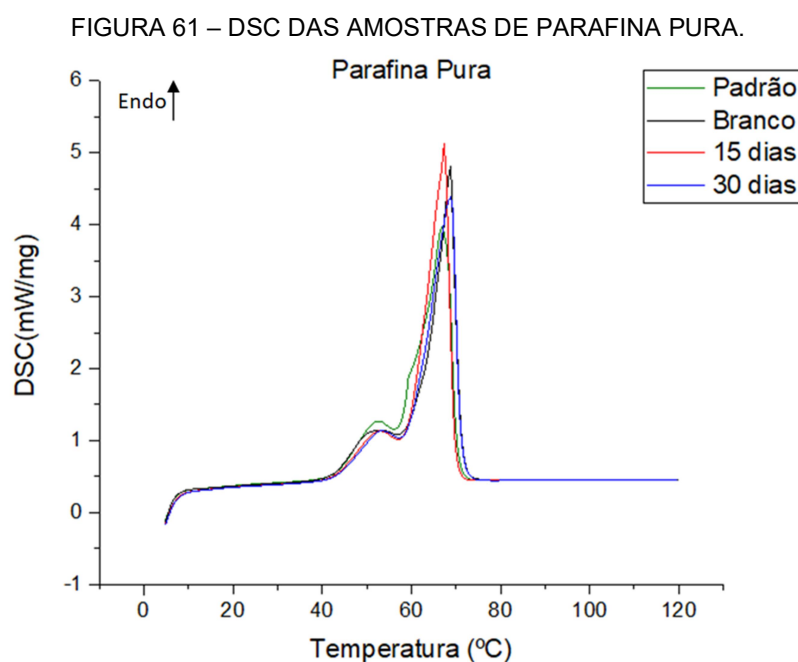
Na Figura 59, pode-se observar pequena variação na ordem de grandeza das correntes de polarização entre as amostras de pigmento 0,3% completo envelhecidas e a amostra sem envelhecimento. Já na Figura 60, pode-se observar que todas as amostras retornam ao nível de corrente muito baixo, na ordem de pA, quando submetidas ao processo de despolarização. Apesar da ocorrência dos fenômenos de polarização, pode-se afirmar que nas amostras com as duas

camadas, parafina pura e parafina dopada com pigmento, não se observaram efeitos de interface entre as duas camadas, pois o comportamento foi similar ao ocorrido nas amostras sem a presença da interface.

4.5 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Diferentemente dos ensaios elétricos, nos ensaios físico-químicos não foram analisadas as amostras com as duas camadas de parafina, pois a presença da interface entre as camadas, que poderia ser relevante nos ensaios elétricos e até mesmo interferir nos resultados, não se mostra relevante para os ensaios físico-químicos, visto que nesses ensaios são analisadas apenas pequenas frações de massa das amostras, sendo irrelevante a presença da interface.

As Figuras a seguir, 61 a 64, além das Tabelas 11 e 12, ilustram os resultados das análises de calorimetria exploratória diferencial (DSC) referentes à terceira varredura das amostras, que representa o segundo aquecimento. O primeiro aquecimento, bem como o resfriamento, visa eliminar das amostras quaisquer estados transitórios que possam aparecer. Esses ensaios visam avaliar as temperaturas de fusão das amostras, para verificar eventual degradação ocorrida no processo de envelhecimento elétrico das amostras do projeto.

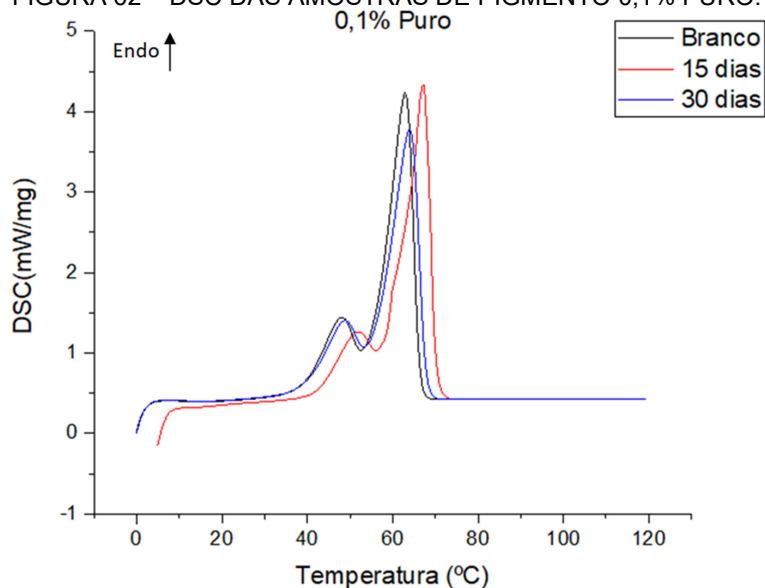


FONTE: O AUTOR (2019).

A amostra denominada como Padrão representa a parafina pura sem nenhum tratamento térmico. A análise dessa amostra visa eliminar possível interferência do tratamento térmico ocorrido para preparação das demais amostras do ensaio.

Para as amostras de parafina pura, pode-se observar na Figura 61 que não houve variação significativa nas temperaturas de cristalização e de fusão do material, tanto para os materiais não envelhecidos (parafina padrão e branco) quanto para os materiais envelhecidos (15 dias e 30 dias).

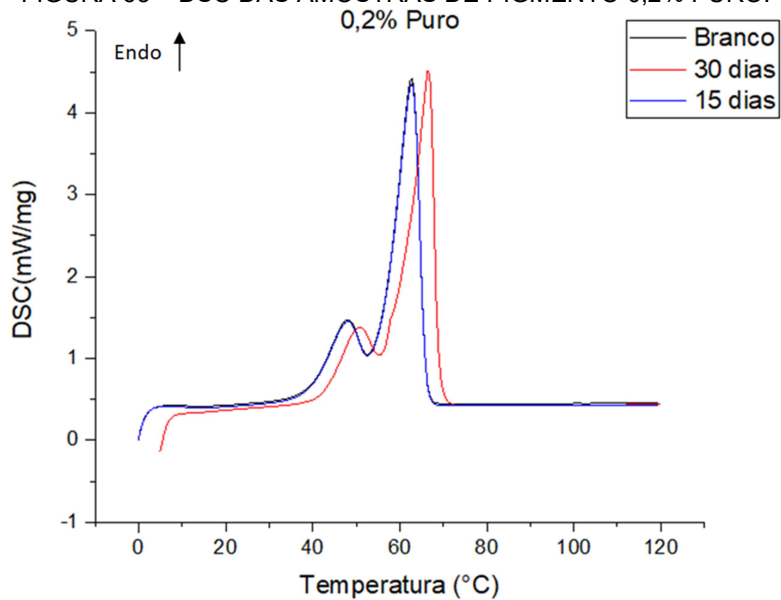
FIGURA 62 – DSC DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% PURO.



FONTE: O Autor (2019).

Para as amostras de pigmento 0,1% puro, observando a Figura 62, não se observou variação relevante nas temperaturas de cristalização e de fusão entre as amostras sem envelhecimento (branco) e com envelhecimento (15 dias e 30 dias).

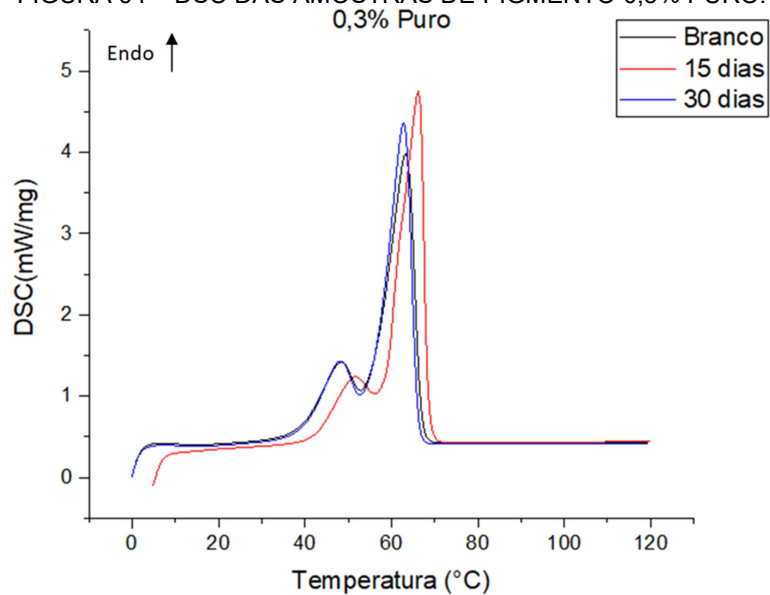
FIGURA 63 – DSC DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% PURO.



FONTE: O Autor (2019).

Para as amostras de pigmento 0,2% puro, pela análise da Figura 63 não se observou variação relevante nas temperaturas de cristalização e de fusão entre as amostras sem envelhecimento (branco) e com envelhecimento (15 dias e 30 dias).

FIGURA 64 – DSC DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% PURO.



FONTE: O Autor (2019).

Para as amostras de pigmento 0,3% puro, pela análise da Figura 64, não se observou variação relevante nas temperaturas de cristalização e de fusão entre as amostras sem envelhecimento (branco) e com envelhecimento (15 dias e 30 dias).

As Tabelas 11 e 12 mostram numericamente os valores das temperaturas de cristalização e de fusão para todas as amostras avaliadas na terceira varredura, ou segundo aquecimento, no DSC.

TABELA 11 – Temperatura de cristalização das amostras analisadas no DSC.

Cristalização (°C)	Parafina Pura	0,1% Puro	0,2% Puro	0,3% Puro
Branco	50,4	49,1	51,2	50,6
15 dias	52,2	51,9	50,9	51,7
30 dias	50,8	49,3	49,8	51,1

FONTE: O Autor (2019).

TABELA 12 – Temperatura de fusão das amostras analisadas no DSC.

Temperatura de Fusão (°C)	Parafina Pura	0,1% Puro	0,2% Puro	0,3% Puro
Branco	65,4	65,2	65,9	66,2
15 dias	67,9	67,1	66,5	66,2
30 dias	67,1	65,9	65,1	65,1

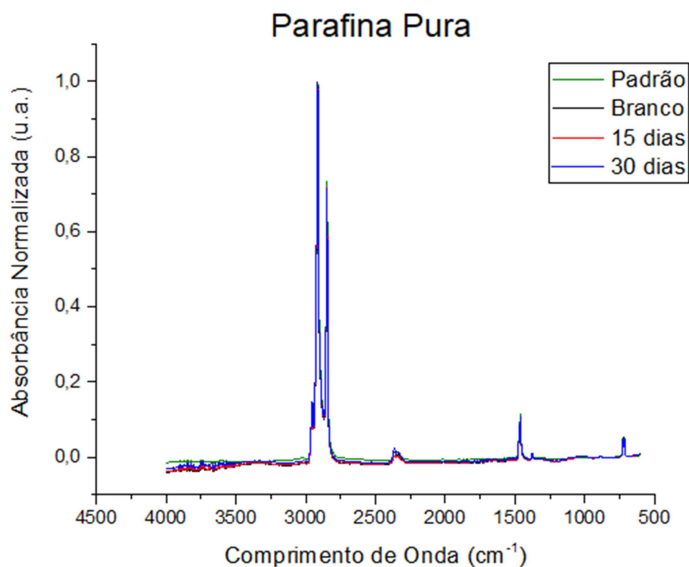
FONTE: O Autor (2019).

Pelas Tabelas 11 e 12 pode-se observar comparativamente que não houve variação significativa das temperaturas de cristalização e de fusão das diversas amostras analisadas, tanto antes quanto depois do envelhecimento elétrico acelerado.

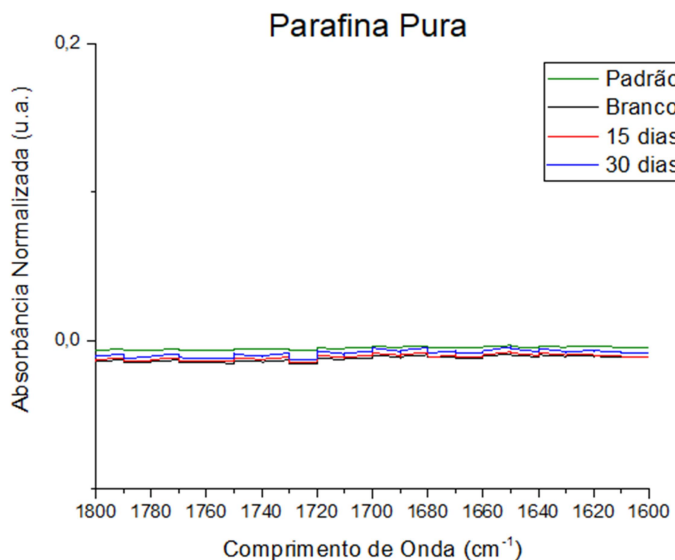
4.6 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

As Figuras a seguir, 65 a 72, ilustram os resultados das análises de espectroscopia no infravermelho (FTIR). Esses ensaios visam avaliar eventual degradação ocorrida no processo de envelhecimento elétrico das amostras do projeto.

FIGURA 65 – FTIR DAS AMOSTRAS DE PARAFINA PURA.



FONTE: O Autor (2019).

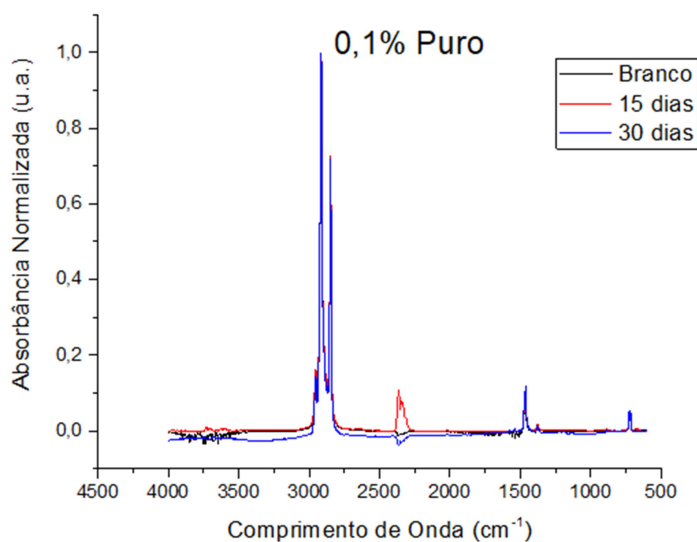
FIGURA 66 – FTIR DAS AMOSTRAS DE PARAFINA PURA NA REGIÃO DE 1800cm^{-1} A 1600cm^{-1} .

FONTE: O Autor (2019).

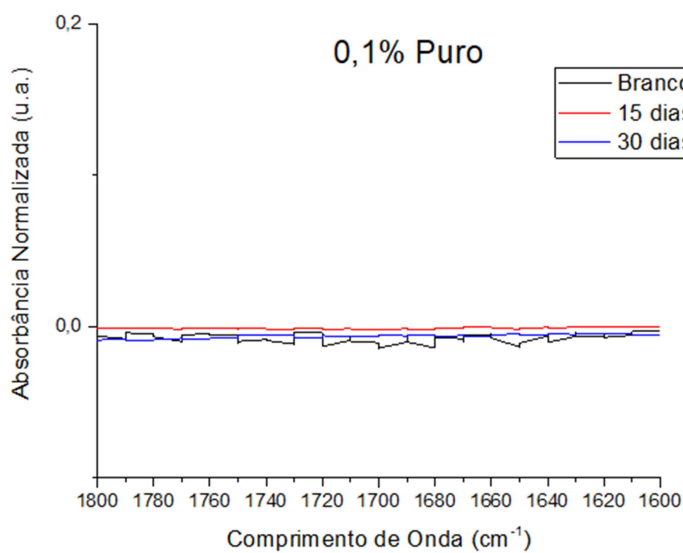
Pela análise do gráfico da Figura 65, pode-se observar que não foram detectadas alterações significativas nas amostras de parafina pura, comparando as amostras envelhecidas com as amostras não envelhecidas.

O gráfico da Figura 66 representa a visualização específica da região de comprimento de onda entre 1600 e 2000 cm^{-1} , pois essa seria a região aonde se evidenciaria a formação de dupla ligação entre carbonos ou entre carbono e oxigênio. A não formação dessas ligações evidencia a não degradação do material.

FIGURA 67 – FTIR DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% PURO.



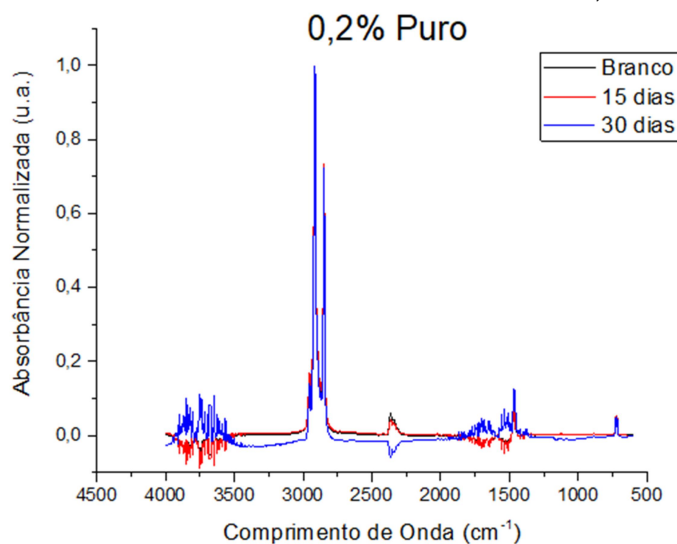
FONTE: O Autor (2019).

FIGURA 68 – FTIR DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% PURO NA REGIÃO DE 1800 CM^{-1} A 1600 CM^{-1} .

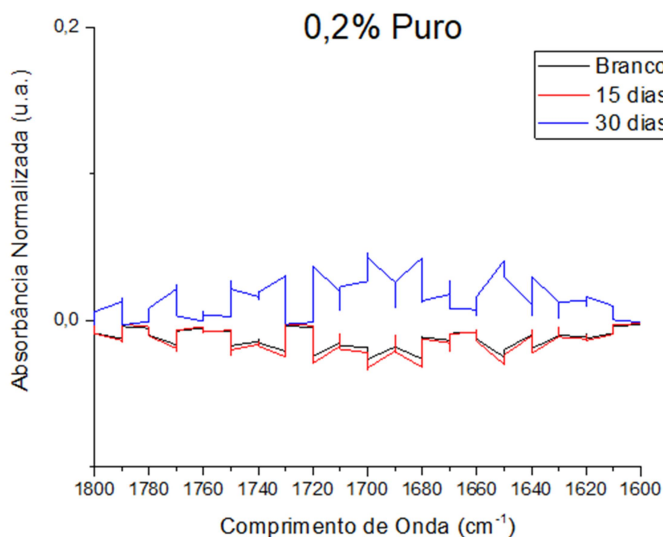
FONTE: O Autor (2019).

Pelo gráfico da Figura 67, como na figura anterior, pode-se observar a ausência de alterações significativas na avaliação comparativa entre as diferentes amostras com concentração de pigmento de 0,1%. Já o gráfico da Figura 68 evidencia que não houve formação de dupla ligação entre carbonos ou entre carbono e oxigênio, ou seja, não houve degradação significativa do material.

FIGURA 69 – FTIR DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% PURO.



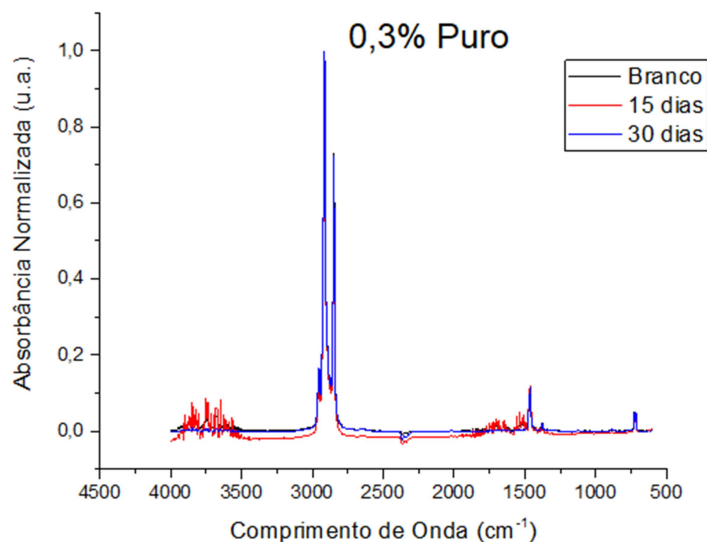
FONTE: O Autor (2019).

FIGURA 70 – FTIR DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% PURO NA REGIÃO DE 1800CM⁻¹ A 1600CM⁻¹.

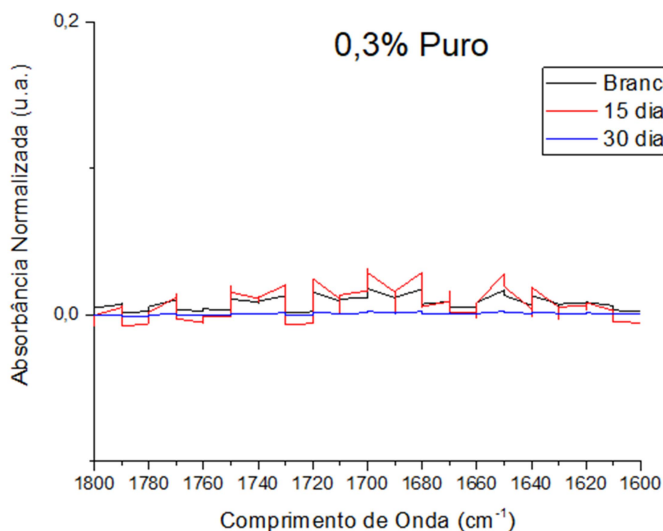
FONTE: O Autor (2019).

Pela análise do gráfico da Figura 69, pode-se observar também a não ocorrência de alterações significativas no espectro de infravermelho das amostras com concentração de pigmento de 0,2%. Já o gráfico da Figura 70 evidencia que não houve formação de dupla ligação entre carbonos ou entre carbono e oxigênio, ou seja, não houve degradação significativa do material.

FIGURA 71 – FTIR DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% PURO.



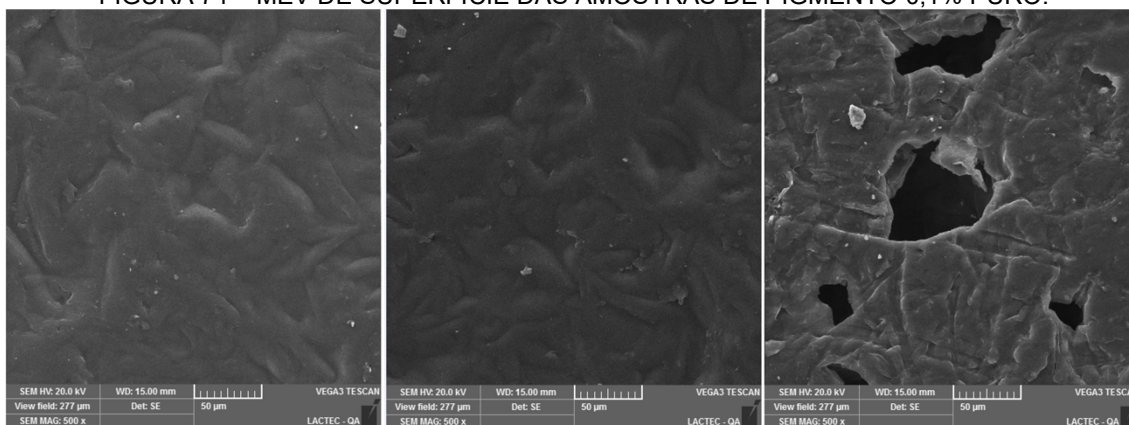
FONTE: O Autor (2019).

FIGURA 72 – FTIR DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% PURO NA REGIÃO DE 2000CM⁻¹ A 1600CM⁻¹.

FONTE: O Autor (2019).

Pela análise dos gráficos da Figura 71, assim como nas anteriores, pode-se observar a não ocorrência de alterações significativas na estrutura das amostras com concentração de pigmento de 0,3%, seja para a amostra Branco como para as duas amostras envelhecidas eletricamente. Já o gráfico da Figura 72 evidencia que não houve formação de dupla ligação entre carbonos ou entre carbono e oxigênio, ou seja, não houve degradação significativa do material.

FIGURA 74 – MEV DE SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,1% PURO.



Branco

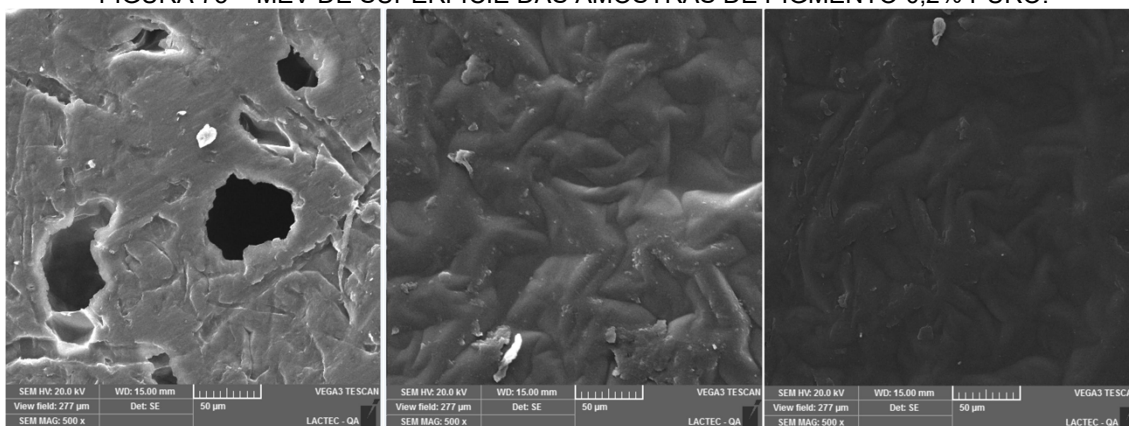
15 Dias

30 Dias

FONTE: O Autor (2019).

A Figura 74 mostra que não ocorreram mudanças significativas na estrutura morfológica das amostras de pigmento 0,1% puro após a ocorrência do envelhecimento elétrico acelerado, na observação da superfície do material em imagem 500 vezes aumentada. O vazio que aparece na amostra mais envelhecida se mostra também na amostra não envelhecida da Figura 75, o que não o classifica como um poro formado pelo envelhecimento.

FIGURA 75 – MEV DE SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,2% PURO.



Branco

15 Dias

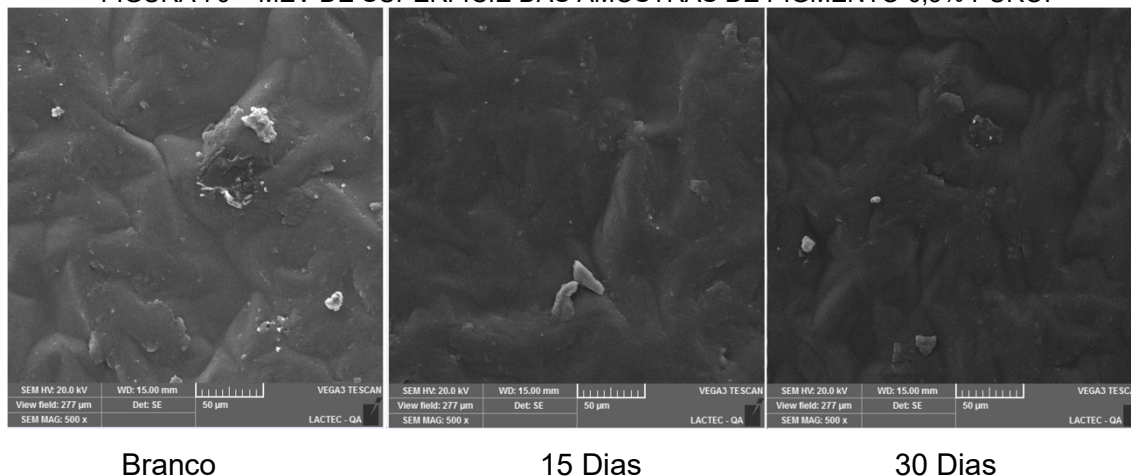
30 Dias

FONTE: O Autor (2019).

A Figura 75 mostra que não ocorreram mudanças significativas na estrutura morfológica das amostras de pigmento 0,2% puro após a ocorrência do

envelhecimento elétrico acelerado, na observação da superfície do material em imagem 500 vezes aumentada.

FIGURA 76 – MEV DE SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS DE PIGMENTO 0,3% PURO.



Branco

15 Dias

30 Dias

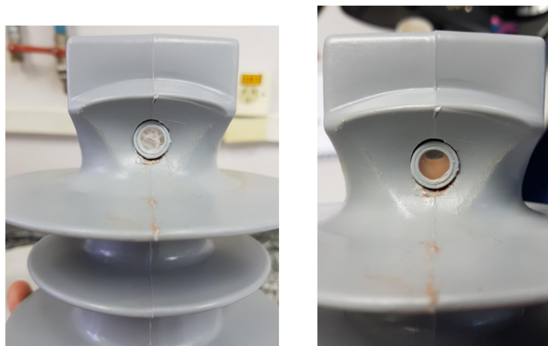
FONTE: O Autor (2019).

A Figura 76 mostra que não ocorreram mudanças significativas na estrutura morfológica das amostras de pigmento 0,3% puro após a ocorrência do envelhecimento elétrico acelerado, na observação da superfície do material em imagem 500 vezes aumentada.

4.8 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.

FIGURA 77 – ANTES E DEPOIS DE APLICAÇÃO DO SENSOR NO ISOLADOR COM ATIVAÇÃO EM ESTUFA.



FONTE: O Autor (2019).

Após todo o processo de caracterização do material, a Figura 77 mostra o processo de aplicação do sensor em uma das possíveis posições geométricas, com o intuito de avaliar o comportamento do sensor mediante exposição do material ao aquecimento em estufa, avaliando-se a mudança de coloração do sensor comparativamente nos momentos antes e após a ativação.

5 CONCLUSÕES

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 resistividade superficial e volumétrica verificou-se que o material, mesmo após a realização do envelhecimento acelerado, manteve valores de resistividade compatíveis com materiais dielétricos, tendo inclusive esse valor sido elevado em alguns casos após o envelhecimento.

Nos ensaios de espectroscopia por impedância, constatou-se o aparecimento de mecanismos de polarização nas amostras de envelhecimento mais severo, sendo essas amostras comparáveis ao isolador no momento do fim da estimativa de vida útil.

Nos ensaios de polarização e despolarização observou-se que, mesmo nas amostras de envelhecimento mais severo, não foram detectadas anomalias provenientes do envelhecimento elétrico do material.

Nos ensaios de calorimetria exploratória diferencial (DSC) observou-se que, mesmo após envelhecimento elétrico, nenhuma amostra apresentou variação significativa na temperatura de fusão do material, o que comprova eficiência do material ao apresentar baixa degradação no processo de envelhecimento.

Nos ensaios de FTIR não foi detectada presença de resíduos significativos de degradação do material, tanto da parafina quanto do pigmento.

Nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) não foram observadas alterações morfológicas significativas no material, mostrando a estabilidade do material ao processo de envelhecimento elétrico acelerado.

Avaliando os resultados relatados acima, pode-se constatar que os objetivos propostos no início do trabalho foram alcançados, sendo concluída a caracterização do material como um dielétrico capaz de exercer o papel de sensor nos isoladores poliméricos.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, podem-se relatar os seguintes pontos:

1. Caracterização de diferentes tipos de cera de parafina, com diferentes pontos de fusão, para incremento do processo de envelhecimento elétrico, visto que o ponto de fusão da parafina usada no presente trabalho não permite que a mesma seja envelhecida em câmara de intemperismo com névoa salina;
2. Avaliação de diferentes pigmentos inorgânicos com diferentes intensidades e tipos de coloração para proporcionar maior visibilidade na ativação do sensor;
3. Realização de ensaios de simulação de falhas no isolador, em complemento à caracterização do material já realizada, para se avaliar o comportamento do sensor e do isolador operando em conjunto.

REFERÊNCIAS

AKISHINO, J.K.; CERQUEIRA, D.P.; SILVA, G.C.; SWINKA-FILHO, V.; MUNARO, M. Morphological and thermal evaluation of blends of polyethylene wax and paraffin. **Thermochimica Acta**. V.626, p.9-12, jan. 2016.

AKISHINO, J.K. **Desenvolvimento e avaliação de sensor termosensível para detecção de aquecimento de conectores elétricos**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos materiais (PIPE) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

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.

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.

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.

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.

BARROS, R.M.R.; FERREIRA, T.V.; COSTA, E.G. Determinação de posicionamento ótimo de anel equalizador em Isoladores Poliméricos. **Ingeniería Energética** V.34, n.2, p.89-97, maio/ago.2016.

BENNETT, H., **Commercial Waxes**. 2. ed. USA: Chemical Publishing Company, 2011.

BEZERRA, R. C. **Desenvolvimento de metodologia de inspeção instrumental para avaliação da corrosão em pinos de isoladores de vidro usados em linhas de transmissão**. 142f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia – Institutos Lactec. Curitiba, 2015.

BEZERRA, R. C.; TOSTES, J. A. S.; TEIXEIRA, J. M. T; LEITE, R. C. Estudo para aumento da confiabilidade de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão da Eletronorte. 2010.

BOTCHER, C.J.F.; BORDEWIJK, P. **Theory of Electric Polarization: Dielectrics in time-dependent fields**. 2.ed, v.2. Amsterdeam: Elsevier, 1992.

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). **The International System of Units (SI)**. 9.ed. 2019. Disponível em: < <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>>. Acesso em 04 jul. 2019.

CALLISTER, W.D.Jr.; RETSWISCH, D.G. **Materials science and engineering: an introduction**. 8a. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2a. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

COELHO, R. **Physics of dielectrics for the engineer**. v.1 – Fundamental studies in engineering, Elsevier, 2012.

COLORFIX ITAMASTER INDÚSTRIA DE MASTERBATCHES LTDA (COLORFIX-PR). Ficha Técnica – Produto Final – 43992/07. Colombo, PR. 2019. 1 f. Relatório Técnico.

COLORFIX ITAMASTER INDÚSTRIA DE MASTERBATCHES LTDA (COLORFIX-PR). Ficha Técnica – Produto Final – 44142/06. Colombo, PR. 2019. 1 f. Relatório Técnico.

COSTA, E.G.; FERREIRA, T.V.;NERI, M.G.G.; QUEIROZ, I.B.; GERMANO, A.D. Characterization of polymeric insulators using thermal and UV imaging under laboratory conditions. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. V.16, n.4, p.985-992, ago. 2009.

DE PAOLI, Marco Aurélio. **Degradação e estabilização de polímeros**. 2a. ed. Chemkeys, 2008.

DE SOUZA, A.V. **Desenvolvimento de um sensor crômico para monitoramento indireto de temperatura**. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de pós-graduação em Engenharia Química – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

FELTRE, Ricardo. **Química**. 7.ed. V.3. Química Orgânica. São Paulo: Moderna., 2008.

FRADEN, Jacob. **AIP Handbook of modern sensors: physics, designs and applications**. New York: American Institute of Physics, 1993.

FRANÇA, FERNANDO A., Instrumentação e Medidas: grandezas mecânicas, Apostila da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

GENTILINI, J.C. **O comportamento de dielétricos na presença de campos elétricos e a sua descrição em termos da função resposta dielétrica**. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, PR, 2012.

GOMES, D. M. **Estudo dos mecanismos de relaxações dielétrica e mecânica na Borracha Natural**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos materiais (PIPE) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

GUBANSKI, S.M.; DERNFALK, J.A.; HILLBORG, H. Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. V.14, n.5, p.1065-1080, out. 2007.

GROSS, B. **The electret**. Endeavour, v. 30, 1971.

GUERRA, J.S. **Dispersão dielétrica em materiais ferroelétricos**. 125 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Física – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2004.

HERNASKI, G. R. **Preparação e avaliação de formulações termoplásticas com aditivos fotoluminescentes para aplicações em coberturas rígidas utilizadas na manutenção de redes energizadas**. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos materiais (PIPE) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

JONSCHER, A. K. **Dielectric relaxation in solids**. Chelsea dielectrics press, 1983.

KOWALSKI, E.L. **Estudo da Borracha Natural por meio de técnicas de caracterização de dielétricos**. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos materiais (PIPE) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

KURTZ, M.; LYLES, J. F. Generator insulation diagnostic testing. **IEEE transactions on power apparatus system**, v. 98, p. 1596-1603, 1979.

LANXESS Deutschland GmbH. Ficha Técnica – Macrolex Violet B Gran. Leverkusen, Alemanha. 2009. 2 f. Relatório Técnico..

LEGUENZA, E.L. **Comportamento dielétrico, viscoelástico e físico-químico do polietileno reticulado envelhecido sob condições aceleradas de múltiplo estresse**. 167 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Física – Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2003.

LOPES, B.R.F. **Estudo da criticidade de cavidades internas a isoladores poliméricos**. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2018.

LUCAS, Elizabete F.; SOARES, Bluma G.; MONTEIRO, Elisabeth E.C. **Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica**. 1a. ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2001.

LUYT, A. S.; KRUPA, I. Thermal behaviour of low and high molecular weight paraffin waxes used for designing phase change materials. **Thermochimica Acta**, v. 467, p. 117–120, 2008.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 3a. ed. Rio de Janeiro: L.T.C., 2005.

MARCONI, Marina A.; LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 8.ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MARTINS, R. **Desenvolvimento de isolador polimérico inteligente**. 125f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos materiais (PIPE) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

MARTINS, R.; SWINKA, V. Development of a Thermochromic Polymer Insulator. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 3, p. 813–818, mar. 2018.

MENDONÇA, P.L. **Diagnóstico de falhas elétricas e mecânicas em isoladores compósitos de classe de tensão de 69kV através de radiografia computadorizada.** 92 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

MOREIRA, L.S. Medição de temperatura usando-se Termopar. **Cerâmica Industrial.** V.7, n.5, set/out 2002.

MOREIRA, L.S. Sensores de Temperatura – Princípios e Aplicações. Apostila do Curso, 2008.

NORTHROP, Robert B. **Introduction to instrumentation and measurements.** 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.

PANAK, O.; DRŽKOVÁ, M.; KAILOVÁ, N; SYROVÝ, T. Colorimetric analysis of thermochromic samples in different forms employing a digital camera. **Journal of the Measurement Confederation**, V. 127, p. 554–564, jul. 2018.

PIANA, CLAUDE F.B.; MACHADO, AMAURI A.; SELAU, LISIANE P.R. Estatística Básica, Apostila do Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Federal de Pelotas, 2009.

REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos.** 2. ed., São Paulo: Livraria da Física, 2004.

RIBEIRO, G.L. **Aprimoramento da classificação de isoladores polimericos por medições termográficas e radiação UV usando processamento de imagens e RNA.** 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

SCHOLZ, R. C. **Avaliação do comportamento dielétrico dos materiais isolantes utilizados em transformadores de distribuição por meio de espectroscopia dielétrica**. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos materiais (PIPE) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

SEEBOTH, A.; LOTZSCH, D.; RUHMANN, R.; MUEHLING, O. Thermochromic Polymers – Function by Design. **Chemical Reviews**. V.114, p.3037-3068, jan.2014.

SHINOHARA, A.H.; SILVA JR, E.J.; XAVIER, G.J.V; FUJIWARA, H.; NETO, H.B.D.T.L.; BRITTO, P.R.R.; FONTAN, M.A.B. Sistema Radiográfico Digital para Detecção de defeitos internos nos isoladores poliméricos em linhas de transmissão de 500 kV energizada. Trabalho apresentado no *The 12th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION*, Mar del Plata, Argentina, 2017.

SILVA, G.C. **Descargas parciais estimuladas por raios-x contínuo e pulsado em materiais dielétricos: similaridades e diferenças**. 165f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos materiais (PIPE) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

SILVA, R.F. **Trilhamento elétrico sobre materiais poliméricos pela análise da energia absorvida devido as descargas elétricas superficiais**. 125f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos materiais (PIPE) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

SOUZA, A.L.; LOPES, I.J.S. Experimental Investigation of Corona Onset in Contaminated Polymer Surfaces. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. V.22, n.2, p.1321-1331, abr. 2015.

SUWANASRY, C.; THAWONSUKANAN, P.; Ruankon, S.; Suwanasri, T. Partial discharge detection in high voltage equipment using high frequency current transducer. **Greater Mekong Subregion Academic and Research Network**. V.7, p.53-58, 2013.

TAREIEV, B.M. **Física de los materiales dieléctricos**. Moscou: Editora Mir, 1978.

THOMAZINI, D. **Classificação da hidrofobicidade em isoladores poliméricos de alta tensão**. 149 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Física – Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2009.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro U.B. **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações**. 5.ed. São Paulo: Érica, 2005.

TOGINHO FILHO, D. O., ANDRELLO, A.C., Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral – Departamento de Física –Universidade Estadual de Londrina, Junho de 2010.

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**. Trabalho apresentado no 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu, PR, 2009.

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.

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.

WERNECK, M.M.; CARVALHO ,C.C.; SANTOS, D.M.; DA SILVA-NETO, J.L.; MACIEL, F.L. Desenvolvimento e testes de campo de protótipo industrial de sensor óptico de corrente de fuga para linhas de distribuição. **Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL**, v.5, p.65-67, ago.2013.

YOSHIDA, H.; UMEMOTO, K. Insulation diagnosis for rotation machine insulation. **IEEE transaction on EI**, v. 21, p. 1021-1031, 1986.