



Universidade Federal  
de Campina Grande

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**INFLUÊNCIA DA CERA DE CARNAÚBA NO DESEMPENHO DE  
REVESTIMENTOS DE SILICONE APLICADOS NO  
ISOLAMENTO EXTERNO**

**RAPHAEL BORGES DA NOBREGA**

Campina Grande, Paraíba.  
Setembro de 2019

RAPHAEL BORGES DA NOBREGA

INFLUÊNCIA DA CERA DE CARNAÚBA NO DESEMPENHO DE  
REVESTIMENTOS DE SILICONE APLICADOS NO  
ISOLAMENTO EXTERNO

*Tese de Doutorado apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Doutor em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Processamento de Energia.

Orientadores:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Prof. André Dantas Germano, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba.  
Setembro de 2019

N754i

Nobrega, Raphael Borges da.

Influência da cera de carnaúba no desempenho de revestimentos de silicone aplicados no isolamento externo / Raphael Borges da Nobrega. - Campina Grande, 2019.

114 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. André Dantas Germano.

Referências.

1. Isolamento Externo em Sistemas de Alta Tensão - Revestimentos de Silicone. 2. Cera de Carnaúba. 3. Isoladores. 4. Borracha de Silicone. 5. Alumina Tri-hidratada. 6. Radiação UV. 7. Trilhamento Elétrico. 8. Suportabilidade Dielétrica. 9. Constante Dielétrica. 10. FTIR. 11. Corrente de Fuga. I. Costa, Edson Guedes da. II. Germano, André Dantas. III. Título.

CDU 621.315.6(043)

**"INFLUÊNCIA DA CERA DE CARNAÚBA NO DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS DE SILICONE APLICADOS NO ISOLAMENTO EXTERNO"**

**RAPHAEL BORGES DA NÓBREGA**

**TESE APROVADA EM 24/09/2019**



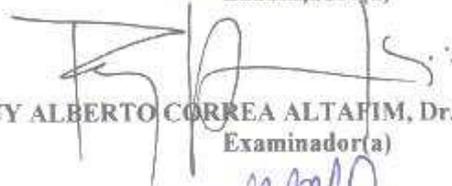
**EDSON GUÊDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)



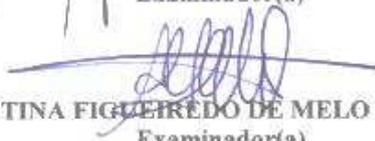
**ANDRÉ DANTAS GERMANO, Dr., UFCG**  
Orientador(a)



**IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES, Ph.D., UFMG**  
Examinador(a)



**RUY ALBERTO CORREA ALTAFIM, Dr., USP-São Carlos**  
Examinador(a)



**ANA CRISTINA FIGUEIREDO DE MELO COSTA, , UFCG**  
Examinador(a)

**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFS**  
Examinador(a)



**WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, por me proporcionar esta oportunidade de qualificação acadêmica e sempre se fazer presente em toda a minha vida.

Agradeço aos meus pais, Sandro e Werônica, por toda confiança depositada e pela torcida para que este trabalho fosse concluído com êxito.

Gostaria de agradecer a minha esposa, Jayany, e as minhas filhas, Rafaelly e Letícia, por toda motivação, paciência, amor e confiança.

Agradeço a minha irmã, Rayssa, ao meu cunhado, Artur, e aos meus sobrinhos, Felipe e Murilo, por toda a torcida e motivação para atingir esse objetivo.

Agradeço a toda a minha família e amigos por todo o apoio, carinho e confiança para que mais essa etapa fosse conquistada em minha vida.

Agradeço aos professores Edson Guedes e André Germano pela orientação e, sobretudo, pela grande amizade e confiança formada ao longo deste ciclo que se estende desde o mestrado. Agradeço, também, aos professores George Lira e Ronimack Trajano por toda ajuda e apoio ao longo da pesquisa.

Agradeço aos amigos Ítalo Oliveira, Valmir Jr, Lidja Tavares, Felipe Lucena, George Xavier, Lenilson Barbosa, Bruno Dias, Hugerles Sales, Henrique Santana, Herbert Filipe, Kal-el, Marcus Tullius e Marconni Freitas por toda a ajuda durante a realização da pesquisa e dos ensaios em laboratório. Apesar dos horários às vezes inconvenientes e do longo período de duração dos ensaios, não mediram esforços para ajudar.

Agradeço a Daniella Bezerra por toda ajuda e suporte para o início e continuação desta pesquisa.

Agradeço aos professores João Batista (Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas - LaMMEA) e Ana Cristina (Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos - LabSMaC) pela disponibilidade dos laboratórios e por toda ajuda para a realização da pesquisa.

Agradeço a todos os meus colegas e aos técnicos do LAT pelas inúmeras contribuições e por todo o suporte para a realização dos ensaios. Em especial a Higor, por toda a assistência na manutenção dos equipamentos e na montagem dos ensaios.

Enfim, agradeço a todos que participaram, de forma direta ou indireta, no desenvolvimento deste trabalho.

*“Desistir é a saída dos fracos, insistir é a vitória dos fortes. O grande prazer da vida é fazer o impossível.”*

Marcelo Gonçalves

## RESUMO

Neste trabalho foi investigada a influência da cera de carnaúba na composição de revestimentos de silicone aplicados no isolamento externo em sistemas de alta tensão. Os compósitos foram constituídos por borracha de silicone vulcanizável a temperatura ambiente acrescida de diferentes concentrações de alumina tri-hidratada e da cera de carnaúba. A morfologia e distribuição das cargas nos compósitos foram analisadas por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura. A estrutura química da cera de carnaúba e de revestimentos de RTV-SIR foi caracterizada por meio dos espectros de absorção na região do infravermelho. Os efeitos da polarização e resistência à ruptura elétrica foram analisados a partir de medições da constante dielétrica e rigidez dielétrica. Ensaio de envelhecimento acelerado foram realizados por meio da exposição à radiação UV e aplicação de estresses elétricos em função do tempo. A suportabilidade dielétrica de isoladores revestidos com as composições investigadas foi avaliada a partir da aplicação de sucessivas descargas disruptivas para diferentes níveis de poluição. O estado do isolamento após o ensaio foi determinado a partir de medições da corrente de fuga. A resistência aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão foi avaliada para amostras dos compósitos estudados. Os efeitos provocados pela exposição de amostras dos compósitos à radiação UV foram avaliados por meio de variações na hidrofobicidade e nos espectros de FTIR. A partir dos resultados, foi verificado que a exposição à radiação ultravioleta ocasiona uma redução nos valores de ângulo de contato para amostras do material investigado. Amostras adicionadas da cera de carnaúba em concentrações mássicas até 10% apresentaram boa suportabilidade dielétrica em condições de poluição, baixos valores de correntes de fuga para ensaios de névoa após a aplicação de descargas disruptivas e resistência à ocorrência do trilhamento elétrico e erosão. Os melhores desempenhos foram obtidos para as composições adicionadas de cera de carnaúba e alumina tri-hidratada em concentrações de 5% e 20%, respectivamente.

**Palavras-chave:** Revestimentos, isoladores, cera de carnaúba, borracha de silicone, alumina tri-hidratada, radiação UV, trilhamento elétrico, erosão, suportabilidade dielétrica, constante dielétrica, FTIR, corrente de fuga, poluição.

## ABSTRACT

In this work the influence of carnauba wax on the composition of silicone coatings applied to outdoor insulation in high voltage systems was investigated. The composites were contained of vulcanizable silicone rubber at room temperature added with different concentrations of alumina trihydrate and carnauba wax. The morphology and filler distribution in the composites were analyzed by SEM. The chemical structure of carnauba wax and RTV-SIR coatings was characterized by the infrared spectrum of absorption. The effects of polarization and resistance to electrical rupture were analyzed from measurements of dielectric constant and dielectric strength. Accelerated aging tests were performed through the exposure to UV radiation and application of electrical stresses as a function of time. The dielectric supportability of insulators coated with the investigated compositions was evaluated through the application of successive disruptive discharges with different levels of pollution. The state of isolation after the test was determined from leakage current measurements. The resistance to the electrical tracking and erosion phenomena was evaluated for composite samples. The length of the tracking, the eroded mass and leakage current measurements were used as parameters of the analysis. The effects caused by exposure of composite samples to UV radiation were evaluated by variations in hydrophobicity and FTIR spectrum. From the results, it was verified that the exposure to ultraviolet radiation causes a reduction in the contact angle values for samples of the investigated material. Samples containing carnauba wax at mass concentrations up to 10% showed good dielectric supportability in pollution conditions, low leakage current values in fog tests realized after the application of disruptive discharges and resistance to electrical tracking and erosion. The best performances were obtained for the compositions filled carnauba wax and alumina trihydrate compositions at concentrations of 5% and 20%, respectively.

**Keywords:** Coatings, insulators, carnauba wax, silicon rubber, trihydrate alumina, UV radiation, electric tracking, erosion, dielectric supportability, dielectric constant, FTIR, leakage current, pollution.

## PUBLICAÇÕES

ALVES, L. N. T.; COSTA, E. G.; OLIVEIRA NETO, A. B.; **NOBREGA, R. B.**; FERREIRA, T. V. **Classificação da Hidrofobicidade Empregando PDI E RL em Isoladores de Vidro Revestidos de SIR, ATH e Carnaúba.** In: XVIII Encontro Regional Ibero-americano do Cigré - ERIAC, 2019, Foz do Iguaçu, 2019.

NASCIMENTO JUNIOR, V.; **NOBREGA, R. B.**; MEDEIROS, I. O.; SOUZA, R. T.; COSTA, E. G. **Sistema de Controle e Monitoramento para Equipamento de Trilhamento Elétrico e Erosão.** In: 3rd International Workshop on Advanced Dielectrics and Applications - IWADA, Campina Grande, 2019.

**NOBREGA, R. B.**; COSTA, E. G.; GERMANO, A. D.; MEDEIROS, I. O. **Avaliação dos Efeitos da Radiação UV e Resistência ao Trilhamento Elétrico e Erosão de Revestimentos Poliméricos aplicados ao Isolamento Externo.** In: Congreso Internacional de Alta Tension y Aislamiento Eléctrico, 2017, La Habana, Cuba.

**NOBREGA, R. B.**; COSTA, E. G.; GERMANO, A. D. ; SILVA NETO, A. I.; BARBOSA, H. R. S. C. M. **Performance of Alternative Coatings Based on RTV Silicone Rubber under Artificial Pollution Tests.** In: 20th International Symposium on High Voltage Engineering, 2017, Buenos Aires.

**NOBREGA, R. B.**; COSTA, E. G. ; GERMANO, A. D. ; ALVES, L. N. T.; BEZERRA, D. C.; COSTA, A. C. F. M. **Analysis of an Alternative Filler for RTV Silicone Rubber Coatings Applied in Outdoor Insulation.** In: 20th International Symposium on High Voltage Engineering, 2017, Buenos Aires.

ALVES, L. N. T.; COSTA, E. G.; OLIVEIRA NETO, A. B.; **NOBREGA, R. B.**; FERREIRA, T. V. **Electrical Insulators Hydrophobicity Classification using Digital Image Processing.** In: 20th International Symposium on High Voltage Engineering, 2017, Buenos Aires.

**NOBREGA, R. B.**; COSTA, E. G.; GERMANO, A. D.; ALVES, L. N. T.; BEZERRA, D. C. **Utilização de Material Alternativo na Composição de Revestimentos RTV-SIR Aplicados no Isolamento Externo em Alta Tensão.** In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016, Natal.

# PATENTE

**NOBREGA, R. B.;** COSTA, E. G.; GERMANO, A. D.; COSTA, A. C. F. M.;  
BEZERRA, D. C. **Revestimento Polimérico Aplicado no Isolamento Elétrico.** 2015,  
Brasil. Patente: Invenção. Número do registro: BR1020160234611. Instituição de  
registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depositante: UFCG -  
Universidade Federal de Campina Grande. Depósito: 07/10/2016.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1- Isoladores (a) Porcelana (b) Vidro (c) Polimérico.....   | 7  |
| Figura 2- Estrutura genérica da cadeia a base de PDMS.....   | 9  |
| Figura 3 – Carnaúba. ....  | 11 |
| Figura 4 - Tensão superficial em um líquido.....   | 13 |
| Figura 5- Ângulo de contato formado entre uma gota e uma superfície sólida.....  | 14 |
| Figura 6 – Processo de formação de arcos elétricos em superfícies hidrofílicas. ....   | 16 |
| Figura 7 – Processo de formação de arcos elétricos em superfícies hidrofóbicas sob condições de poluição.....  | 17 |
| Figura 8 – Métodos de aplicação da poluição artificial para diferentes tipos de isoladores.....  | 20 |
| Figura 9 - Processo de trilhamento elétrico e erosão.....  | 21 |
| Figura 10 – Capacitor de placas paralelas. ....  | 23 |
| Figura 11 – Variação da permissividade com a frequência para um dielétrico que apresenta todos os mecanismos de polarização.....   | 24 |
| Figura 12 – Diagrama fasorial das correntes que circulam em um dielétrico. ....  | 25 |
| Figura 13 – Métodos de aplicação da tensão para determinação da rigidez dielétrica (a) curta duração (b) taxa de subida lenta (c) degrau.....  | 26 |
| Figura 14 – Mecanismo de degradação oxidativa de polímeros. ....   | 29 |
| Figura 15 - Correlação entre degradação acelerada e degradação natural.....  | 31 |
| Figura 16 – Representação esquemática do MEV.....  | 32 |
| Figura 17 – Modos de vibração molecular: Estiramento simétrico (a) e assimétrico (b); Deformação angular simétrica (c) e assimétrica (d) no plano; Deformação angular simétrica (e) e assimétrica (f) fora do plano. ....                      | 34 |
| Figura 18 - Especificações técnicas do isolador de vidro utilizado.....  | 52 |
| Figura 19 - Metodologia de obtenção dos compósitos de silicone adicionados de cargas. ....   | 54 |
| Figura 20 – Ilustração das amostras utilizadas para os ensaios de (a) poluição artificial (b) envelhecimento acelerado por radiação UV e hidrofobicidade (c) constante dielétrica e rigidez dielétrica (d) trilhamento elétrico e erosão. .... | 55 |
| Figura 21 – Condições de poluição para os diferentes grupos formados. ....   | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 22 – Aplicação da camada de poluição nos isoladores (a) pré-condicionamento (b) camada de poluição (c) repouso.....   | 57 |
| Figura 23 – Arranjo experimental para monitoramento da corrente de fuga. ....  | 58 |
| Figura 24 – Fotografias (a) Arranjo experimental utilizado para monitoramento da corrente de fuga (b) Vista interna da câmara de névoa (c) Câmara com névoa aplicada. .... | 59 |
| Figura 25 – Metodologia adotada para a realização dos ensaios para condições de poluição artificial.....   | 60 |
| Figura 26 - Esquema da ponte Schering TR-9701 TELMES .....   | 61 |
| Figura 27 - Ponte Schering utilizada para as medições da constante dielétrica e tangente de perdas.....  | 62 |
| Figura 28 – Fotografia do ensaio de rigidez dielétrica (a) arranjo utilizado (b) amostra entre eletrodos.....  | 63 |
| Figura 29 – Diagrama esquemático para o ensaio de trilhamento elétrico e erosão. ....  | 64 |
| Figura 30 – Ensaio de trilhamento elétrico e erosão (a) equipamento desenvolvido (b) amostras sob ensaio. ....   | 65 |
| Figura 31 – Amostras expostas a radiação UV na câmara de intemperismo desenvolvida. ....   | 66 |
| Figura 32- Arranjo utilizado para medição dos ângulos de contato. ....   | 66 |
| Figura 33 – Diagrama esquemático do equipamento de trilhamento elétrico e erosão..   | 68 |
| Figura 34 – Esquema da Unidade de Controle e Medição .....   | 69 |
| Figura 35 – Arquitetura do circuito para medição da corrente de fuga.....  | 70 |
| Figura 36 – Esquema do equipamento para a realização de ensaios de trilhamento elétrico e erosão (a) Vista frontal (b) Vista lateral. ....                                 | 72 |
| Figura 37 – Esquema da câmara de envelhecimento acelerado com vistas em (a) perspectiva (b) lateral .....  | 75 |
| Figura 38 – Esquema do sistema de condensação.....   | 76 |
| Figura 39 – Princípio utilizado para controle do nível de água nos reservatórios (a) nível baixo (b) nível adequado. ....  | 77 |
| Figura 40 – Esquema do sistema de controle da câmara de envelhecimento UV .....  | 77 |
| Figura 41 – Painel de controle da câmara de envelhecimento UV (a) vista frontal (b) vista lateral.....   | 79 |
| Figura 42 – Valores médios da constante dielétrica para diferentes frequências. ....   | 80 |
| Figura 43 – Valores da tangente de perdas para diferentes frequências.....   | 81 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 44 – Valores da rigidez dielétrica para os compósitos estudados. ....   | 82  |
| Figura 45 – Duração do ensaio de trilhamento e erosão para cada amostra. ....  | 84  |
| Figura 46 – Amostras após ensaio de trilhamento elétrico e erosão (a) S100 (b) SC5<br>(c) SC10 (d) SC20 (e) SA20 (f) SAC5 (g) SAC10 (h) SAC20. ....  | 85  |
| Figura 47 – Comprimento do trilhamento elétrico para as amostras investigadas. ....  | 86  |
| Figura 48 – Quantidade de massa erodida para as amostras investigadas. ....  | 87  |
| Figura 49 – Histograma da corrente de fuga para o ensaio de trilhamento elétrico e<br>erosão. ....   | 88  |
| Figura 50 – Valores médios de descargas disruptivas sobre isoladores revestidos para<br>cada conjunto sob as condições (a) limpo e (b) poluído. ....   | 90  |
| Figura 51 – Tensão disruptiva versus nível de poluição para revestimentos de silicone.<br>.....  | 91  |
| Figura 52 – Valores de pico das correntes de fuga medidas (a) antes e (b) após descargas<br>disruptivas para isoladores com revestimento – Condição: Isolador Limpo. ....                    | 92  |
| Figura 53 – Valores de pico das correntes de fuga medidas (a) antes e (b) após descargas<br>disruptivas para isoladores com revestimento – Condição: Isolador Poluído. ....                  | 93  |
| Figura 54 – Fotografia do revestimento S100 com indícios de danos provocados por<br>descargas disruptivas e bandas secas. ....   | 94  |
| Figura 55 – Valores de ângulo de contato estático para amostras a base de RTV-SIR. ....  | 95  |
| Figura 56 – Espectro de FTIR para a cera de carnaúba. ....   | 96  |
| Figura 57 - Espectro de FTIR antes (azul) e após (vermelho) exposição à radiação UV<br>para as composições (a) S100 (b) SC5 (c) SC10 (d) SC20 (e) SA20 (f) SAC5 (g)<br>SAC10 (h) SAC20. .... | 97  |
| Figura 58 – Razão entre bandas de absorção para as ligações Si-CH <sub>3</sub> , Si-O-Si e<br>Si(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> antes e após exposição à radiação UV. ....                   | 99  |
| Figura 59 – Fotomicrografias obtidas por MEV para (a) ATH (b) Cera de carnaúba. ....   | 100 |
| Figura 60 – Fotomicrografias da seção transversal com aumentos de 150x e 1000x para<br>as amostras (a) SC5 (b) SC10 (c) SC20 (d) SA20 (e) SAC5 (f) SAC10 (g) SAC20. ...                      | 101 |
| Figura 61 – Gráfico de radar. ....   | 103 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Tipos de ligações químicas e suas respectivas energias de ligação.....            | 28 |
| Tabela 2- Resumo das contribuições das pesquisas e cargas típicas utilizadas na RTV-SIR..... | 47 |
| Tabela 3 – Propriedades da borracha de silicone RTV 615. ....                                | 50 |
| Tabela 4 – Tempo de cura aproximado da RTV 615. ....   | 51 |
| Tabela 5 – Especificação da cera de carnaúba Tipo I utilizada.....                           | 51 |
| Tabela 6 – Especificações da ATH utilizada.....  | 52 |
| Tabela 7- Percentual de concentração mássica dos compósitos investigados.....                | 53 |
| Tabela 8 – Descrição das bandas de absorção da cera de carnaúba. ....                        | 96 |
| Tabela 9 – Descrição das bandas de absorção dos compósitos a base de RTV-SIR.....            | 98 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

- AIN – Nitreto de Alumínio
- ANSI – American National Standards Institute
- ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
- ATH – Alumina Tri-hidratada
- BN – Nitreto de Boro
- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Contínua
- CIGRÉ – Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
- DDNS – Densidade Superficial de Depósito Não Solúvel
- DDSE – Densidade Superficial de Depósito de Sal Equivalente
- DRX – Difração de Raios X
- EDX – Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X
- EVA – *Ethylene Vinyl Acetate* (Etileno Acetato de Vinila)
- FTIR – Espectroscopia com Transformada de Fourier
- HTV – *High Temperature Vulcanization* (Vulcanização em Alta Temperatura)
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- IPT – *Inclined Plane Testing* (Teste de Plano Inclinado)
- LAT – Laboratório de Alta Tensão
- LSR – *Liquid Silicone Rubber* (Borracha de Silicone Líquida)
- MDH – *Magnesium hydroxide* (Hidróxido de Magnésio)
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- NBR – Norma Brasileira
- PDMS – *Polydimethylsiloxane* (Polidimetilsiloxano)

- RTV – *Room Temperature Vulcanization* (Vulcanização à Temperatura Ambiente)
- SIN – Sistema Interligado Nacional
- SIR – *Silicone Rubber* (Borracha de Silicone)
- TC – Transformador de Corrente
- TEM – *Transmission Electron Microscopy* (Microscopia Eletrônica de Transmissão)
- TGA – *Thermogravimetric Analysis* (Análise Termogravimétrica)
- TP – Transformador de Potencial
- TPC – Transformador de Potencial Capacitivo
- UFMG – Universidade Federal de Campina Grande
- UV – Ultravioleta
- XPS – Espectroscopia de Fotoelétrons de Raios X

# SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introdução .....   | 1  |
| 1.1   | Contextualização.....  | 1  |
| 1.2   | Motivação .....  | 2  |
| 1.3   | Objetivos.....   | 4  |
| 1.3.1 | Geral.....   | 4  |
| 1.3.2 | Específicos .....  | 4  |
| 1.4   | Contribuições da Pesquisa .....                                | 5  |
| 1.5   | Estrutura do texto.....  | 5  |
| 2     | Fundamentação Teórica .....                                    | 7  |
| 2.1   | Isoladores Elétricos.....                                      | 7  |
| 2.2   | Borracha de Silicone .....                                     | 8  |
| 2.3   | Cera de Carnaúba.....  | 11 |
| 2.4   | Molhabilidade e Hidrofobicidade .....                          | 12 |
| 2.5   | Poluição em Isoladores .....                                   | 15 |
| 2.5.1 | Mecanismo de Ruptura Dielétrica para Superfícies Poluídas..... | 16 |
| 2.5.2 | Ensaio de Poluição Artificial.....                             | 18 |
| 2.6   | Trilhamento Elétrico e Erosão .....                            | 21 |
| 2.7   | Constante Dielétrica e Tangente de perdas.....                 | 23 |
| 2.8   | Rigidez Dielétrica .....                                       | 26 |
| 2.9   | Degradação de Polímeros .....                                  | 27 |
| 2.9.1 | Processo de Oxidação .....                                     | 28 |
| 2.9.2 | Envelhecimento por Radiação UV.....                            | 29 |
| 2.10  | Microscopia Eletrônica de varredura .....                      | 31 |
| 2.11  | Espectroscopia de Absorção no Infravermelho .....              | 33 |
| 3     | Revisão Bibliográfica.....                                     | 37 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 4         | Metodologia .....  | 50 |
| 4.1       | Material .....   | 50 |
| 4.1.1     | Matriz Polimérica.....   | 50 |
| 4.1.2     | Cargas .....   | 51 |
| 4.1.2.1   | Cera de Carnaúba.....  | 51 |
| 4.1.2.2   | Alumina Tri-hidratada – ATH.....                                     | 51 |
| 4.1.3     | Isoladores de Vidro .....  | 52 |
| 4.2       | Métodos.....   | 53 |
| 4.2.1     | Preparação dos Compósitos .....                                      | 53 |
| 4.2.1.1   | Amostras .....   | 54 |
| 4.2.2     | Ensaio .....   | 55 |
| 4.2.2.1   | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....                      | 56 |
| 4.2.2.2   | Ensaio de Poluição Artificial.....                                   | 56 |
| 4.2.2.3   | Constante Dielétrica e Tangente de Perdas .....                      | 60 |
| 4.2.2.4   | Rigidez Dielétrica .....   | 62 |
| 4.2.2.5   | Trilhamento Elétrico e Erosão.....                                   | 63 |
| 4.2.2.6   | Envelhecimento por Radiação UV .....                                 | 65 |
| 4.2.2.7   | Hidrofobicidade .....  | 66 |
| 4.2.2.8   | Espectroscopia na Região do Infravermelho – FTIR .....               | 67 |
| 4.3       | Concepção dos Equipamentos Desenvolvidos.....                        | 67 |
| 4.3.1     | Equipamento para Avaliação do Trilhamento Elétrico e Erosão.....     | 67 |
| 4.3.1.1   | Esquema do Equipamento .....   | 68 |
| 4.3.1.2   | Unidade de Controle e Medição .....                                  | 69 |
| 4.3.1.2.1 | Circuito de Medição da Corrente de Fuga.....                         | 70 |
| 4.3.1.2.2 | Central de Controle e Processamento .....                            | 71 |
| 4.3.1.3   | Aspectos Construtivos do Equipamento.....                            | 71 |
| 4.3.2     | Câmara de Envelhecimento Acelerado por Exposição à Radiação UV ..... | 74 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.3.2.1 | Estrutura do Equipamento .....                         | 74  |
| 4.3.2.2 | Sistema de Condensação .....                           | 75  |
| 4.3.2.3 | Sistema de Controle.....                               | 77  |
| 5       | Resultados.....  | 80  |
| 5.1     | Constante Dielétrica e Tangente de Perdas.....         | 80  |
| 5.2     | Rigidez Dielétrica .....                               | 82  |
| 5.3     | Trilhamento Elétrico e Erosão .....                    | 83  |
| 5.4     | Ensaio de Poluição Artificial .....                    | 89  |
| 5.4.1   | Tensão Disruptiva .....                                | 89  |
| 5.4.2   | Monitoramento da Corrente de Fuga .....                | 92  |
| 5.5     | Hidrofobicidade .....                                  | 95  |
| 5.6     | Espectroscopia na Região do Infravermelho - FTIR ..... | 96  |
| 5.7     | Microscopia Eletrônica de Varredura .....              | 100 |
| 5.8     | Gráfico de Radar .....                                 | 102 |
| 5.9     | Considerações Finais .....                             | 105 |
| 6       | Conclusões e Trabalhos Futuros .....                   | 107 |
| 6.1     | Conclusões .....                                       | 107 |
| 6.2     | Trabalhos Futuros .....                                | 108 |
|         | Referências .....                                      | 109 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A eletricidade representa uma das formas mais versáteis e convenientes de suprimento energético, tornando-se um recurso indispensável para o desenvolvimento socioeconômico da humanidade ao longo dos anos.

A energia elétrica comercial é produzida em grandes centros geradores e percorre longas distâncias até chegar aos centros de consumo. A conexão é realizada por meio de extensas linhas de transmissão que transportam a energia produzida em altos níveis de tensão até os centros de distribuição. O sistema de distribuição é composto por linhas de alta, média e baixa tensão, e é responsável pela entrega efetiva de energia elétrica ao consumidor final. Convencionalmente, as linhas são formadas por condutores nus ou revestidos e suspensos em torres por meio de isoladores elétricos. Estes equipamentos são responsáveis por isolar eletricamente componentes submetidos a diferentes níveis de potencial e proporcionar a sustentação mecânica dos condutores, em condições normais e anormais de operação do sistema.

A ocorrência de falhas em linhas de transmissão representa umas das principais causas de desligamentos forçados do sistema elétrico brasileiro. As linhas de transmissão foram responsáveis por 76,1% dos desligamentos envolvendo a rede básica e complementar do Sistema Interligado Nacional (SIN) no período de julho/2015 a junho/2016 (FEITOSA NETO *et al.*, 2017). As falhas em equipamentos/acessórios representaram 11% do total de desligamentos. Disjuntores, unidades capacitivas e isoladores foram os principais equipamentos que causaram desligamentos forçados no sistema de transmissão, com 26,7% dos desligamentos (ANEEL, 2017).

As falhas em isoladores podem ser decorrentes dos processos de fabricação, envelhecimento, instalação, vandalismo, degradação biológica e condições ambientais como ação do vento, chuva e poluição. Em regiões com altos níveis de poluição a incidência de falhas é acentuada. A associação entre umidade e a poluição depositada no isolador intensifica a circulação de correntes de fuga e descargas superficiais, podendo ocasionar o surgimento de uma descarga disruptiva fase-terra (*flashover*).

Por outro lado, a utilização de isoladores elétricos com superfícies antipoluentes pode minimizar a probabilidade de falhas em isoladores e aumentar a confiabilidade dos sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica. A aplicação de materiais orgânicos com propriedades hidrofóbicas no isolamento externo permite melhorar o desempenho do isolador, minimizar perdas e aumentar os intervalos entre manutenções. Diversas investigações devem ser conduzidas na tentativa de produzir revestimentos confiáveis, com maior durabilidade e que permitam melhores desempenhos dos isoladores, principalmente, quando os níveis de poluição e umidade são fatores preponderantes.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A crescente expansão do sistema elétrico tem demandado a utilização de isolamentos cada vez mais robustos para garantir altos níveis de confiabilidade e continuidade no fornecimento de energia elétrica.

No sistema elétrico de potência são utilizados isoladores cerâmicos (vidro e porcelana) e isoladores poliméricos para prover isolamento elétrico e sustentação mecânica das linhas energizadas. A aplicação de isoladores poliméricos tem aumentado bastante nos últimos anos. No entanto, a quantidade de isoladores cerâmicos instalados em linhas de transmissão e distribuição ainda é predominante no sistema elétrico brasileiro. Os isoladores poliméricos são mais leves, apresentam resistência ao vandalismo e possuem propriedades hidrofóbicas, que proporcionam melhores desempenhos em ambientes com altos níveis de poluição e umidade.

Os isoladores cerâmicos possuem alta rigidez dielétrica e grande resistência à degradação ocasionada por arcos elétricos e por fatores ambientais. Diferentemente dos isoladores poliméricos, o desempenho dos isoladores cerâmicos é comprometido quando inseridos em ambientes contendo alto nível de umidade e poluição. A combinação entre umidade e poluição resulta na formação de um composto eletrolítico que tende a se espalhar na superfície do isolador. Conseqüentemente, ocorre a intensificação da corrente de fuga e o surgimento de arcos elétricos, que podem conduzir à falha do isolador.

Diversas empresas do setor elétrico têm realizado a substituição dos isoladores cerâmicos pelos poliméricos com o objetivo de melhorar o desempenho e a

continuidade do sistema elétrico, principalmente em regiões contendo altos índices de poluição e umidade. No entanto, a substituição indiscriminada ou geral, quando possível, apresenta custos elevados. Os isoladores poliméricos são mais susceptíveis aos fenômenos de envelhecimento provocados por estresses elétricos e ambientais. Além disso, as técnicas de monitoramento aplicadas aos isoladores poliméricos são limitadas e possuem menor confiabilidade que as técnicas empregadas para isoladores cerâmicos.

A aplicação de revestimentos poliméricos ao isolamento cerâmico consiste em uma alternativa que permite potencializar o desempenho do isolador, com redução de custos de manutenção e minimização de falhas ocasionadas por poluição e umidade no sistema elétrico. Os revestimentos utilizados no isolamento externo são constituídos por uma matriz polimérica (como o silicone, por exemplo) em que são incorporadas cargas de reforço com o objetivo de reduzir custos, minimizar os efeitos da degradação e aperfeiçoar propriedades específicas do revestimento. Existe uma variedade de cargas que podem ser aplicadas no reforço de polímeros utilizados no isolamento elétrico. Dentre as cargas, é possível citar a alumina tri-hidratada (ATH) e a sílica.

O Brasil possui uma diversidade de recursos naturais com potencial aplicação no desenvolvimento de tecnologias alternativas. A realização de pesquisas sobre os recursos disponíveis pode favorecer o desenvolvimento de isolamentos com desempenhos robustos e custos reduzidos. Além disso, a viabilização do estudo pode contribuir para a utilização de tecnologias sustentáveis no sistema elétrico e o desenvolvimento da região produtora da matéria prima.

A cera de carnaúba é um produto natural, extraído das folhas de uma palmeira típica da região Nordeste do Brasil. A cera é produzida predominantemente no Brasil e, por ser um insumo local, pode reduzir custos associados à fabricação dos revestimentos. Além disso, a carga possui características hidrofóbicas naturais, o que favorece sua aplicação na composição de revestimentos aplicados ao isolamento elétrico.

Um estudo sobre a aplicabilidade da cera de carnaúba no preenchimento de revestimentos silicone RTV para aplicação no isolamento externo foi iniciado pelo autor durante a realização de sua dissertação (NÓBREGA, 2016). Durante a pesquisa foi realizada uma análise de sensibilidade em que revestimentos de silicone com diferentes concentrações da cera de carnaúba foram aplicados na superfície de isoladores de suspensão de vidro e submetidos a testes de névoa com aplicação de esforços elétricos. Parâmetros como corrente de fuga e avaliação da perda e recuperação da hidrofobicidade foram analisados e foi evidenciado bons desempenhos para

revestimentos preenchidos com cera de carnaúba. Assim, um estudo mais aprofundado e com a realização de diversos ensaios capazes de submeter os revestimentos a diferentes solicitações que podem estar presentes em campo tornam-se necessários para investigar a influência e o desempenho da cera de carnaúba em revestimentos aplicados no isolamento externo.

Portanto, neste trabalho foi realizada uma avaliação mais ampla e aprofundada sobre o desempenho de revestimentos de silicone adicionados de cera de carnaúba, utilizada como carga.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 GERAL

O objetivo geral desta pesquisa consiste na avaliação da influência da cera de carnaúba no desempenho de revestimentos de borracha de silicone (SIR) aplicados no isolamento externo em alta tensão.

### 1.3.2 ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo principal do trabalho torna-se necessário a realização dos seguintes objetivos específicos:

- Investigar técnicas que permitam caracterizar e auxiliar no controle e qualidade do processo de desenvolvimento das amostras de RTV-SIR adicionadas de cera de carnaúba;
- Investigar o desempenho de revestimentos a base de RTV-SIR submetidos a condições de poluição, umidade e esforços elétricos ao longo do tempo;
- Avaliar o comportamento hidrofóbico e os efeitos provocados pela exposição à radiação UV de amostras de RTV-SIR adicionadas de cera de carnaúba;
- Avaliar a resistência aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão para amostras a base de RTV-SIR;

- Desenvolver equipamentos que viabilizem a realização de testes padronizados para avaliação de envelhecimento por radiação UV, trilhamento elétrico e erosão.

## 1.4 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

As principais contribuições deste trabalho são:

- Desenvolvimento de isolamentos poliméricos alternativos empregando uma matéria-prima local e com baixos custos de produção;
- Determinação dos efeitos da cera de carnaúba no desempenho de revestimentos aplicados no isolamento elétrico;
- Definição do grau de influência da degradação da borracha de silicone no desempenho dos revestimentos investigados;
- Aprimoramento da infraestrutura do laboratório por meio do desenvolvimento de equipamentos que permitem a realização de testes padronizados para avaliação de envelhecimento por radiação UV, trilhamento elétrico e erosão.

## 1.5 ESTRUTURA DO TEXTO

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre isoladores elétricos, borracha de silicone, cera de carnaúba, hidrofobicidade, poluição em isoladores, trilhamento elétrico e erosão, constante dielétrica e tangente de perdas, rigidez dielétrica, degradação de polímeros, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de absorção no infravermelho, utilizada como suporte para justificar alguns resultados da pesquisa.

Em seguida, no Capítulo 3, é realizada uma revisão bibliográfica sobre resultados de pesquisas reportadas na literatura, que abordam estudos sobre revestimentos à base de borracha de silicone com diferentes cargas empregadas na composição. No Capítulo 4 é descrita a metodologia proposta, enfatizando os detalhes do material utilizado e do método empregado no preparo dos revestimentos, procedimentos para caracterização das amostras, avaliação da hidrofobicidade,

determinação da constante dielétrica e tangente de perdas, realização dos ensaios de poluição artificial, rigidez dielétrica, degradação por UV e trilhamento elétrico e erosão.

Posteriormente, no Capítulo 5 são descritos os resultados obtidos e as devidas considerações. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões da pesquisa e propostas para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

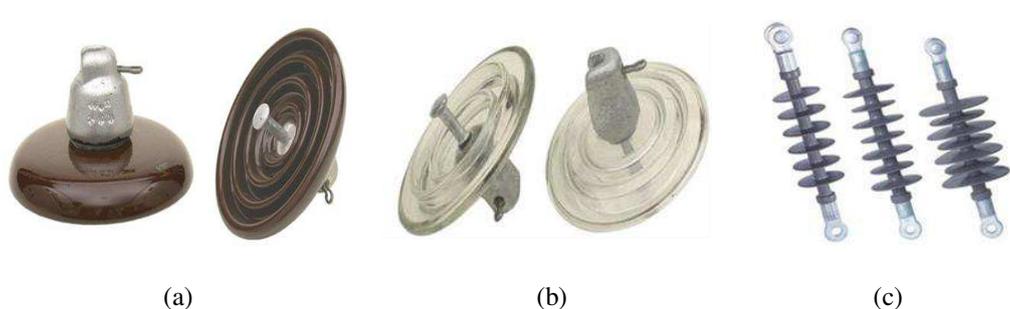
Neste capítulo é apresentada uma fundamentação teórica necessária para auxiliar o leitor no entendimento do tema proposto, fornecendo informações sobre isoladores elétricos, borracha de silicone, cera de carnaúba, molhabilidade e hidrofobicidade, poluição em isoladores, trilhamento elétrico e erosão, constante dielétrica e tangente de perdas, rigidez dielétrica, degradação de polímeros, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de absorção no infravermelho.

### 2.1 ISOLADORES ELÉTRICOS

Os isoladores elétricos são equipamentos utilizados no sistema elétrico de potência para prover sustentação mecânica e isolamento elétrica entre componentes submetidos a diferentes níveis de potencial. Esse equipamento deve suportar o peso dos condutores e os esforços elétricos e mecânicos de tração, de compressão, do vento e das vibrações que são impostas em condições normais e anormais de operação do sistema.

Em geral, os isoladores podem ser classificados em três tipos de acordo com o material dielétrico empregado na fabricação: porcelana, vidro ou polimérico. Na Figura 1 são mostrados exemplos dos isoladores.

Figura 1- Isoladores (a) Porcelana (b) Vidro (c) Polimérico.



Fonte: Santa Terezinha (2002).

A porcelana e o vidro são materiais inorgânicos tradicionalmente utilizados na fabricação de isoladores. Os isoladores elétricos à base de materiais cerâmicos foram empregados no sistema elétrico desde meados do século XIX, com a expansão das linhas de telégrafos e o advento da distribuição de energia elétrica (LIEBERMANN,

2000; FERREIRA, 2011). A porcelana e o vidro são resistentes à degradação natural, inertes para a maioria dos compostos químicos e possuem elevada resistência ao calor resultante de arcos elétricos durante serviço. No entanto, os isoladores cerâmicos são densos e frágeis, necessitando de estruturas mais reforçadas para comportá-los, e estão mais susceptíveis a danos ocasionados pelo vandalismo. Além disso, a elevada energia superficial favorece a formação de películas de água em condições de alta umidade, resultando na intensificação de correntes de fuga (KIM *et al.*, 1992; GORUR *et al.*, 1999).

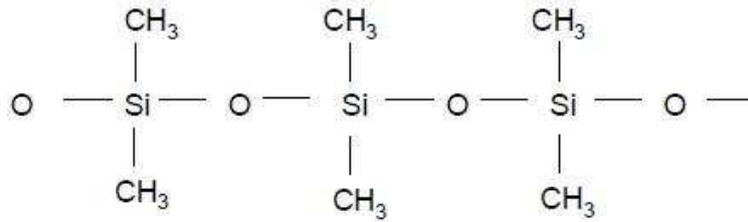
Os isoladores poliméricos são constituídos de materiais orgânicos e possuem melhores características hidrofóbicas. Além disso, os isoladores poliméricos são leves e menores, proporcionando maior facilidade de instalação nas torres. No entanto, os isoladores poliméricos possuem maior susceptibilidade à degradação provocada por estresses elétricos e exposição às condições ambientais (temperatura, umidade, radiação UV, poluentes, entre outros). A degradação pode provocar alterações irreversíveis nas propriedades elétricas e mecânicas do isolador e ocasionar a falha prematura em serviço.

## 2.2 BORRACHA DE SILICONE

O silicone é um polímero formado por uma cadeia principal inorgânica ligada a radicais orgânicos. A cadeia principal é composta por ligações de silício e oxigênio em que radicais orgânicos são ligados ao átomo de silício. Dentre os diversos tipos de silicone, os polidimetilsiloxano (PDMS) são mais conhecidos e aplicados no isolamento elétrico. O PDMS possui uma cadeia principal linear formada por átomos alternados de silício e oxigênio com radicais orgânicos do tipo metil (CH<sub>3</sub>) ligados aos átomos de silício (CALLISTER e RETHWISCH, 2007; SMITH e HASHEMI, 2013). A estrutura química da borracha de silicone PDMS pode ser visualizada na Figura 2.

A borracha de silicone é um produto termicamente estável para temperaturas entre -90° e 250° (CALLISTER e RETHWISCH, 2007). A estabilidade térmica está associada às ligações de silício e oxigênio, que necessitam de maior energia para a ocorrência de quebra da ligação (MORTON, 1989).

Figura 2- Estrutura genérica da cadeia a base de PDMS.



Fonte: Gorur *et al.* (1999).

A presença de radicais metil na estrutura química da borracha de silicone proporciona características hidrofóbicas ao composto, pois reduzem a energia superficial. As propriedades hidrofóbicas dos compostos de silicone possuem um comportamento dinâmico que os tornam diferenciados de outros polímeros. O comportamento dinâmico é caracterizado pela difusão e/ou reorientação de moléculas de baixo peso molecular e está associado aos processos de transferência, perda e recuperação da hidrofobicidade.

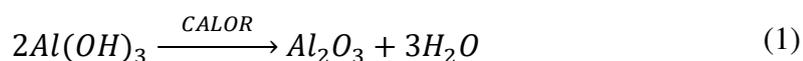
A transferência de hidrofobicidade consiste na migração de moléculas de baixo peso molecular do interior do volume do silicone para a superfície dos contaminantes que são depositados com o passar do tempo. Uma fina camada de silicone é formada sobre os contaminantes de modo que a superfície se torna hidrofóbica. A perda de hidrofobicidade consiste na redução gradual da hidrofobicidade provocada por reações químicas que ocorrem após a exposição do material a intempéries ou estresses elétricos. A recuperação da hidrofobicidade corresponde ao restabelecimento total ou parcial das propriedades hidrofóbicas após a redução ou eliminação dos estresses. O processo de recuperação da hidrofobicidade está associado à difusão e reorientação de grupos metil que migram do interior do volume para a superfície silicone. O comportamento dinâmico da hidrofobicidade proporciona maior resistência ao desenvolvimento de correntes de fuga, bandas secas e *flashover*, influenciando positivamente no desempenho do isolador em condições de poluição (CIGRE, 1999; HILLBORG, 2001; ALMIRALL, 2013).

As borrachas de silicone são tipicamente divididas em três tipos: vulcanizadas a temperatura ambiente (RTV), vulcanizadas a altas temperaturas (HTV) e borracha de silicone líquida (LSR). A vulcanização consiste em uma reação química não reversível que provoca alterações na estrutura molecular do polímero por meio do surgimento de ligações cruzadas entre cadeias poliméricas lineares ou ramificadas, resultando na formação de polímeros tridimensionais com alta massa molar. Em geral, o processo de

vulcanização ocorre pela adição de compostos de enxofre ou peróxidos e na presença de calor. A vulcanização confere propriedades elásticas à borracha e maior resistência à tração e a abrasão (COSER, 2009; CALLISTER & RETHWISCH, 2007).

A utilização de borrachas vulcanizadas tem sido largamente utilizada na fabricação de isoladores compósitos ou na composição de revestimento aplicados aos isoladores cerâmicos (MEYER, 2003; ALMIRALL 2013; GERMANO, 2015). No entanto, as borrachas vulcanizadas podem apresentar limitações nas propriedades elétricas e mecânicas para diversas aplicações, como resistência à tração ou à degradação, por exemplo. Para tanto, as propriedades podem ser melhoradas com a adição de cargas de reforço nas formulações da borracha de silicone. Além de melhorar as propriedades elétricas e mecânicas, as cargas podem reduzir o custo final do produto por apresentarem menores custos que a matriz polimérica. O desempenho das composições de silicone reforçado com cargas está associado ao tipo da carga, ao processamento da mistura, à quantidade e ao tamanho das partículas (HACKAM, 1999). A negligência desses requisitos pode resultar na obtenção de composições com propriedades inadequadas ou com desempenho inferior à borracha de silicone sem adição de cargas.

A nanosílica e a alumina tri-hidratada (ATH) são cargas comumente adicionadas à borracha de silicone e permitem proporcionar maior resistência ao trilhamento elétrico e à erosão. As cargas podem ser utilizadas individualmente ou combinadas para otimizar o desempenho (ALMIRALL, 2013; BEZERRA, 2014). A sílica proporciona maior resistência, dureza e tenacidade à borracha de silicone. A resistência ao trilhamento elétrico e à erosão está associada à afinidade da sílica com a matriz polimérica do silicone (MEYER, 2003). A alumina tri-hidratada é um produto inorgânico de origem sintética utilizada como retardante de chamas e supressor de fumaça. O efeito retardante de chama deve-se principalmente à reação endotérmica que ocorre para um aumento da temperatura na superfície superior a 220°C, mostrado na Equação (1).



O produto obtido da decomposição da ATH na Equação (1) resulta na formação de água na forma de vapor e óxido de alumínio. A liberação de água na forma de vapor retira calor da reação e minimiza a ocorrência da pirólise do polímero, reduzindo a

formação de gases combustíveis, como o monóxido de carbono. O óxido de alumínio atua como uma camada protetora na superfície da matriz polimérica e permite reduzir a difusão do oxigênio para o meio reativo, o que dificulta a troca de calor e, portanto, a propagação do fogo (ALCOA, 2015).

### 2.3 CERA DE CARNAÚBA

A carnaúba é uma palmeira nativa da região Nordeste do Brasil e majoritariamente encontrada nos estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. O desenvolvimento da palmeira ocorre preferivelmente em solos aluviais, próximos a rios e ricos em argila. Além disso, a planta é capaz de suportar o alagamento prolongado durante a época de chuvas e possui resistência ao elevado teor de salinidade, característico dos solos aluviais da região da caatinga (ALVES e COELHO, 2008). A carnaúba pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 – Carnaúba.



Fonte: Próprio autor.

A carnaúba é uma planta xerófila, adaptada a regiões com clima quente e seco. As folhas são revestidas externamente por uma camada cerosa que permite a reflexão da luz solar, dificulta a perda de água por transpiração e protege a planta contra o ataque de fungos (MESQUITA, 2005). A cera produzida na superfície das folhas possui grande valor econômico e representa o principal produto explorado na palmeira.

A cera extraída da carnaúba possui alta dureza e ponto de fusão superior às demais ceras naturais, em torno de 84°C. A composição química é baseada em ésteres de cera, ácidos livres, resinas, álcoois e hidrocarbonetos (RODRIGUES, 2012). As propriedades físico-químicas da cera favoreceram a valorização econômica e a aplicação na indústria. No século XVIII, a cera de carnaúba foi bastante utilizada na confecção de velas para iluminação de residências. A aplicação da cera de carnaúba em polidores, revestimentos, isolantes, filmes e discos fonográficos nos séculos XIX e XX intensificou a exportação do produto e proporcionou o desenvolvimento de atividades comerciais para a região Nordeste. A cera de carnaúba é utilizada em diversas aplicações industriais: no revestimento de capsulas de medicamento e frutos, na composição de cosméticos, produtos alimentícios, materiais elétricos, vernizes, tintas, esmaltes, lubrificantes, impermeabilizantes e na confecção de chips e tonners de impressora (D'ALVA, 2007).

A cera de carnaúba pode ser classificada em três tipos após o processo de industrialização: Tipo I, Tipo III e Tipo IV. A cera Tipo I é extraída das folhas jovens da carnaúba, que se encontram ainda fechadas (conhecida como olho). Esta cera possui cor amarela clara, maior qualidade e pureza. As ceras Tipo III e Tipo IV são extraídas da palha, que são as folhas abertas e com maior estágio de desenvolvimento. A cera Tipo III possui cor marrom escuro e é obtido por meio do processo de filtragem. A cera Tipo IV é preta e obtida por meio do processo de centrifugação (ALVES e COELHO, 2008).

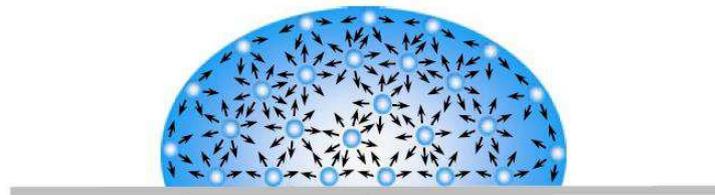
## 2.4 MOLHABILIDADE E HIDROFOBICIDADE

A molhabilidade corresponde ao modo em que um líquido se espalha sobre um substrato sólido. O grau de molhabilidade está associado às forças de coesão do líquido e de adesão entre o líquido e o sólido (ZISMAN, 1976).

O contato de uma gota de água sobre uma superfície sólida pode resultar na contração da gota ou provocar o espalhamento parcial ou total do líquido sobre a superfície. O formato da gota está associado à tensão superficial do líquido. A tensão superficial corresponde a um fenômeno físico originado pela intensificação das forças de atração das moléculas localizadas na superfície do líquido para o interior do volume de modo a manter o menor estado de energia livre. As moléculas do líquido tendem a

ser atraídas por outras moléculas presentes na vizinhança para que a resultante entre as forças de atração e repulsão sejam minimizadas. No interior do líquido, cada molécula é atraída igualmente em todas as direções pelas moléculas vizinhas e a resultante entre as forças é nula. As moléculas localizadas na superfície estão submetidas a forças provenientes de moléculas pertencentes às fases líquida e gasosa. A baixa interação das moléculas localizadas na superfície do líquido com as moléculas da fase gasosa resulta na intensificação das forças de atração com moléculas localizadas no interior do volume e ocasiona a contração do líquido, conforme ilustrado na Figura 4 (FONTANELLA, 2007; YUAN e LEE, 2013).

Figura 4 - Tensão superficial em um líquido.

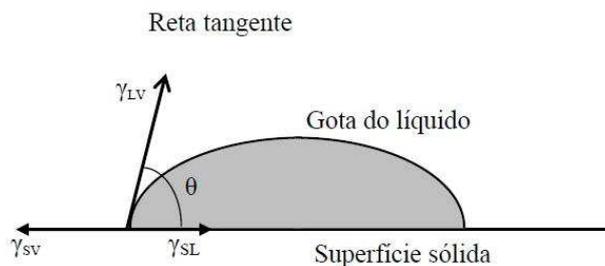


Fonte: Yuan & Lee (2013).

Na ausência de forças externas, o líquido tende a possuir uma forma esférica por possuir menor área e energia superficial (SANTOS, 2005). No entanto, a influência de fatores externos pode provocar a deformação da gota, como: topologia da superfície, temperatura, campo elétrico, força da gravidade e forças de adesão entre o líquido e a superfície sólida (OLIVEIRA 2010; YUAN e LEE, 2013).

A molhabilidade de uma superfície pode ser quantificada por meio da medição do ângulo de contato. O ângulo de contato corresponde ao ângulo formado entre as retas que tangenciam a interface líquido/vapor e líquido/sólido. Em geral, os métodos empregados para a medição do ângulo de contato são baseados nos princípios propostos por Young, Wenzel e Cassie-Baxter. Os métodos estão associados às tensões superficiais e rugosidade das superfícies. O método de Young é aplicado para gotas em contato com superfícies lisas enquanto os métodos de Wenzel e Cassie-Baxter são aplicados para superfícies rugosas e heterogêneas, respectivamente (YOSHIMITSU *et al.* 2002; OLIVEIRA, 2010). A representação do ângulo de contato para uma gota localizada sobre uma superfície sólida e envolvida por gás pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5- Ângulo de contato formado entre uma gota e uma superfície sólida.



Fonte: Fontanella (2007).

O ângulo de contato proposto por Young (1805) é baseado no equilíbrio termodinâmico da gota sob a ação das três tensões interfaciais. A resultante das forças horizontais que atuam na gota, mostrada na Figura 5, é definida como equação de Young, conforme Equação (2). A equação de Young permite determinar o ângulo de contato para uma superfície sólida plana, horizontal, lisa e homogênea.

$$\gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta - \gamma_{sv} = 0. \quad (2)$$

Em que,

$\gamma_{sl}$  – Tensão superficial sólido/líquido;

$\gamma_{lv}$  – Tensão superficial líquido/vapor;

$\gamma_{sv}$  – Tensão superficial sólido/vapor;

$\theta$  – Ângulo de contato de Young.

Os valores de ângulo de contato permitem evidenciar o grau de molhabilidade de uma superfície e classifica-las como hidrofílicas, hidrofóbicas ou superhidrofóbicas. Uma superfície hidrofílica possui altos níveis de molhabilidade e pode ser caracterizada por valores de ângulo de contato inferiores a  $90^\circ$ . As superfícies hidrofóbicas e superhidrofóbicas são caracterizadas pela capacidade de repelir água devido ao baixo nível de molhabilidade. As superfícies hidrofóbicas são definidas para valores de ângulo de contato contidos no intervalo de  $90^\circ$  a  $150^\circ$ . Já as superfícies superhidrofóbicas possuem valores de ângulo de contato superiores a  $150^\circ$  (SEYEDMEHDI *et al.*, 2012).

O procedimento para medição do ângulo de contato estático é baseado nas recomendações da IEC 62073 (2003). A norma determina que os corpos de prova possuam uma superfície plana sempre que possível e que permita a aplicação mínima de três gotas de água em áreas adjacentes separadas umas das outras. Recomenda-se a utilização de água deionizada para evitar que impurezas afetem a tensão superficial. O volume da gota normalmente deve estar entre  $5 \mu\text{L}$  e  $50 \mu\text{L}$ , dependendo da rugosidade da superfície.

## 2.5 POLUIÇÃO EM ISOLADORES

A poluição superficial é um problema inerente a grande parte dos equipamentos que compõem o sistema elétrico e representa um dos principais fatores responsáveis pela ocorrência de falhas no isolamento externo.

A deposição de contaminantes na superfície dos isoladores ocorre, em geral, por ação do vento ou névoa. A composição dos contaminantes é diversa (sal, poeira, fertilizantes, fuligens, fungos) e depende do tipo de ambiente que o equipamento encontra-se instalado. Em regiões costeiras, por exemplo, é predominante a deposição de partículas solúveis na superfície do isolador, como cloreto de sódio (NaCl). Em regiões industriais e desérticas a poluição é constituída, principalmente, por sais e elevados níveis de componentes não solúveis (IEC 60815-1, 2015; BRAINI, 2013).

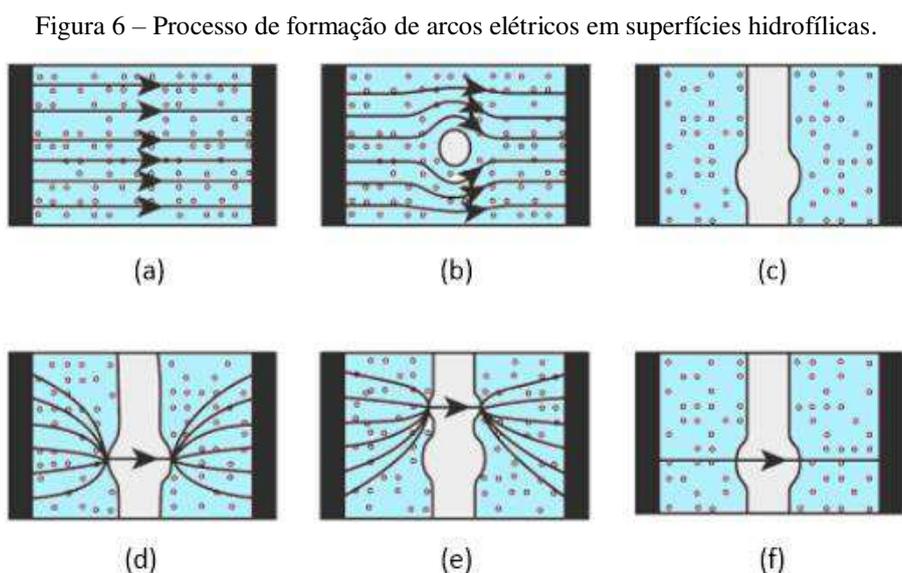
A camada de poluição seca não provoca alterações significativas no comportamento dielétrico do isolador, pois não é condutiva. No entanto, o umedecimento da camada de poluição por meio do orvalho ou névoa reduz significativamente a suportabilidade dielétrica. A interação entre poluição e umidade pode ocasionar a formação de um composto condutivo na superfície do isolador e desencadear a evolução dos mecanismos responsáveis pela ruptura elétrica do isolamento, isto é, intensificação da corrente de fuga e ocorrência de descargas elétricas superficiais. A ocorrência de arcos elétricos na superfície pode ocasionar a degradação do isolador: trilhamento elétrico superficial, erosão do material isolante ou corrosão das ferragens devido à liberação de ozônio pelo arco elétrico.

Diversas técnicas têm sido adotadas para minimizar os problemas causados pela poluição no sistema elétrico. Entre as técnicas é possível destacar a limpeza periódica dos isoladores, modificações no seu formato, variações da composição dos materiais utilizados na sua fabricação e aplicação de revestimentos externos na sua superfície. A limpeza periódica é uma técnica usualmente empregada por diversas empresas do sistema elétrico para retirada dos depósitos de poluição da superfície do isolador. No entanto, os custos para a execução da limpeza podem ser elevados, principalmente em regiões com altos níveis de poluição e que necessitam de intervenções com maior frequência. As modificações no formato, como alterações no perfil aerodinâmico do isolador, por exemplo, podem reduzir o acúmulo de contaminantes e permitir melhor desempenho sob condições de poluição. As variações na composição e na proporção

dos materiais possibilita a obtenção de características elétricas e mecânicas aperfeiçoadas e adequadas a aplicação dos isoladores, como no caso de sistemas em cc e ca. A aplicação de revestimentos hidrofóbicos permite reduzir a probabilidade de ocorrência de descargas disruptivas por dificultar a formação da camada eletrolítica na superfície do isolador. Os revestimentos externos podem reduzir custos de manutenção e proporcionar maiores intervalos de tempo entre intervenções.

## 2.5.1 MECANISMO DE RUPTURA DIELÉTRICA PARA SUPERFÍCIES POLUÍDAS

O processo de descarga disruptiva em isoladores submetidos a condições de poluição é bastante afetado pelas propriedades superficiais do material dielétrico, isto é, superfícies hidrofílicas ou hidrofóbicas. As superfícies hidrofílicas estão geralmente associadas com isoladores de vidro ou porcelana. As superfícies hidrofóbicas estão associadas com isoladores poliméricos, como o silicone. O processo de ruptura dielétrica em superfícies hidrofílicas submetidos a condições de poluição pode ser visualizado na Figura 6.



Fonte: Farzaneh e Cristholm (2009).

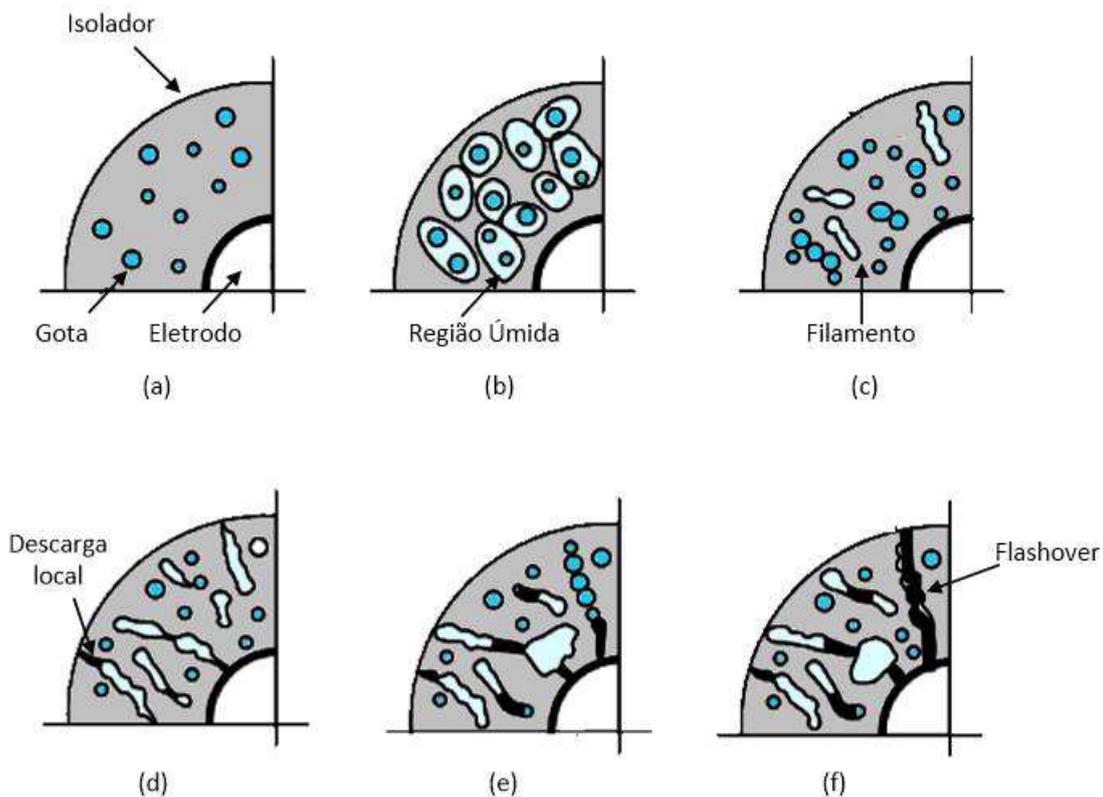
O umedecimento da poluição ocasiona a dissolução dos contaminantes e a formação de uma camada eletrolítica na superfície do isolador. O composto eletrolítico reduz a resistência elétrica superficial e favorece a intensificação de correntes de fuga no isolador, Figura 6 (a). A circulação de correntes de fuga provoca o aquecimento não

uniforme do composto eletrolítico e a formação de pequenas regiões secas na superfície, Figura 6 (b) (FARZANEH e CRISTHOLM, 2009).

A expansão das regiões secas resulta na formação de bandas secas que provocam a interrupção local do fluxo de corrente da camada eletrolítica, Figura 6 (c). As bandas secas ocasionam uma distribuição de tensão não uniforme na superfície do isolador e o campo elétrico torna-se mais intenso nessa região. Valores elevados de campo elétrico resultam no surgimento de arcos elétricos através das bandas secas, com formação de regiões de alta densidade de corrente, Figura 6 (d). O aquecimento produzido pelos arcos elétricos provoca o aumento das bandas secas e a redução do campo elétrico no local de ocorrência. Conseqüentemente, o arco elétrico pode mover-se lateralmente para áreas com maior campo elétrico, Figura 6 (e). Em condições críticas, pode ocorrer a intensificação do arco elétrico por meio da camada eletrolítica e ocasionar o surgimento de uma descarga disruptiva, Figura 6 (f) (FARZANEH e CRISTHOLM, 2009).

Na Figura 7 encontra-se ilustrado o processo de ruptura dielétrica em superfícies hidrofóbicas submetidas a condições de poluição.

Figura 7 – Processo de formação de arcos elétricos em superfícies hidrofóbicas sob condições de poluição.



Fonte: Adaptado de Karady *et al.* (1995).

Os contaminantes são naturalmente depositados na superfície do isolador ao longo do tempo. Gradativamente, a hidrofobicidade é transferida para a camada de poluição por meio do processo de difusão das cadeias poliméricas de baixo peso molecular, que migram para a superfície e tornam-se adsorvidas pela camada de poluição (KARADY *et al.*, 1995; FARZANEH e CRISTHOLM, 2009).

Em condições de alta umidade, a superfície hidrofóbica impede a formação de películas de água e faz com que a água permaneça em gotas separadas umas das outras por áreas secas, Figura 7 (a). A água tende a migrar para a poluição por meio da camada formada pelas cadeias de baixo peso molecular e forma regiões úmidas em torno da gota, Figura 7 (b). A difusão contínua da água aumenta a densidade de gotas na superfície, que une as regiões úmidas e favorece a circulação de correntes de fuga. O aquecimento gerado pela circulação de correntes de fuga provoca a secagem das regiões úmidas até que o equilíbrio entre evaporação e umedecimento seja alcançado (KARADY *et al.*, 1995; FARZANEH e CRISTHOLM, 2009).

A interação com o campo elétrico ocasiona o achatamento e alongamento das gotas, que resulta na formação de filamentos aleatórios na superfície do isolador, Figura 7 (c). Os filamentos reduzem a distância entre os eletrodos e intensifica o campo elétrico entre filamentos adjacentes. Valores elevados de campo elétrico resultam na formação de descargas locais, que são distribuídas de forma não uniforme na superfície do isolador, Figura 7 (d). As descargas locais provocam a perda de hidrofobicidade e favorece a união dos filamentos, Figura 7 (e) (KARADY *et al.*, 1995; FARZANEH e CRISTHOLM, 2009).

O crescimento dos filamentos e de regiões úmidas podem reduzir as áreas secas e formar um caminho condutivo na superfície do condutor. Em condições críticas, o arco elétrico pode se propagar pela superfície do composto eletrolítico e ocasionar o surgimento de uma descarga disruptiva, Figura 7 (f) (KARADY *et al.*, 1995; FARZANEH e CRISTHOLM, 2009).

## 2.5.2 ENSAIOS DE POLUIÇÃO ARTIFICIAL

Os ensaios de poluição artificial são realizados para avaliar a suportabilidade dielétrica de isoladores expostos a atmosferas poluídas. A avaliação laboratorial do desempenho de isoladores em condições simuladas de poluição e umidade permite

auxiliar na seleção e dimensionamento de isoladores para uso externo. O desempenho dos isoladores pode ser analisado em curtos períodos de tempo e o surgimento de falhas ou propriedades inadequadas pode ser detectada previamente.

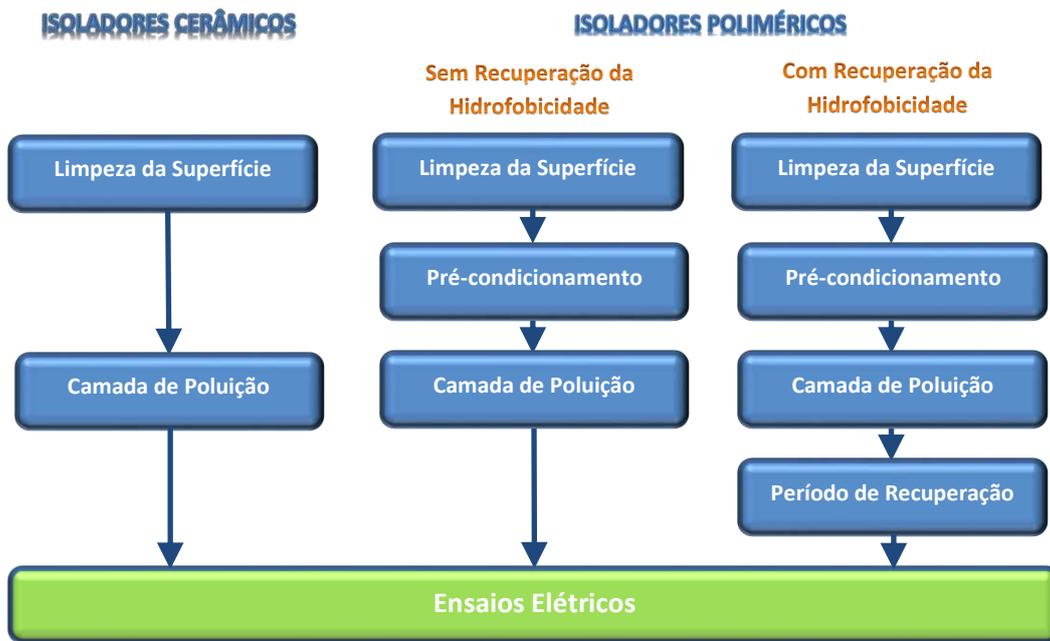
Em geral, os ensaios de isoladores sujeitos à poluição são realizados seguindo recomendações prescritas pelas normas IEC 60507 e NBR 60621. Os métodos de ensaio de poluição especificados pelas normas são névoa salina e camada sólida. O método da névoa salina simula ambientes costeiros em que uma solução condutiva é depositada na superfície do isolador. O método da camada sólida reproduz os efeitos da poluição industrial e desértica, em que uma camada poluente e uniforme é formada na superfície do isolador a partir da deposição de resíduos solúveis e não solúveis.

A severidade da poluição é caracterizada por meio da concentração de contaminantes solúveis e não solúveis que são depositados na superfície do isolador. Os contaminantes solúveis e não solúveis são expressos pela densidade superficial de depósito de sal equivalente (DDSE) e densidade superficial de depósito não solúvel (DDNS), respectivamente. A DDSE consiste em um equivalente da quantidade de NaCl por unidade de área que proporciona a mesma condutividade superficial dos depósitos obtidos em campo. A DDNS corresponde à quantidade de materiais inertes ou não solúveis por unidade de área na superfície do isolador. Geralmente, kaolin e kieselguhr (diatomito) são utilizados como agentes contaminantes para simular a deposição não solúvel em ensaios de poluição artificial (IEC 60815-1, 2015; BRAINI, 2013).

Os procedimentos adotados para realização de ensaios em condições de poluição são padronizados apenas para isoladores cerâmicos. A dificuldade para a reprodução dos testes de poluição em isoladores poliméricos deve-se, principalmente, às propriedades hidrofóbicas conferidas pelo material, que afetam a uniformidade e estabilidade da camada de poluição na superfície do isolador (GUTMAN e DERNFALK, 2010; GEORGE et al., 2014).

Em geral, para avaliar o desempenho de isoladores poliméricos em condições de poluição são utilizados os procedimentos descritos na Brochura Técnica 555 do CIGRE (CIGRE, 2013). No documento é proposta uma modificação no método da camada sólida em que se considera a influência da hidrofobicidade durante a realização dos ensaios. Além disso, uma nova metodologia para aplicação da camada de poluição foi desenvolvida para permitir maior uniformidade da poluição na superfície do isolador e representatividade dos resultados. Na Figura 8 são ilustrados os métodos de aplicação da poluição para diferentes tipos de isoladores.

Figura 8 – Métodos de aplicação da poluição artificial para diferentes tipos de isoladores.



Fonte: Adaptado de Cigré (2013).

As etapas de limpeza da superfície e aplicação da camada de poluição são etapas comuns para todos os isoladores. A limpeza da superfície se caracteriza pela retirada de impurezas com o objetivo de eliminar influências externas durante a análise. A aplicação da camada de poluição constitui-se pela aplicação de uma suspensão contaminante a superfície do isolador, geralmente baseada em composições descritas na norma IEC 60507. A poluição deve ser aplicada de forma uniforme e pode ser realizada por meio de imersão, borrifamento ou escovamento.

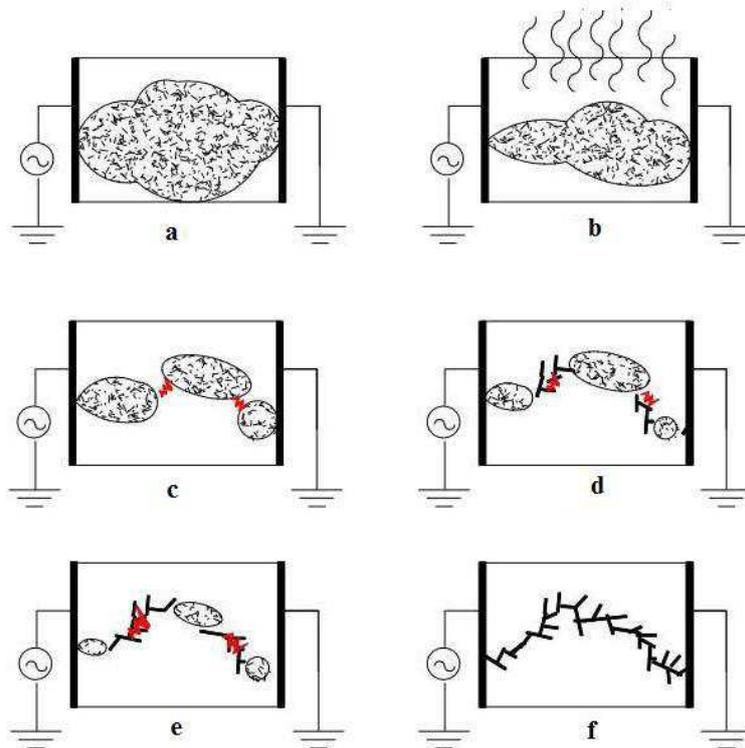
Para isoladores poliméricos são adicionadas as etapas de pré-condicionamento e recuperação para a realização dos ensaios de poluição. O pré-condicionamento consiste na aplicação de material inerte (kaolin ou kieselguhr), na forma de pó, à superfície do isolador, com a finalidade de reduzir a hidrofobicidade e permitir que a camada de poluição seja distribuída uniformemente. Para materiais poliméricos que possuem a capacidade de recuperar a hidrofobicidade, como o silicone, o Cigré (2013) recomenda um repouso por um período de tempo entre 64 e 68 horas após a aplicação da camada de poluição para que as partículas de baixo peso molecular possam migrar para a superfície da poluição. Concluídas as etapas anteriores, os isoladores são submetidos a ensaios elétricos, tais como tensão de ruptura.

## 2.6 TRILHAMENTO ELÉTRICO E EROSÃO

O trilhamento elétrico consiste na formação de um caminho condutivo originado pela carbonização da superfície do material polimérico mediante a ação de descargas elétricas. A erosão corresponde à perda gradual de massa provocada pela ocorrência de descargas superficiais localizadas na superfície do material isolante.

A resistência do material isolante ao trilhamento elétrico depende das suas propriedades físico-químicas, das condições ambientais e da intensidade do campo elétrico aplicado (SALAMA e SALLAM, 1992). O processo evolutivo do trilhamento elétrico e erosão no material polimérico pode ser dividido em seis etapas, conforme visualizado na Figura 9.

Figura 9 - Processo de trilhamento elétrico e erosão.



Fonte: MALIK (1998).

Os processos naturais de umidificação e poluição superficial dos isolamentos externos ocasiona a formação de uma camada condutiva, que reduz a resistência superficial e intensifica a circulação de correntes de fuga, Figura 9 (a). A intensificação das correntes de fuga provoca um aquecimento local e a evaporação da camada condutiva Figura 9 (b). A não-uniformidade do processo de evaporação da solução resulta na formação de bandas secas na superfície do material Figura 9 (c). As bandas

secas provocam a interrupção da corrente superficial e o aumento do campo elétrico entre as regiões úmidas. A intensificação do campo elétrico resulta na formação de descargas superficiais, que provocam uma elevação na temperatura superficial e ocasionam a formação de erosão e trilhas condutivas Figura 9 (d). A propagação e o aumento dos caminhos condutivos, Figura 9 (e), podem ocasionar a ruptura completa da superfície do material polimérico, Figura 9 (f). Conseqüentemente, o material se comporta como um condutor elétrico (MALIK, 1998).

Diversos métodos de ensaio são propostos para avaliação da resistência de um material aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão. Em geral, os ensaios visam simular de maneira acelerada e padronizada os vários eventos envolvidos no processo, como: poluição, umidade e estresse elétrico. Atualmente, os procedimentos empregados para a realização dos ensaios de trilhamento elétrico e erosão são baseados nas recomendações da norma IEC 60587. As normas NBR 10296 e ASTM 2303 descrevem procedimentos análogos a IEC 60587.

A IEC 60587 (2007) estabelece métodos para a avaliação da resistência ao trilhamento elétrico e à erosão de materiais isolantes para a utilização sob severas condições ambientais. Nesta norma, cinco corpos de prova são posicionados com a superfície plana de ensaio voltada para baixo e inclinada de 45° da horizontal. A fixação é realizada por meio de eletrodos com formas específicas e separados de 50±0,5 mm. Uma solução contaminante é escoada uniformemente sobre a superfície de ensaio a uma taxa específica que está associada ao nível de tensão aplicado. Os corpos de prova são submetidos a tensões alternadas entre 1 kV e 6 kV na frequência industrial. A norma especifica dois métodos para aplicação de tensão: tensão constante de trilhamento e tensão de trilhamento em degraus. O primeiro método consiste em submeter os corpos de prova a uma tensão constante por um período de 6 horas. O segundo método consiste na aplicação de uma tensão inicial que será aumentada em degraus de 250 V para cada hora subsequente. O término do ensaio é alcançado quando:

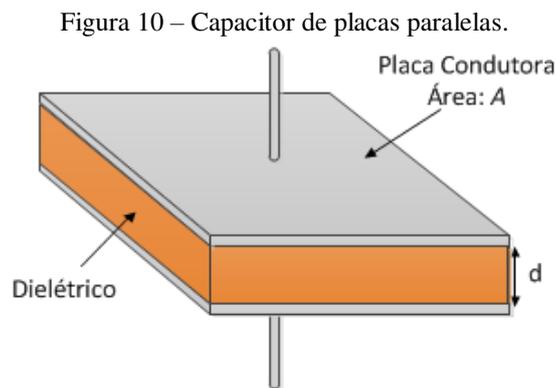
- O valor da corrente que circula o corpo de prova excede 60 mA por um período de tempo entre 2 s e 4 s (Critério A);
- O trilhamento atinge a marca de 25 mm na superfície do corpo de prova, a partir do eletrodo inferior (Critério B);
- Inflamabilidade das amostras;
- Perfuração das amostras devido à erosão.

## 2.7 CONSTANTE DIELÉTRICA E TANGENTE DE PERDAS

O capacitor é um dispositivo elétrico constituído, basicamente, por dois condutores ou placas separados entre si, que permite o acúmulo de cargas mediante o campo elétrico gerado. A quantidade de cargas acumuladas ( $Q$ ) é diretamente proporcional a diferença de potencial a que as placas são submetidas ( $\Delta V$ ). A constante de proporcionalidade corresponde a capacitância ( $C$ ), medida em *Farads* (F), e pode ser expressa conforme a Equação (3) (HALLIDAY, 2009):

$$Q = C \cdot \Delta V. \quad (3)$$

O valor da capacitância depende apenas da geometria das placas, da distância e do material dielétrico presente entre elas. A geometria mais simples para o capacitor consiste em duas placas planas e paralelas de área  $A$ , separadas por uma distância  $d$ , em que é aplicada uma diferença de potencial (HALLIDAY, 2009), conforme mostrado na Figura 10.



Fonte: Adaptado de Halliday (2009).

Para um capacitor de placas paralelas, a capacitância pode ser expressa por:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4)$$

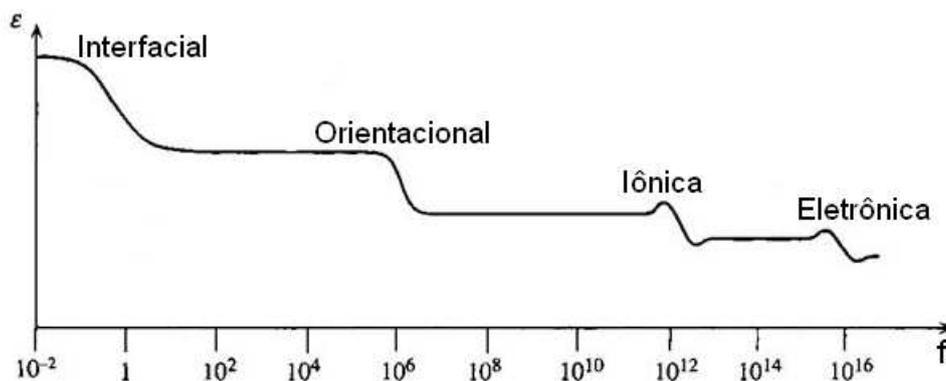
em que  $\epsilon_r$  e  $\epsilon_0$  correspondem, respectivamente, as permissividades elétricas relativa e no vácuo. A permissividade relativa também é conhecida por constante dielétrica.

A depender da estrutura molecular, os materiais isolantes podem ser classificados em polares ou apolares. Ambos estão sujeitos ao fenômeno de polarização, isto é, quando sujeitos a ação de um campo elétrico, as cargas elétricas presentes no

material dielétrico podem ser reorientadas devido a resultante de forças que atuam sobre as mesmas (MESA, 2009). Em um material dielétrico, normalmente os mais importantes mecanismos de polarização são: interfacial, orientacional, iônica e eletrônica. Mais informações sobre estes mecanismos podem ser encontradas em Kuffel *et al.* (2000), Neves (2001), Mesa (2009) e Bogoróditski *et al.* (1979).

A permissividade relativa é um parâmetro que quantifica a magnitude da polarização em um dielétrico. Contudo, este parâmetro pode ser afetado fundamentalmente pela frequência e temperatura. Em dielétricos apolares, a permissividade relativa é independente das variações de frequência do campo elétrico aplicado. Já em dielétricos polares, a permissividade relativa pode ser diminuída, a depender da frequência do campo elétrico aplicado, devido à redução da intensidade dos mecanismos de polarização para frequências elevadas (MESA, 2009). Em um material que possui todos os tipos de polarização, a permissividade relativa diminui (em degraus ou saltos) com o aumento da frequência, conforme mostrado na Figura 11.

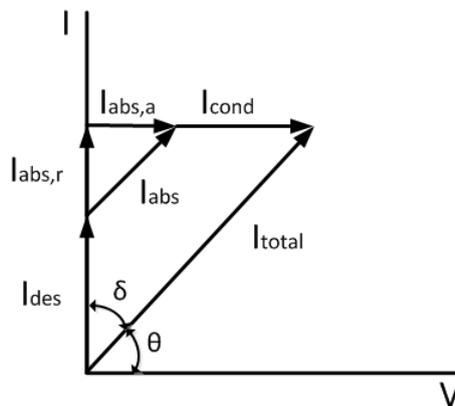
Figura 11 – Variação da permissividade com a frequência para um dielétrico que apresenta todos os mecanismos de polarização.



Fonte: Bogoróditski *et. al* (1979).

O efeito da polarização nos dielétricos provoca a circulação de corrente devido ao deslocamento de cargas no interior do material. Nas polarizações eletrônica e iônica, a componente ativa da corrente é desprezível e a resultante é chamada de corrente de deslocamento ( $I_{des}$ ). Para os demais mecanismos de polarização, a corrente que circula pelo material é composta por componentes ativa ( $I_{abs,a}$ ) e reativa ( $I_{abs,r}$ ) e é denominada corrente de absorção ( $I_{abs}$ ). Além disso, circula uma corrente puramente resistiva e intrínseca ao material, chamada corrente de condução ( $I_{cond}$ ). A soma dessas componentes resulta na corrente total, conforme diagrama fasorial mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama fasorial das correntes que circulam em um dielétrico.



Fonte: Mesa (2009).

Na Figura 12, a corrente total resulta na formação de dois ângulos complementares,  $\delta$  e  $\theta$ , chamados, respectivamente, ângulo de perdas e ângulo de fator de potência. Para materiais dielétricos, o ângulo de perdas deve ser mínimo. Normalmente, a análise desse ângulo é realizada em função da sua tangente, conhecido como tangente de perdas ( $\tan \delta$ ), expressa pela razão entre as componentes ativa e reativa da corrente que circula no dielétrico, conforme mostrado na Equação (5):

$$\tan \delta = \frac{|I_a|}{|I_r|} \quad (5)$$

em que:

$I_a$  é a corrente ativa;

$I_r$  é a corrente reativa.

A corrente ativa ( $I_a$ ) corresponde a soma entre  $I_{abs,a}$  e  $I_{cond}$  da Figura 12. A corrente reativa ( $I_r$ ) corresponde a soma das correntes  $I_{abs,r}$  e  $I_{des}$ . Além disso, a corrente reativa pode ser expressa por:

$$I_r = w \cdot C \cdot V \quad (6)$$

em que

$V$  é a tensão aplicada;

$C$  é a capacitância;

$w$  é a frequência.

## 2.8 RIGIDEZ DIELÉTRICA

A rigidez dielétrica consiste na máxima tensão que pode ser aplicada em um material isolante para provocar a ruptura dielétrica. A rigidez dielétrica permite indicar a resistência de um material à ruptura elétrica e constitui um importante parâmetro para avaliar a qualidade de um material isolante (CAMPOS, 2008; ASTM D149, 2013).

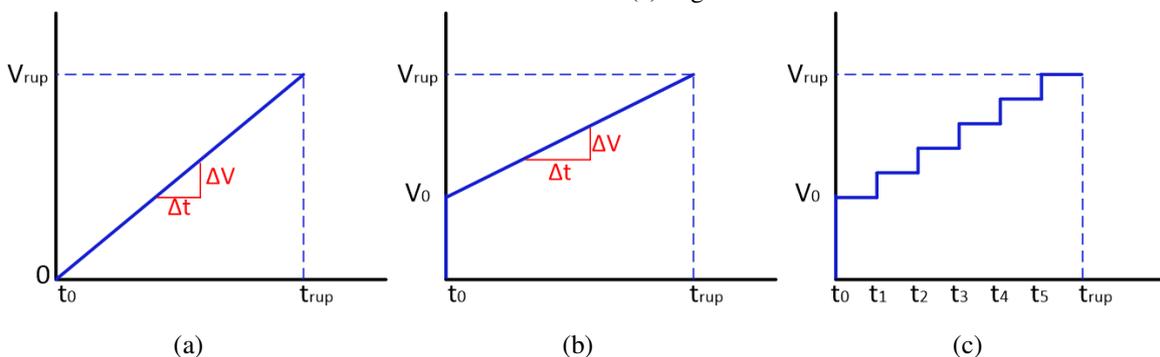
O valor da rigidez dielétrica é expresso por meio de um gradiente de tensão obtido pela razão entre a tensão de ruptura ( $V_{ruptura}$ ) e a espessura ( $d$ ) do material isolante no ponto de falha, conforme mostrado na Equação 7.

$$RD = \frac{V_{ruptura}}{d} \quad (7)$$

O procedimento para determinar a rigidez dielétrica de um material isolante é baseado nas recomendações da ASTM D149 e IEC 60243-1. Basicamente, as amostras são posicionadas entre dois eletrodos imersos em ar ou óleo e submetidas a níveis crescentes de tensão alternada até a ocorrência da ruptura dielétrica.

A rigidez dielétrica pode ser determinada por meio de três métodos de aplicação da tensão sobre a amostra: curta duração, taxa de subida lenta ou degrau, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Métodos de aplicação da tensão para determinação da rigidez dielétrica (a) curta duração (b) taxa de subida lenta (c) degrau.



Fonte: Adaptado de ASTM D149 (2013)

No primeiro método a tensão é aplicada nos eletrodos e varia de zero até a ocorrência da ruptura dielétrica da amostra, conforme Figura 13 (a). A tensão é elevada a uma taxa constante, determinada em função do tempo para ocorrência da ruptura dielétrica. A ruptura deve ocorrer entre 10 e 20 s e caracteriza-se pela perfuração ou decomposição da amostra. No segundo método, a tensão é aplicada nos eletrodos e varia

de uma tensão inicial até a ocorrência da ruptura dielétrica da amostra, conforme Figura 13 (b). A tensão inicial corresponde a 50% do valor determinado no primeiro método e a taxa de elevação da tensão é uniforme. No terceiro método, uma tensão inicial é aplicada sobre as amostras e aumentada em degraus com período de tempo específico, conforme Figura 13 (c). A tensão inicial corresponde a 50% do valor determinado no primeiro método (ASTM D149, 2013).

A ruptura dielétrica de um material isolante pode ser afetada por uma série de fatores como espessura, temperatura, umidade, configurações dos eletrodos, duração do ensaio, estresses mecânicos e defeitos de fabricação (CAMPOS, 2008; KUFFEL, 2000).

## 2.9 DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS

Os materiais poliméricos são susceptíveis aos fenômenos de envelhecimento que podem ocasionar alterações nas suas propriedades ao longo do tempo. As alterações quando indesejáveis são chamadas de degradação (RABELLO, 2000).

A degradação polimérica é causada por diversos tipos de reações químicas que ocorrem no material durante o processamento ou uso final. As reações químicas acontecem de forma intra ou intermoleculares e podem ocasionar a cisão de ligações na cadeia principal ou em grupos laterais, reticulação, eliminação ou substituição de cadeias laterais, oxidação e despolimerização. O processo de iniciação das reações que provocam a degradação é causado por diversos tipos de ataques físicos e/ou químicos como térmico, fotoquímico, mecânico, radiação de alta energia, oxidação, químico e biológico. Todas estas formas de iniciação implicam em fornecer energia para o rompimento de uma ou mais ligações químicas (DE PAOLLI, 2008).

A oxidação representa uma das causas mais importantes para avaliação do desempenho do material polimérico (RABELLO 2000; FECHINE *et al.*, 2006). A oxidação pode ser iniciada por vários meios, principalmente por altas temperaturas (termo-oxidação) e por radiação ultravioleta (foto-oxidação). A termo-oxidação ocorre na presença abundante de oxigênio e energia térmica para ativar a reação. Na foto-oxidação a radiação emitida por uma fonte (ultravioleta, por exemplo) possui energia suficiente para penetrar no polímero e ocasionar um aumento na excitação eletrônica, podendo resultar em cisão molecular. Basicamente, a diferença entre foto-oxidação e termo-oxidação está na etapa de iniciação do processo oxidativo (RABELLO, 2000). Na

Tabela 1 encontra-se o valor da energia de ligação química dos principais tipos de ligações presentes em polímeros comerciais.

Os danos ocasionados pelo processo degradativo podem ser superficiais ou estruturais. A degradação superficial consiste em alterações no aspecto visual, como amarelamento e perda de brilho. A degradação estrutural pode ser caracterizada por alterações nas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e químicas, comprometendo o desempenho do material polimérico.

Tabela 1 – Tipos de ligações químicas e suas respectivas energias de ligação.

| Tipo de ligação | Energia de ligação / kJ mol <sup>-1</sup> |
|-----------------|---|
| C-H primário    | 432                                       |
| C-H secundário  | 410                                       |
| C-H terciário   | 390                                       |
| C-H aromático   | 460                                       |
| C-C             | 348                                       |
| C=C             | 612                                       |
| C-O             | 419                                       |
| C=O aldeído     | 742                                       |
| C=O cetona      | 746                                       |
| C=O éster       | 750                                       |
| C=O amida       | 750                                       |

Fonte: Adaptado de De Paolli (2008).

### 2.9.1 PROCESSO DE OXIDAÇÃO

A oxidação é um processo autocatalítico, isto é, um dos produtos formados atua como catalisador da própria reação. As reações básicas do processo oxidativo ocorrem em três etapas: iniciação, propagação e terminação (RABELLO, 2000; SARON, 2001; DE PAOLLI 2008).

Na etapa de iniciação é formado um radical peroxila ( $ROO^{\bullet}$ ) a partir da reação de um radical alquila ( $R^{\bullet}$ ) com o oxigênio presente no meio. O radical alquila é formado por cisão homolítica de ligações covalentes do polímero a partir de processos térmicos (termo-oxidação) ou incidência de radiação de alta energia (foto-oxidação), por exemplo (RABELLO, 2000; DE PAOLLI, 2008).

Na etapa de propagação o radical peroxila reage com a cadeia polimérica, retirando um hidrogênio, e ocasiona a formação de um hidroperóxido ( $ROOH$ ) e um novo radical alquila. A baixa energia das ligações  $O - O$  do hidroperóxido favorece o rompimento da ligação à temperatura ambiente e resulta na formação de radicais

alcoxila ( $RO^{\bullet}$ ) e hidroxila ( $^{\bullet}OH$ ). O radical alcoxila reage com outra cadeia polimérica, retirando um hidrogênio, e resultando na formação de um radical alquila e um grupo álcool ( $ROH$ ). O radical hidroxila reage com outra cadeia polimérica e ocasiona a formação de um radical alquila e água (RABELLO, 2000; DE PAOLLI, 2008).

Na etapa de terminação ocorre a interrupção do ciclo autocatalítico por meio da combinação de dois radicais livres ou pela reação de radicais alquila e peroxila com uma molécula de água formando um grupo álcool terminal e um hidroperóxido. As reações básicas do processo de oxidação podem ser sistematizadas na Figura 14.

Figura 14 – Mecanismo de degradação oxidativa de polímeros.

|                 |   |                |                   |
|-----------------|---|----------------|-------------------|
| INICIAÇÃO       | $RH \xrightarrow{\Delta} R^{\bullet}$                       |                |                   |
|                 | $R^{\bullet} + O_2 \rightarrow ROO^{\bullet}$               |                |                   |
| PROPAGAÇÃO      | $ROO^{\bullet} + RH \rightarrow ROOH + R^{\bullet}$         |                |                   |
|                 | $ROOH \rightarrow RO^{\bullet} + ^{\bullet}OH$              |                |                   |
|                 | $RO^{\bullet} + RH \rightarrow R^{\bullet} + ROH$           |                |                   |
|                 | $^{\bullet}OH + RH \rightarrow R^{\bullet} + H_2O$          |                |                   |
| TERMINAÇÃO      | $2R^{\bullet} \rightarrow R - R$                            |                |                   |
|                 | $R^{\bullet} + ROO^{\bullet} + H_2O \rightarrow ROH + ROOH$ |                |                   |
| Em que:         |   |                |                   |
| $RH$            | Cadeia polimérica   | $ROOH$         | Hidroperóxido     |
| $R^{\bullet}$   | Radical alquila   | $RO^{\bullet}$ | Radical alcoxila  |
| $\Delta$        | Processo  | $^{\bullet}OH$ | Radical Hidroxila |
| $O_2$           | Oxigênio  | $ROH$          | Grupo álcool      |
| $ROO^{\bullet}$ | Radical peroxila  | $H_2O$         | Água              |

Fonte: Adaptado de Rabello (2000) e De Paolli (2008).

## 2.9.2 ENVELHECIMENTO POR RADIAÇÃO UV

A radiação ultravioleta é a parte do espectro eletromagnético que possui comprimentos de onda entre 100 nm e 400 nm e corresponde a cerca de 7% da energia emitida pelo Sol (INPE, 2017). A radiação UV pode ser subdividida em três faixas de comprimento de acordo com os efeitos fotobiológicos e a intensidade em que é absorvida pela atmosfera: UVC (100-280 nm), UVB (280-320 nm) e UVA (320-400 nm). A radiação UVC corresponde a cerca de 1% da radiação solar e não atinge a superfície terrestre, pois é totalmente absorvida pelas camadas mais altas da atmosfera. A radiação UVB corresponde a cerca de 1,5% da emissão solar e sofre grande atenuação pela camada de ozônio e outros constituintes da atmosfera, atingindo a superfície terrestre com baixa intensidade. A radiação UVA é menos afetada pela

atmosfera e representa a maior parte da radiação ultravioleta que atinge a superfície terrestre (LOPO *et al.*, 2013).

A energia espectral é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação eletromagnética conforme a Lei de Planck, Equação (8). Assim, a radiação UVC possui maior energia na faixa espectral da radiação ultravioleta e pode provocar maiores danos ao material polimérico. Já a radiação UVA possui maior irradiância na faixa de ultravioleta e atinge mais rapidamente a superfície terrestre.

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (8)$$

em que:

$E$ : Energia fundamental;

$h$ : Constante de Planck;

$c$ : Velocidade da luz no vácuo;

$\lambda$ : Comprimento de onda.

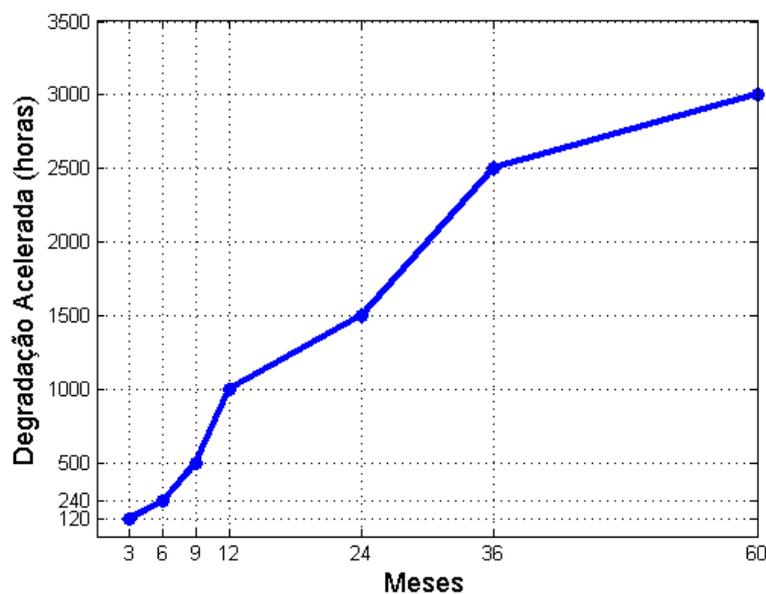
O envelhecimento por radiação UV pode ser realizado, basicamente, por meio da exposição em ambiente natural ou artificial, simulado em laboratório. A exposição no ambiente natural expõe as amostras à situação real de uso, reproduzindo fielmente a atuação dos diversos constituintes ambientais (temperatura, umidade, radiação UV, poluentes, entre outros). Entretanto, este procedimento requer um longo período de duração e a reprodutibilidade é dificultada devido às variações das condições geográficas e climáticas. O envelhecimento artificial por radiação UV permite simular situações que provocam a degradação dos polímeros de forma acelerada pela exposição à radiação luminosa. Para tanto, a incidência solar pode ser simulada em laboratório por meio de lâmpadas fluorescentes especiais ou de arco de xenônio, que emitem radiação na faixa espectral do ultravioleta. Outros parâmetros como temperatura e umidade, devem ser considerados durante a realização dos testes para proporcionar maior representatividade e reproduzir as condições ambientais de forma mais realística (FECHINE *et al.*, 2006; SARON, 2001).

Em geral, os ensaios de envelhecimento artificial por radiação UV são realizados em câmaras climáticas que expõem os corpos de provas a ciclos alternados de radiação UV, umidade e temperatura. Na câmara de envelhecimento acelerado são utilizadas lâmpada UVA ou UVB e mecanismos de condensação que permitem simular a luz solar, o orvalho e a chuva. Os fatores que causam a degradação podem ser simulados

isoladamente ou em conjunto, de forma controlada. Os procedimentos para construção da câmara, exposição dos corpos de prova e parâmetros necessários para a realização do ensaio normalmente são baseados nas recomendações das normas ASTM G53, G151 e G154.

Existe uma grande dificuldade em estabelecer uma correlação entre os sistemas de envelhecimento natural e artificial em função do tempo de exposição. A causa está associada à grande variabilidade dos elementos da natureza que influenciam no desempenho do polímero. Uma correlação aproximada entre o envelhecimento natural e artificial foi realizada a partir de estudos estatísticos realizados nos EUA e pode ser visualizada na Figura 15. Os testes de envelhecimento artificial foram realizados utilizando lâmpadas UVB e seguindo recomendações da norma ASTM G53 (BRANDALISE, 2008; RIOS, 2012; ADEXIM-CONEXIM, 2000).

Figura 15 - Correlação entre degradação acelerada e degradação natural.



Fonte: Adaptado de Adexim-Conexim (2000).

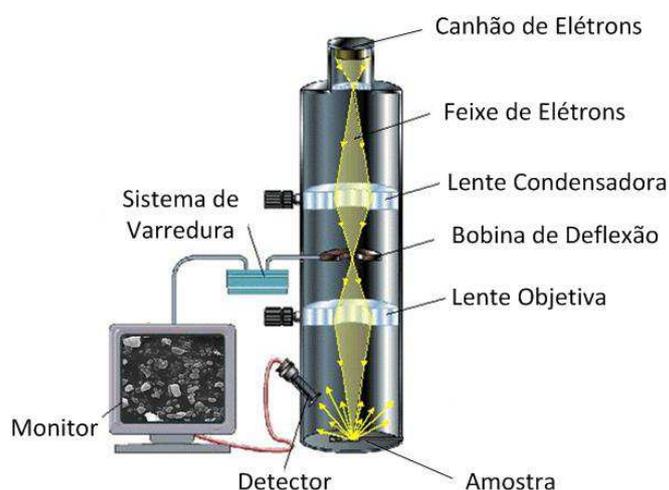
## 2.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) consiste em uma técnica de caracterização microestrutural com aplicações em diversos campos do conhecimento. A técnica permite avaliar qualitativamente a forma e as condições topográficas de superfície das partículas.

A elevada profundidade focal e a combinação de análises físico-químicas favoreceram a difusão do MEV (MALISKA, 2005). O princípio de funcionamento está baseado na interação de um feixe de elétrons com a amostra. A interação promove a geração de diversos sinais como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, elétrons Auger, raios X e catodoluminescência. A análise dos sinais obtidos permite caracterizar propriedades da amostra, como: composição, topografia e cristalografia.

O MEV é constituído basicamente por uma coluna ótico-eletrônica, unidade de varredura, detectores, câmara de amostras e sistema de vácuo. Na Figura 16 é mostrado um esquema construtivo do MEV.

Figura 16 – Representação esquemática do MEV



Fonte: Adaptado de Wisdom School (2016).

A coluna ótico-eletrônica é formada pelo canhão de elétrons, lentes eletromagnéticas e bobina de deflexão. O canhão de elétrons é responsável pela geração de elétrons com energia entre 1 e 30 keV. A quantidade de energia está associada à produção de sinais por meio da interação do feixe elétrico com a amostra. Normalmente, os elétrons são gerados por emissão termiônica, a partir de um filamento de tungstênio. O sistema ótico é composto por lentes eletromagnéticas condensadoras e objetiva. As lentes condensadoras são utilizadas na demagnificação do feixe eletrônico, ou seja, na redução do diâmetro do feixe. A lente objetiva é empregada no processo de foco da imagem. As bobinas de deflexão estão associadas ao sistema de varredura e permitem o redirecionamento do feixe de elétrons para regiões específicas da amostra (GOLDSTEIN e NEWBURY, 1992; MALISKA, 2005; DEDAVID *et al.*, 2007).

Os sinais gerados pela interação do feixe de elétrons com a amostra são atraídos por detectores. A intensidade do sinal é modulada e visualizada em um monitor. Os

sinais frequentemente utilizados na produção da imagem são os elétrons secundários e os elétrons retroespalhados (GOLDSTEIN e NEWBURY, 1992).

A câmara de amostras encontra-se conectada à coluna ótico-eletrônica e corresponde ao compartimento em que são inseridas as amostras. As amostras são colocadas em porta amostras aterrado, com o objetivo de evitar o acúmulo de cargas eletrostáticas, o que permite uma melhor qualidade da imagem (NEVES, 2014). Assim, as amostras devem ser condutoras, de forma a proporcionar melhor interação com o feixe de elétrons. Recobrimentos podem ser aplicados para amostras não condutoras por meio de processos físicos. Geralmente, o processo mais utilizado é a metalização, em que íons metálicos de ouro, ouro-paládio ou platina são depositados sobre a amostra (DEDAVID *et al.*, 2007). A coluna ótico eletrônica e a câmara de amostras são mantidas sob vácuo, com pressão em torno de  $10^{-5}$  Torr. O sistema de vácuo evita a ocorrência de colisões indesejáveis do feixe de elétrons com partículas presentes no interior do microscópio (NEVES, 2014).

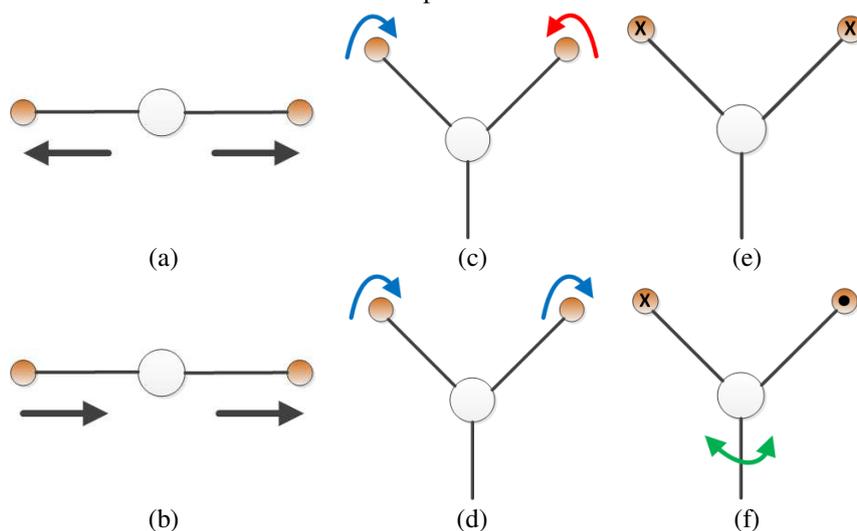
## 2.11 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO

A espectroscopia estuda a interação da radiação eletromagnética com a matéria e possibilita a determinação dos níveis de energia de átomos ou moléculas. As moléculas podem sofrer uma transição de nível energético absorvendo ou emitindo radiação eletromagnética. A região em que ocorre a transição depende do tipo de nível envolvido: eletrônico (ultravioleta ou visível), rotacional (micro-ondas) ou vibracional (infravermelho) (SALA, 1996).

A radiação infravermelha corresponde à parte do espectro eletromagnético localizada entre as regiões do visível e das microondas. A região espectral do infravermelho abrange o intervalo com número de onda entre  $12.800\text{ cm}^{-1}$  a  $10\text{ cm}^{-1}$  ou comprimento de onda de  $0,78\text{ }\mu\text{m}$  a  $1.000\text{ }\mu\text{m}$ . A região pode ser dividida em três faixas: radiação no infravermelho próximo ( $12.800\text{ cm}^{-1}$  a  $4.000\text{ cm}^{-1}$ ), radiação no infravermelho médio ( $4.000\text{ cm}^{-1}$  a  $200\text{ cm}^{-1}$ ) e radiação no infravermelho distante ( $200\text{ cm}^{-1}$  a  $10\text{ cm}^{-1}$ ). A região de maior utilidade para a análise de estruturas orgânicas está situada entre  $4.000\text{ cm}^{-1}$  e  $400\text{ cm}^{-1}$  (BORIN, 2003; MEDEIROS, 2009; SILVERSTEIN *et al.*, 2005).

A energia absorvida por uma molécula a partir da incidência da radiação infravermelha tende a afetar os níveis vibracionais de uma ligação química. O processo de vibração molecular é quantizado. No entanto, o espectro vibracional aparece como uma série de bandas ao invés de linhas, pois cada mudança de nível de energia vibracional corresponde a uma série de mudanças de níveis de energia rotacional (SILVERSTEIN *et al.*, 2005). As vibrações moleculares podem ser classificadas em dois tipos: estiramentos e deformações angulares, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Modos de vibração molecular: Estiramento simétrico (a) e assimétrico (b); Deformação angular simétrica (c) e assimétrica (d) no plano; Deformação angular simétrica (e) e assimétrica (f) fora do plano.



Fonte: adaptado de Silverstein *et al.* (2005).

O estiramento consiste em um modo de vibração que ocorre no eixo de ligação da molécula e provoca o movimento alternado de aumento e diminuição da distância interatômica. Para uma molécula triatômica, o estiramento pode ser simétrico ou assimétrico. No estiramento simétrico dois átomos se afastam ou se aproximam simultaneamente do átomo central, Figura 17 (a). No estiramento assimétrico um átomo se afasta e outro se aproxima do átomo central, Figura 17 (b) (SILVERSTEIN *et al.*, 2005; PIZZOLATTI, 2011).

A deformação angular consiste na variação do ângulo das ligações provocadas pelo movimento de um grupo de átomos na molécula. As deformações angulares podem ocorrer no plano ou fora do plano e podem ser classificadas em simétricas ou assimétricas. No plano, a deformação angular simétrica ocorre quando dois átomos realizam um movimento de translação em torno de um átomo central e possuem

sentidos opostos entre si, Figura 17 (c). Para a deformação angular assimétrica no plano o movimento de translação dos átomos apresenta o mesmo sentido, Figura 17 (d). Fora do plano, a deformação angular simétrica ocorre quando um dos átomos ligados ao átomo central se movimenta para frente e o outro átomo para trás do plano, isto é, com sentidos opostos, Figura 17 (e). A deformação angular assimétrica fora do plano ocorre quando os dois átomos ligados ao átomo central se movimentam no mesmo sentido para frente ou para trás do plano, Figura 17 (f) (SILVERSTEIN *et al.*, 2005; PIZZOLATTI, 2011).

Os primeiros espectrômetros de infravermelho empregados para análises químicas eram do tipo dispersivo. Um feixe de infravermelho era incidido na amostra e a varredura do espectro era realizada por dispersão em uma rede de difração. A Transformada de Fourier no Infravermelho (FTIR) foi introduzida por volta de 1960 e possui uma série de vantagens em relação aos sistemas de infravermelho dispersivos. O espectrômetro com transformada de Fourier permite a detecção simultânea de todos os sinais da fonte e proporciona uma velocidade de varredura superior aos sistemas dispersivos. A razão sinal/ruído é elevada para o espectrômetro com Transformada de Fourier devido existência de poucos elementos ópticos e ausência de fendas para atenuar a radiação. Além disso, o poder de resolução é extremamente elevado e a reprodutibilidade do comprimento de onda possibilita a análise de espectros complexos (SKOOG *et al.*, 2017).

Os espectrômetros de FTIR utilizam o interferômetro de Michelson. Basicamente, no interferômetro o feixe da radiação infravermelha é dividido em duas partes que são refletidas por um espelho móvel e um fixo de forma simultânea. Em seguida, os feixes são recombinados, passam pela amostra e chegam ao detector. O resultado é reproduzido por meio de um interferograma, isto é, um gráfico de tempo versus intensidade do sinal. A Transformada de Fourier é aplicada ao interferograma e permite a identificação dos espectros. O espectro geralmente aparece na forma de bandas e a intensidade é medida pela transmitância ou pela absorbância. A transmitância corresponde à razão entre a energia transmitida e a energia incidente na amostra. A absorbância é expressa pelo negativo do logaritmo na base dez da transmitância. Cada grupo funcional possui uma banda característica que permite a sua identificação no compósito (SILVERSTEIN *et al.*, 2005; SKOOG *et al.*, 2017).

Neste capítulo foi apresentada uma fundamentação teórica contendo informações técnicas sobre isoladores elétricos, borracha de silicone, cera de carnaúba,

avaliação de parâmetros físico-químicos e elétricos, e ensaios de envelhecimento acelerado. As informações serão utilizadas como auxílio para a compreensão dos fenômenos e da análise dos resultados. No próximo capítulo será realizada a revisão bibliográfica a respeito dos principais estudos na área do trabalho.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão apresentadas as principais contribuições das pesquisas reportadas na literatura que abordam a utilização de borracha de silicone no isolamento externo de equipamentos de alta tensão, além da influência das cargas na composição do polímero.

As primeiras aplicações de revestimentos de silicone no isolamento externo em alta tensão ocorreram em meados da década de 1960. Ao longo dos anos, diversas modificações na composição dos revestimentos têm sido realizadas com o objetivo de otimizar o desempenho e maximizar o tempo de vida útil. A seguir, são apresentadas de forma cronológica contribuições relevantes sobre o tema investigado.

Niemi e Mitchell (1968) estudaram o desenvolvimento de revestimentos de silicone resistentes a intempéries e aplicados no isolamento externo de isoladores cerâmicos e poliméricos. O desempenho de amostras sem revestimento e com revestimento foi avaliado por meio da exposição a intempéries em câmara de envelhecimento acelerado, resistência a arcos de alta tensão e ensaios de névoa. Medições da resistividade superficial, corrente de fuga e hidrofobicidade foram realizadas e utilizadas como parâmetros para as análises. Os autores evidenciaram que os revestimentos de silicone apresentaram resistência à exposição à radiação UV e outros fenômenos atmosféricos. Além disso, os autores constataram que a hidrofobicidade dos revestimentos proporciona maior resistência aos efeitos ocasionados por arcos e surgimento de trilhamento elétrico. No entanto, os autores não realizaram ensaios elétricos mais severos para avaliar a resistência aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão das amostras. Além disso, análises químicas deveriam ter sido realizadas para investigar alterações no revestimento após os fenômenos de envelhecimento.

Hall e Orbeck (1982) avaliaram o desempenho de revestimentos de RTV-SIR aplicados em isoladores de porcelana. Para tanto, ensaios de névoa salina foram realizados em bastões de porcelana e cadeias de isoladores de suspensão revestidos com RTV-SIR. Os bastões de porcelana foram submetidos a quatro níveis de condutividade de névoa e a corrente de fuga foi monitorada durante o ensaio. As cadeias de isoladores revestidas com RTV-SIR foram expostas a contaminação natural por um período

superior a seis anos e submetidas a ensaios de ruptura elétrica em condições de névoa limpa. Os autores constataram que a aplicação de RTV-SIR em isoladores de porcelana permitiu melhorar o desempenho e reduzir a probabilidade de *flashover* em regiões com altos níveis de contaminação. Além disso, os autores verificaram que a aplicação de revestimentos proporcionou uma redução nos custos de manutenção.

Kim *et al.* (1992) estudaram os efeitos da quantidade de partículas de ATH em RTV-SIR aplicados no revestimento de isoladores de alta tensão. Os isoladores foram submetidos a névoa salina e descargas de bandas secas por longos períodos de tempo. Os resultados mostraram que a corrente de fuga nos isoladores tende a diminuir com o aumento da quantidade de partículas de ATH. Segundo os autores, a ocorrência de descargas de bandas secas na presença de névoa salina causou grande redução no ângulo de contato e maior perda de hidrofobicidade quando comparado a situação do revestimento exposto exclusivamente à névoa salina (ausência de estresse elétrico). Os autores também concluíram que amostras sujeitas a arcos elétricos necessitaram de um maior tempo de recuperação da hidrofobicidade que amostras sujeitas apenas a névoa salina.

Goudie (2002) avaliou o desempenho de quatro revestimentos de RTV-SIR comerciais. Os revestimentos possuíam pigmentos, ATH, sílica, e/ou promotores de adesão na composição. Medições de dureza, resistência à tração, alongamento, propriedades dielétricas, resistência de arcos a seco, trilhamento elétrico e erosão foram realizadas. Os autores constataram que revestimentos com ATH apresentaram boa resistência à ocorrência de trilhamento elétrico e erosão. No entanto, não foram especificadas as concentrações das cargas utilizadas nas composições.

Meyer *et al.* (2004) analisaram a relação entre a condutividade térmica e a resistência à erosão ocasionada por arcos de bandas secas em revestimentos de SIR. Os compósitos foram formados por RTV-SIR adicionados de ATH e sílica com diferentes concentrações (10%, 30% e 50%, em peso) e tamanhos de partículas (1,5, 5 e 10  $\mu\text{m}$ ). Dois tipos de revestimentos foram produzidos para cada composição utilizando os processos de cura da SIR por meio de temperatura ambiente e por pressão com alta temperatura. A condutividade térmica foi avaliada por meio da temperatura transitória obtida por incidência de laser e monitoramento por câmera térmica. Ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e trilhamento elétrico e erosão foram realizados para avaliar o desempenho das diferentes composições. A partir dos resultados, os autores evidenciaram a existência de uma correlação entre a

condutividade térmica e a resistência à erosão em compósitos de RTV-SIR. Eles constataram que o crescimento das concentrações de ATH e sílica proporcionou aumentos na condutividade térmica e resistência à erosão das amostras. Os melhores desempenhos foram verificados para amostras empregando o processo de cura por pressão com alta temperatura.

Bernland (2005) realizou um estudo para introdução de propriedades hidrofóbicas em resinas epóxi a partir da combinação com silicone. Três métodos para incorporação do silicone a matriz do epóxi foram investigados. Entre os métodos, a introdução de diversas ceras à matriz epóxi foi avaliada para criação de uma rede que permitisse o movimento de partículas de baixo peso molecular. Foram realizadas análises de perda e recuperação da hidrofobicidade após estresses elétricos e envelhecimento acelerado em câmara de intemperismo, transferência de hidrofobicidade, calorimetria diferencial de varredura (DSC) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). O autor concluiu que não foi possível obter uma rede de aditivos hidrofóbicos através da matriz epóxi. No entanto, verificou-se que os melhores resultados são obtidos quando os aditivos hidrofóbicos se separaram e formaram uma segunda fase bem dispersa, permitindo uma recuperação após o envelhecimento por corona em relação ao silicone.

Pradeep *et al.* (2007) avaliaram o desempenho de blendas poliméricas de SIR e EVA contendo diferentes concentrações de ATH. Amostras foram submetidas ao envelhecimento acelerado por meio de radiação ultravioleta, descargas corona, bandas secas, calor e imersão em água. Alterações na resistividade superficial e volumétrica, perda e recuperação da hidrofobicidade, resistência à tração, alongamento, dureza, constante dielétrica e resistência aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão foram utilizados como parâmetros para a análise. Os autores concluíram que as composições com maiores concentrações de ATH proporcionaram melhores desempenhos para o isolamento elétrico. No entanto, o aumento da concentração de ATH provocou reduções na resistividade superficial e no módulo de resistência à tração. Além disso, tornou-se necessário avaliar o envelhecimento por radiação UV em períodos de tempo mais longos.

Fontanella *et al.* (2008) promoveram um estudo comparativo entre cinco tipos de revestimentos aplicados sobre substratos cerâmicos utilizados no isolamento elétrico. Os revestimentos analisados foram esmalte, tinta poliéster, resina acrílica, tinta marítima de poliuretano e silicone. Amostras dos revestimentos foram submetidas a

ensaios de névoa salina, envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta e erosão por jateamento de areia para simular a ação de intempéries. Alterações microscópicas na superfície, rugosidade e medições de ângulo de contato foram utilizadas como parâmetros para análise. A partir dos resultados, os autores constataram que o silicone apresentou maior hidrofobicidade ao final dos ensaios de névoa salina e envelhecimento por radiação UV. No entanto, o silicone apresentou o pior desempenho após o ensaio de jateamento de areia, com maiores perdas de massa.

Momen e Farzaneh (2010) estudaram o desempenho de diferentes concentrações de nanocargas de ZnO na composição de revestimentos de RTV-SIR aplicados em superfícies de vidro. Propriedades físico-químicas, dielétricas e comportamento do isolamento na presença de gelo na superfície foram avaliados. Os autores concluíram que o aumento na concentração de nanocargas de ZnO proporcionou maiores valores de permissividade elétrica. Contudo, não apresentou efeitos significativos nas características hidrofóbicas do revestimento. Os autores verificaram ainda que, os revestimentos semicondutores reduziram a quantidade de gelo acumulado na superfície da amostra. No entanto, não foram mencionadas no trabalho informações a respeito da corrente de fuga para análise de redução de gelo, além do comportamento da amostra durante ausência do gelo.

Syedmehti *et al.* (2012) investigaram a formulação de revestimentos de RTV-SIR super-hidrofóbicos (ângulos de contato maiores que 150°) contendo cargas de ATH (10%, 35% e 45%, em peso) e nanopartículas de flúor (30%, 13% e 10%, em peso). Medição de ângulo de contato, ensaio de trilhamento e erosão por meio do teste de plano inclinado (IPT) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados. Os autores constataram que os revestimentos contendo concentrações de nanopartículas de flúor entre 10% e 13% (em peso) e concentração de ATH mínima de 35% apresentaram ângulos de contato superiores aos revestimentos de RTV-SIR comerciais. Além disso, os revestimentos apresentaram bom desempenho quando exposto a UV, imersão em água e ensaio de trilhamento elétrico e erosão.

Almirall (2013) realizou um estudo sobre o desempenho de cargas micrométricas e nanométricas adicionadas a RTV-SIR empregados no revestimento de isoladores de vidro de alta tensão. No seu trabalho, foram avaliados parâmetros como permissividade relativa, resistência a erosão, corrente de fuga durante ensaio de névoa salina e hidrofobicidade. Foi constatado que o uso conjunto de nanocargas e microcargas proporcionou maior desempenho da RTV-SIR em relação ao uso exclusivo

de altas concentrações de microcargas. Contudo, a análise de recuperação da hidrofobicidade dos revestimentos foi baseada exclusivamente no método spray, que pode ocasionar imprecisões na conclusão. Análises de distorção harmônica não foram avaliadas.

Zheng *et al.* (2013) estudaram variações superficiais de compósitos de HTV-SIR antes e após exposição à radiação ultravioleta. Os compósitos de HTV-SIR foram adicionados de diferentes concentrações de ATH e sílica. A superfície das amostras foi caracterizada por meio de Espectroscopia de Fotoelétrons de Raios X (XPS), medições de ângulo de contato e feixe lento de pósitrons. Os autores evidenciaram que a técnica de feixe de pósitrons permite obter informações da estrutura superficial da borracha de silicone. Os resultados de XPS e ângulo de contato não apresentaram variações significativas em diferentes instantes de medição. Além disso, os autores evidenciaram que o processo de oxidação por radiação UV ocasionou a formação de uma camada de cisão entre as camadas de sílica e volumétrica do silicone.

Dave *et al.* (2013) investigaram o comportamento de revestimentos hidrofóbicos formados por  $\text{HfO}_2$  e aplicados a isoladores cerâmicos. Finos filmes de  $\text{HfO}_2$  foram depositados no substrato por meio de pulverização catódica (*sputtering*) e utilizando dois gases inertes, Argônio e Hélio. As propriedades estruturais, óticas e hidrofóbicas foram avaliadas por meio de difração de raios X (DRX), espectrofotometria UV-visível e ângulo de contato, respectivamente. Os autores evidenciaram que a deposição de  $\text{HfO}_2$  em atmosfera com gás Argônio apresentou maior uniformidade e hidrofobicidade em relação ao Hélio. No entanto, neste trabalho não foram realizados ensaios elétricos, mecânicos e em condições de intemperismo para avaliação do desempenho dos revestimentos.

Bezerra (2014) realizou um estudo do emprego de cargas micrométricas (ATH) e nanométricas (sílica) no revestimento de isoladores de vidro de alta tensão. No trabalho, foi avaliado o desempenho das amostras utilizando o processo de silanização das cargas no revestimento. Foram realizadas caracterizações de difração de raios X, MEV, teste de inflamabilidade, medição da corrente de fuga em condições de névoa salina e medição da hidrofobicidade. A autora concluiu que a adição de nanosílica e ATH à RTV-SIR proporcionou melhor desempenho ao revestimento, sendo os melhores resultados observados para o revestimento com 20% de ATH e 1% de nanosílica, além de todos os revestimentos que continham cargas silanizadas.

Cardoso *et al.* (2014) estudaram os efeitos de diferentes concentrações de ATH e sílica nas características físico-químicas e elétricas de compostos de silicone. As avaliações foram realizadas por meio de medições de densidade, dureza, alongamento, resistência à tração, espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDX), espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaio em roda de trilhamento elétrico. Os autores verificaram que maiores concentrações de cargas proporcionaram melhores desempenhos elétricos. No entanto, reduções nas propriedades mecânicas foram evidenciadas para grandes concentrações das cargas.

Manjang *et al.* (2015) analisaram propriedades elétricas e mecânicas de composições de RTV-SIR com diferentes concentrações de cinzas volantes (*fly ash*). A carga investigada é derivada da combustão do carvão e contém altas quantidades de sílica, alumina, óxido de ferro e óxido de cálcio. Medições de rigidez dielétrica, resistividade volumétrica e superficial, constante dielétrica, resistência à tração, alongamento e ângulo de contato foram realizadas para avaliar o desempenho das composições. A partir dos resultados, os autores constataram a viabilidade da aplicação de cinzas volantes em RTV-SIR. Os melhores desempenhos foram verificados para amostras contendo 30% e 40% de cinzas volantes por peso de RTV-SIR. No entanto, neste trabalho não foram realizadas análises do desempenho das amostras após longos períodos de atividade elétrica e condições de intempéries, que podem provocar a degradação dos compósitos.

Ghosh *et al.* (2015) avaliaram o desempenho de blendas de SIR e EVA contendo diferentes concentrações de nanosílica (0, 3, 6, 9 e 12 phr de SIR). As blendas foram submetidas a ensaios de envelhecimento acelerado por meio de exposição à água quente, altas temperaturas e radiação ultravioleta. As amostras foram caracterizadas mediante análises morfológicas, propriedades dielétricas, resistividade volumétrica e superficial, ângulo de contato e ensaios mecânicos. Segundo os autores, os efeitos do envelhecimento foram mais pronunciados para amostras expostas à radiação ultravioleta, com maiores reduções nas propriedades elétricas, mecânicas e hidrofóbicas dos compósitos. Os melhores resultados foram verificados para compósitos contendo 6 phr de nanosílica. Problemas de dispersão foram relatados pelos autores para amostras com concentrações de nanosílica superiores a 6 phr.

Germano (2015) estudou o efeito de cargas nanométricas nas propriedades elétricas, mecânicas e químicas de revestimentos de HTV-SIR. As amostras

investigadas foram produzidas a partir de dois tipos de HTV-SIR comerciais (puro e contendo 52% de ATH). Cargas nanométricas de sílica hidrofílica e hidrofóbica, dióxido de titânio e três tipos de alumina foram adicionados a matriz de HTV-SIR em diferentes concentrações. As amostras foram caracterizadas e avaliadas por meio de rugosidade superficial, microscopia eletrônica de varredura, arcos de alta tensão, medições de ângulo de contato, teste da gota dinâmica, tração mecânica, exposição à radiação UV, análises termogravimétricas e trilhamento elétrico e erosão. Os resultados evidenciaram que revestimentos de HTV-SIR puro adicionados de TiO<sub>2</sub> apresentaram melhores desempenhos. Além disso, o autor constatou que o ângulo de contato de recessão mantém uma correlação muito alta com a avaliação da retenção de hidrofobicidade.

Madidi *et al.* (2016) realizaram uma análise da estabilidade e propriedades dielétricas de revestimentos super hidrofóbicos de RTV-SIR contendo diferentes concentrações de nanocargas de TiO<sub>2</sub> (0%, 2%, 5%, 10% e 20%, em peso). Amostras das composições foram submetidas à imersão em diferentes soluções aquosas, aquecimento, exposição à radiação UV e testes de adesão para avaliação da estabilidade. Análises morfológicas, medições da permissividade relativa e de ângulo de contato foram realizadas. Segundo os autores, os revestimentos apresentaram-se estáveis após diversos tipos de envelhecimento, com ângulos de contato superiores a 150°. Eles constataram que a introdução de nanocargas de TiO<sub>2</sub> proporcionou aumento da permissividade relativa do compósito polimérico. No entanto, não foram apresentadas análises da permissividade relativa para uma ampla faixa de frequência.

No trabalho de dissertação do próprio autor, Nóbrega (2016), foi realizado um estudo sobre a viabilidade da utilização da cera de carnaúba na composição de revestimentos RTV-SIR aplicados no isolamento externo em alta tensão. Os revestimentos foram preenchidos com diferentes concentrações de alumina tri-hidratada (0% e 20%, em peso) e cera de carnaúba (0%, 5%, 10%, 20% e 30%, em peso) e foram aplicados à superfície de isoladores de vidro tipo suspensão. Os isoladores com revestimento foram submetidos a ensaios cíclicos de névoa salina com o objetivo de degradar o isolamento. O desempenho dos revestimentos foi avaliado a partir de medições da corrente de fuga, análise harmônica e monitoramento da recuperação da hidrofobicidade. A partir dos resultados, o autor constatou que a adição de baixas concentrações da cera de carnaúba a borracha de silicone proporcionou bons desempenhos ao isolamento. Além disso, o autor verificou que a análise da distorção

harmônica total e da razão entre 3° e 5° harmônicos dos sinais de corrente de fuga evidenciam o envelhecimento das amostras. O monitoramento da hidrofobicidade, após a realização do ensaio cíclico de névoa salina, indicou que os revestimentos apresentaram recuperação parcial ou total da hidrofobicidade. No entanto, a realização de um estudo mais aprofundado sobre a influência da cera de carnaúba deve ser realizada para avaliar os efeitos provocados pelos diversos agentes que causam a degradação dos revestimentos e o desempenho em condições de poluição. Análises químicas e morfológicas das composições também não foram realizadas no trabalho de dissertação.

Wang et al. (2017) promoveram um estudo da resistência ao trilhamento elétrico e erosão de revestimentos de RTV-SIR adicionados de microcargas de ATH e Nitreto de Alumínio (AlN). A resistência aos fenômenos de trilhamento e erosão foi comparada com a condutividade e dissipação térmica dos compósitos. Os autores evidenciaram que a condutividade térmica dos compósitos aumenta com o acréscimo de ATH e AlN e a dissipação térmica é acelerada com o aumento da condutividade térmica. Os melhores desempenhos foram verificados para compósitos contendo ATH, com maior condutividade térmica e menores valores de corrente de fuga e profundidade de erosão. Os autores também constataram que os compósitos com ATH permitem uma dissipação térmica mais eficiente que os compósitos contendo AlN.

Mathersa *et al.* (2017) realizaram análises químicas e elétricas para avaliar a influência da ATH no desempenho de revestimento de RTV-SIR submetidas a ensaios de trilhamento elétrico e erosão. Análise termogravimétrica (TGA), espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDX) e monitoramento da corrente de fuga foram realizados para avaliar o desempenho e a deterioração dos revestimentos. A partir dos resultados, os autores constataram maiores níveis de corrente de fuga e deterioração para revestimentos sem ATH. Alterações morfológicas e químicas foram evidenciadas e indicaram que os efeitos do envelhecimento foram mais predominantes para amostras sem ATH.

Tepsila e Suksri (2018) investigaram o desempenho elétrico e mecânico de revestimentos de RTV-SIR adicionados de cargas orgânicas extraídas de conchas de caramujo. O desempenho das cargas orgânicas foi comparado com revestimentos contendo cargas inorgânicas de CaCO<sub>3</sub> em concentrações de 0% a 50% em peso. Amostras das composições foram submetidas a tensões até 10 kV e medições da

corrente de fuga foram realizadas. Ensaio de tração e medições de ângulo de contato estático foram realizados para avaliar as propriedades mecânicas e hidrofóbicas do material, respectivamente. A partir dos resultados, os autores evidenciaram a aplicabilidade da carga estudada em revestimentos de RTV-SIR. Amostras contendo 40% e 50% de cargas orgânicas apresentaram menores valores de corrente de fuga em relação a revestimentos com cargas inorgânicas nas mesmas proporções. O melhor desempenho mecânico foi observado para amostras contendo 5% de cargas orgânicas. As medições de ângulo de contato evidenciaram um aumento da hidrofobicidade para os revestimentos adicionados de cargas orgânicas em relação aos revestimentos com cargas inorgânicas. Todavia, no trabalho não foram realizadas análises de envelhecimento acelerado para investigar a resistência aos efeitos da degradação que os revestimentos podem estar submetidos em campo.

Nazir *et al.* (2018) estudaram os efeitos térmicos e a resistência ao trilhamento elétrico e erosão de amostras de RTV-SIR preenchidas com ATH, Nitreto de Alumínio (AlN) e Nitreto de Boro (BN). Análises termogravimétricas (TGA), condutividade térmica e distribuição térmica por meio de termografia foram realizadas para investigar os efeitos térmicos das amostras e associar aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão. Os autores evidenciaram que a condutividade térmica dos compósitos aumenta com o acréscimo da concentração das cargas e com maiores valores verificados para as amostras preenchidas com BN. As amostras preenchidas com BN possuíam maior resistência aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão no ensaio de plano inclinado IEC 60587, seguidas pelas amostras preenchidas com ATH. As amostras preenchidas com AlN apresentaram desempenho similar às amostras sem carga. Os autores atribuíram que o melhor desempenho das amostras preenchidas com BN aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão está associado a maior estabilidade e capacidade de condução térmica.

Ilhan e Cherney (2018) avaliaram o desempenho de cadeias de isoladores revestidas com RTV-SIR e instalados na posição horizontal e vertical durante ensaio de névoa salina com duração de 1000h. Os revestimentos foram compostos por RTV-SIR adicionado de ATH ou sílica e foram aplicados parcialmente (parte inferior) ou em toda a superfície de isoladores de suspensão de porcelana. Medições de corrente de fuga foram utilizadas como parâmetros para a análise. Os autores evidenciaram que os isoladores instalados na posição vertical não apresentaram perda de hidrofobicidade ao longo da distância de escoamento, independentemente do tipo de carga utilizada. Já os

isoladores instalados na horizontal apresentaram perda temporária de hidrofobicidade com menores valores de corrente de fuga para revestimentos de RTV-SIR preenchidos com sílica. Além disso, os autores concluíram que o desempenho de revestimentos aplicados apenas na parte inferior dos isoladores foi similar aos revestimentos aplicados em toda a superfície do isolador. No entanto, o ensaio foi realizado apenas para uma condição específica, tornando-se necessário uma avaliação mais ampla e para diferentes parâmetros de ensaio para investigar o desempenho de revestimentos aplicados parcialmente ou completamente sobre a superfície do isolador.

Mendoza *et al.* (2019) estudaram o desenvolvimento de superfícies super-hidrofóbicas por meio da adição de nanopartículas hidrofóbicas e hidrofílicas de ZnO na superfície de substratos de vidro e PDMS. As nanopartículas de ZnO foram adicionadas por meio de três técnicas de deposição (spray, imersão e pipetagem de gotículas) e utilizando dois diferentes procedimentos de secagem. A caracterização das amostras e avaliação do desempenho foi realizada por meio de medições de ângulo de contato estático e dinâmico, cálculo da energia superficial para determinação da molhabilidade e análises de MEV. A partir dos resultados, os autores concluíram que o método de deposição é fundamental para obtenção de uma distribuição e rugosidade adequadas à obtenção de superfícies superhidrofóbicas. Eles constataram que o método de deposição por spray em substratos de PDMS proporcionou a obtenção de superfícies super-hidrofóbicas para os dois tipos de nanopartículas de ZnO e independente do método de secagem. O método da imersão também proporcionou a obtenção de superfícies com altos valores de ângulo de contato para os dois tipos de nanopartículas. No entanto, a obtenção de superfícies super-hidrofóbicas foi obtida apenas para o método de secagem vertical. A técnica de deposição de pipetagem de gotículas não proporcionou o desenvolvimento de superfícies super-hidrofóbicas.

Jeon *et al.* (2019) investigaram os efeitos de nanopartículas de ATH na resistência ao trilhamento elétrico de RTV-SIR. As nanopartículas de ATH foram avaliadas para concentrações de 1% a 20% em fração de massa e o desempenho foi comparado com amostras de RTV-SIR adicionados de microcargas de SiO<sub>2</sub> para concentrações de 10% e 20%. Medições de ângulo de contato estático e corrente de fuga superficial, análises termogravimétricas (TGA) e teste de plano inclinado conforme IEC 60587 foram realizados para avaliar o desempenho das composições. Os autores constataram que o aumento da concentração de nanopartículas de ATH proporcionou um maior tempo até a ocorrência de trilhamento elétrico e que amostras de RTV-SIR

adicionadas de 5% de nanopartículas de ATH possuíam desempenho similar aos compósitos com 20% em peso de SiO<sub>2</sub>. Além disso, os autores não observaram diferenças significativas para as medições de ângulo de contato e evidenciaram reduções nos valores de corrente de fuga e maior estabilidade térmica com o aumento de nanopartículas de ATH.

De forma sumarizada, estão apresentadas na Tabela 2 as principais contribuições das pesquisas citadas neste capítulo, com relação à utilização de elastômeros no isolamento externo em alta tensão. Além disso, a contribuição científica deste trabalho é mencionada na tabela.

Tabela 2- Resumo das contribuições das pesquisas e cargas típicas utilizadas na RTV-SIR.

| Ano  | Pesquisadores            | Contribuição  | Tipo de Carga    |
|------|--------------------------|---|------------------|
| 1968 | Niemi e Mitchell         | Estudaram o desenvolvimento de revestimentos de silicone para aplicação no isolamento externo de isoladores de cerâmicos e poliméricos.   | -----            |
| 1982 | Hall e Orbeck            | Avaliaram o desempenho de cadeias de isoladores cerâmicos revestidos com RTV-SIR.   | -----            |
| 1992 | Kim <i>et al.</i>        | Investigaram o desenvolvimento da corrente de fuga sob névoa salina e recuperação da hidrofobicidade para diferentes concentrações de ATH.  | ATH              |
| 2002 | Goudie                   | Realizou uma análise comparativa do desempenho de revestimentos de RTV-SIR comerciais com diferentes composições.   | ATH<br>SÍLICA    |
| 2004 | Meyer <i>et al.</i>      | Investigaram a relação entre a condutividade térmica e a resistência à erosão ocasionada por arcos de bandas secas em revestimentos de SIR.   | ATH<br>SÍLICA    |
| 2005 | Bernland                 | Estudou a introdução de propriedades hidrofóbicas em resinas epóxi a partir da combinação com silicone.   | -----            |
| 2007 | Pradeep <i>et al.</i>    | Avaliaram o desempenho de blendas poliméricas de SIR e EVA contendo diferentes concentrações de ATH e submetidas a testes de envelhecimento acelerado.  | ATH              |
| 2008 | Fontanella <i>et al.</i> | Realizaram um estudo comparativo entre cinco tipos de revestimentos a partir de testes de névoa salina, envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta e erosão por jateamento de areia.      | -----            |
| 2010 | Momen e Farzaneh         | Estudaram o desempenho de diferentes concentrações de nanocargas de ZnO na composição de revestimentos de RTV SIR aplicados em superfícies de vidro.  | ZnO              |
| 2012 | Syedmehti <i>et al.</i>  | Investigaram a formulação de revestimentos de RTV-SIR super hidrofóbicos contendo cargas de ATH e nanopartículas de flúor.  | ATH<br>F         |
| 2013 | Almirall                 | Analisou o desempenho de cargas micrométricas e nanométricas adicionadas a RTV-SIR empregados no revestimento de isoladores de vidro de alta tensão.  | ATH<br>SÍLICA    |
| 2013 | Zheng <i>et al.</i>      | Estudaram variações superficiais de compósitos de HTV-SIR antes e após exposição à radiação ultravioleta. Os compósitos de HTV-SIR foram adicionados de diferentes concentrações de ATH e sílica. | ATH<br>SÍLICA    |
| 2013 | Dave <i>et al.</i>       | Investigaram o comportamento de revestimentos hidrofóbicos formados por HfO <sub>2</sub> e aplicados a isoladores cerâmicos.  | HfO <sub>2</sub> |

Tabela 2 – (Continuação)

| Ano  | Pesquisadores          | Contribuição   | Tipo de Carga                     |
|------|------------------------|--|-----------------------------------|
| 2014 | Bezerra                | Avaliou o emprego de cargas micrométricas e nanométricas no revestimento de isoladores de vidro de alta tensão.  | ATH<br>SÍLICA                     |
| 2014 | Cardoso <i>et al.</i>  | Estudaram os efeitos de diferentes concentrações de ATH e sílica nas características físico-químicas e elétricas de compostos de silicone.   | ATH<br>SÍLICA                     |
| 2015 | Manjang <i>et al.</i>  | Analisaram propriedades elétricas e mecânicas de composições de RTV-SIR com diferentes concentrações de cinzas volantes ( <i>fly ash</i> ).  | Cinzas<br>Volantes                |
| 2015 | Ghosh <i>et al.</i>    | Avaliaram o desempenho de blendas poliméricas de SIR e EVA contendo diferentes concentrações de nanosílica após ensaios de envelhecimento acelerado.   | SÍLICA                            |
| 2015 | Germano                | Estudou o efeito de cargas nanométricas nas propriedades elétricas, mecânicas e químicas de revestimentos de HTV-SIR.  | ATH<br>SÍLICA<br>TiO <sub>2</sub> |
| 2016 | Madidi <i>et al.</i>   | Realizaram uma análise da estabilidade e propriedades dielétricas de revestimentos super-hidrofóbicos de RTV-SIR contendo diferentes concentrações de nanocargas de TiO <sub>2</sub>           | TiO <sub>2</sub>                  |
| 2016 | Nóbrega                | Estudou a aplicabilidade da cera de carnaúba na composição de revestimentos utilizados no isolamento externo em alta tensão.   | ATH<br>Cera de<br>Carnaúba        |
| 2017 | Wang <i>et al.</i>     | Realizaram um estudo da resistência ao trilhamento elétrico e erosão de revestimentos de RTV-SIR adicionados de microcargas de ATH e Nitreto de Alumínio (AlN).                                | ATH<br>AlN                        |
| 2017 | Mathersa <i>et al.</i> | Realizaram análises químicas e elétricas para avaliar a influência da ATH no desempenho de revestimento de RTV-SIR submetidas a ensaios de trilhamento elétrico e erosão.                      | ATH                               |
| 2018 | Tepsila e Suksri       | Investigaram o desempenho elétrico e mecânico de revestimentos de RTV-SIR adicionados de cargas orgânicas extraídas de conchas de caramujo.  | Orgânica<br>CaCO <sub>3</sub>     |
| 2018 | Nazir <i>et al.</i>    | Estudaram os efeitos térmicos e a resistência ao trilhamento elétrico e erosão de amostras de RTV-SIR preenchidas com ATH, Nitreto de Alumínio (AlN) e Nitreto de Boro (BN).                   | ATH<br>AlN<br>BN                  |
| 2018 | Ilhan e Cherney        | Avaliaram o desempenho de cadeias de isoladores revestidas parcial ou integralmente com RTV-SIR e instalados na posição horizontal e vertical durante ensaio de névoa salina de longa duração. | ATH<br>SÍLICA                     |
| 2019 | Mendoza <i>et al.</i>  | Estudaram o desenvolvimento de superfícies super-hidrofóbicas por meio da adição de nanopartículas hidrofóbicas e hidrofílicas de ZnO na superfície de substratos de vidro e PDMS.             | ZnO                               |
| 2019 | Jeon <i>et al.</i>     | Investigaram os efeitos de nanopartículas de ATH na resistência ao trilhamento elétrico de RTV-SIR.  | ATH<br>SÍLICA                     |
|      | Este trabalho de Tese  | Avalia o desempenho da adição de cera de carnaúba na composição de revestimentos de RTV-SIR aplicados no isolamento elétrico em alta tensão.   | ATH<br>Cera de<br>Carnaúba        |

Fonte: Próprio autor.

De acordo com o exposto, verifica-se que inúmeras pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de aprimorar o desempenho de revestimentos de RTV-SIR e/ou reduzir custos durante o processo de produção por meio da adição de cargas de preenchimento na matriz polimérica.

A ATH e a sílica são cargas comumente utilizadas no preenchimento da borracha de silicone e ainda continuam sendo estudadas por diversos pesquisadores para diferentes condições de aplicação. Em contrapartida, alguns pesquisadores buscam avaliar diferentes materiais que proporcionem uma alternativa à ATH e a sílica para aplicações no isolamento elétrico, como  $\text{TiO}_2$  e BN, por exemplo. Além disso, algumas pesquisas abordam a utilização de cargas para obtenção ou intensificação de propriedades específicas no revestimento (hidrofobicidade, por exemplo) e a otimização do desempenho a partir da utilização conjunta de diferentes tipos de cargas na matriz polimérica, como nos trabalhos de Almirall (2013) e Bezerra (2014).

As técnicas empregadas para avaliação do desempenho dos revestimentos são diversas e variam desde análises microestruturais até processos que submetem o material a condições adversas de aplicação, visando promover uma degradação acelerada. Em muitos trabalhos, os parâmetros adotados para configuração dos ensaios são diferentes, o que geralmente dificulta a realização de uma análise comparativa direta e precisa entre o desempenho de diferentes revestimentos.

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica com as principais pesquisas relacionadas à utilização e composição de revestimentos aplicados no isolamento elétrico em alta tensão, além de suas principais contribuições. No próximo capítulo serão descritos os materiais utilizados nos ensaios e os procedimentos adotados.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa, com a descrição dos materiais empregados na investigação e as configurações dos ensaios elétricos e de caracterização dos materiais.

### 4.1 MATERIAL

#### 4.1.1 MATRIZ POLIMÉRICA

A matriz polimérica foi constituída pela borracha de silicone RTV 615 A com agente de cura B, fabricado pela *Momentive Performance Materials*. Este material foi selecionado por não conter cargas e possuir propriedades elétricas e mecânicas similares às borrachas de silicone empregadas no isolamento externo em alta tensão. Além disso, a RTV 615 A possui baixa viscosidade, que permite um fácil escoamento em superfícies complexas como isoladores. As propriedades do silicone utilizado podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades da borracha de silicone RTV 615.

| Propriedades                                   | Valor                |
|--|----------------------|
| Viscosidade (mPa.s)                            | 4000                 |
| Dureza – Shore A                               | 44                   |
| Resistência à Tração (kg/cm <sup>2</sup> )     | 65                   |
| Índice de Refração                             | 1,406                |
| Rigidez Dielétrica (kV/mm)                     | 19,7                 |
| Constante Dielétrica – 1 kHz                   | 2,7                  |
| Fator de Dissipação – 1 kHz                    | $6 \times 10^{-4}$   |
| Resistividade Volumétrica ( $\Omega\text{m}$ ) | $1,8 \times 10^{13}$ |
| Condutividade Térmica ( $W/m \cdot K$ )        | 0,2                  |
| Faixa de Temperatura (°C)                      | -60 a 204            |

Fonte: *Momentive* (2007).

O tempo de cura da RTV-SIR selecionada é afetada mediante a temperatura envolvida no processo. Na Tabela 4 estão mostrados os tempos de cura aproximados para diferentes valores de temperaturas.

Tabela 4 – Tempo de cura aproximado da RTV 615.

| Temperatura (°C) | Tempo de Cura |
|------------------|---------------|
| 25               | 6-7 dias      |
| 65               | 4 horas       |
| 100              | 1 hora        |
| 125              | 45 min        |
| 150              | 15 min        |

Fonte: *Momentive* (2007).

## 4.1.2 CARGAS

### 4.1.2.1 CERA DE CARNAÚBA

A cera de carnaúba utilizada foi do Tipo I e na forma de pó. A cera foi fornecida pela indústria Foncepi, localizada no estado do Ceará, Brasil. As especificações técnicas da cera de carnaúba utilizada podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificação da cera de carnaúba Tipo I utilizada.

| Propriedades                       | Valor              |
|------------------------------------|--------------------|
| Ponto de fusão                     | 83,5°C             |
| Teor de umidade e material volátil | 0,21%              |
| Índice de acidez                   | 3,32 mg KOH/g      |
| Índice de saponificação            | 88,97 mg KOH/g     |
| Resíduo de ignição                 | 0,02%              |
| Impurezas insolúveis               | < 0,01%            |
| Índice de ésteres                  | 75,65 mg KOH/g     |
| Cor                                | 3,5 Escala Gardner |

Fonte: Foncepi (2017).

### 4.1.2.2 ALUMINA TRI-HIDRATADA – ATH

A alumina tri-hidratada utilizada foi do tipo Hydrogard-GP, produzida pela *ALCOA WORLD ALUMINA LLC*. Esse tipo de alumina foi desenvolvido para aplicações em sistemas poliméricos como retardante de chamas e supressor de fumaça. As especificações técnicas da ATH podem ser visualizadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações da ATH utilizada.

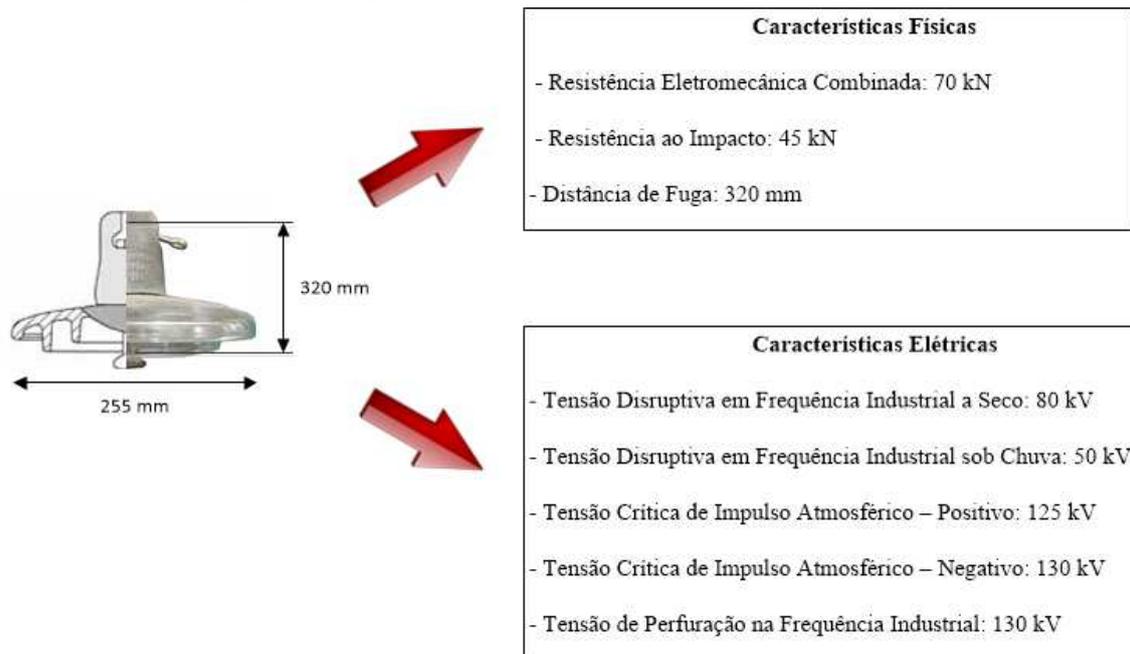
| <b>Composição Química (%)</b>  | <b>Típico</b> | <b>Características Físicas</b>       | <b>Típico</b> |
|--------------------------------|---------------|--------------------------------------|---------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 65,2          | Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,42          |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,017         | Índice de Refração                   | 1,57          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,013         | Dureza (Mohs)                        | 2,5           |
| Na <sub>2</sub> O – Total      | 0,34          | Absorção de Óleo (%)                 | 23            |
| <b>Granulometria</b>           | <b>Típico</b> | <b>Outras Características</b>        | <b>Típico</b> |
| + #325 (%)                     | 1,4           | Umidade (110°C)                      | 0,17          |
| D10 Coulter (μ)                | 2,5           | Perda ao Fogo (1000°C)               | 34,2          |
| D50 Coulter (μ)                | 10,2          | Insolúveis em Ácido (%)              | 0,38          |
| D90 Coulter (μ)                | 29,9          | -----                                | -----         |

Fonte: Alcoa (2015).

### 4.1.3 ISOLADORES DE VIDRO

Os isoladores utilizados na pesquisa foram de vidro temperado - ANSI classe 52-3, tipo suspensão e fabricados pela *Sediver*. As especificações técnicas dos isoladores utilizados podem ser consultadas na Figura 18. As informações foram obtidas mediante consulta ao catálogo do fabricante.

Figura 18 - Especificações técnicas do isolador de vidro utilizado.



Fonte: Adaptado de Sediver Catalogue (2008).

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos foram obtidos a partir de diferentes proporções das cargas e da borracha de silicone. Os percentuais de concentração mássica da cera de carnaúba e ATH foram escolhidos baseados nos trabalhos de Almirall (2013), Bezerra (2014) e Nóbrega (2016) e de forma a explorar o desempenho em altas e baixas concentrações. O percentual de concentração mássica dos compósitos investigados no presente trabalho pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7- Percentual de concentração mássica dos compósitos investigados.

| <b>Revestimento</b> | <b>Silicone (%)</b> | <b>Alumina (%)</b> | <b>Cera de Carnaúba (%)</b> |
|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| <b>S100</b>         | 100                 | -----              | -----                       |
| <b>SC5</b>          | 95                  | -----              | 5                           |
| <b>SC10</b>         | 90                  | -----              | 10                          |
| <b>SC20</b>         | 80                  | -----              | 20                          |
| <b>SA20</b>         | 80                  | 20                 | -----                       |
| <b>SAC5</b>         | 75                  | 20                 | 5                           |
| <b>SAC10</b>        | 70                  | 20                 | 10                          |
| <b>SAC20</b>        | 60                  | 20                 | 20                          |

Fonte: Próprio autor.

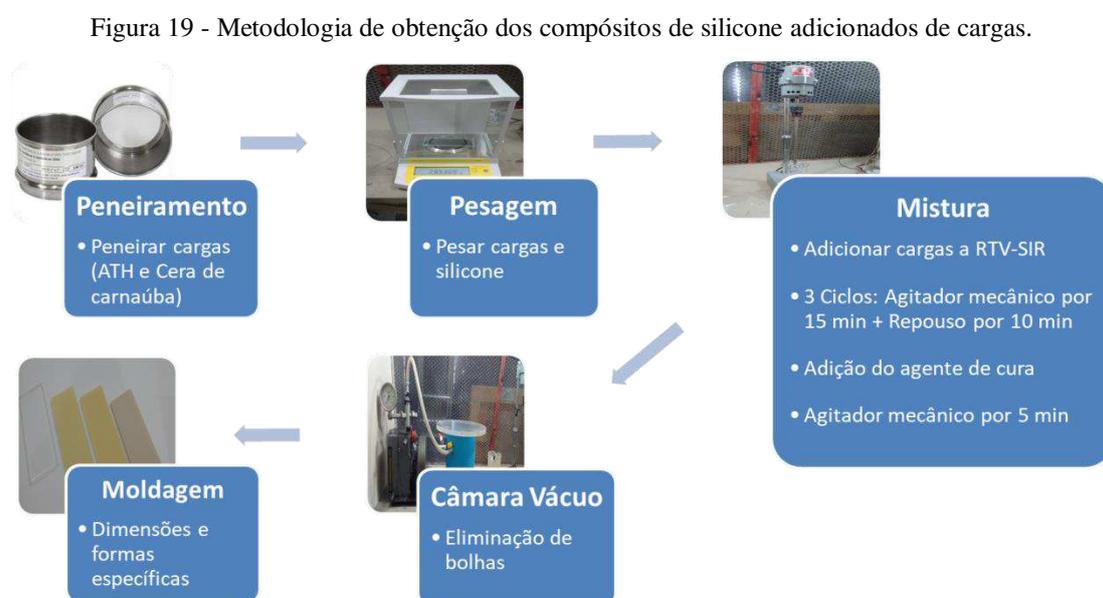
O procedimento empregado para a preparação dos compósitos pode ser dividido em cinco etapas: peneiramento, pesagem, mistura, vácuo e moldagem.

A primeira etapa consistiu no peneiramento da ATH e da cera de carnaúba a fim de selecionar partículas menores e eliminar impurezas. Para tanto, foi utilizado uma peneira granulométrica em malha ASTM 200, com abertura de 74  $\mu\text{m}$ . Na etapa de pesagem as cargas e o silicone foram individualmente pesados nas proporções indicadas na Tabela 7. Posteriormente, na etapa de mistura, as cargas foram adicionadas ao silicone e misturados por meio de um agitador mecânico, com velocidade em torno de 1.000 rpm.

A homogeneização da composição foi realizada em três ciclos de 25 minutos, constituídos por 15 minutos de agitação mecânica e 10 minutos de repouso, para evitar o aquecimento elevado da amostra. Em seguida, o agente de cura foi adicionado à composição na proporção 10:1 em relação à massa do silicone, ou seja, para cada 10 g

de silicone foi adicionado 1g de agente de cura. A composição foi novamente conduzida ao agitador mecânico por mais 5 minutos para proporcionar uma dispersão uniforme do agente de cura.

Finalizada a etapa de mistura, as composições foram inseridas em uma câmara de vácuo por um período aproximado de 20 minutos para a eliminação de bolhas resultantes do processo de mistura. Finalmente, na etapa de moldagem, as amostras foram preparadas nas dimensões e formas específicas para cada ensaio. As amostras foram colocadas em repouso à temperatura ambiente por um período mínimo de 7 dias até que a cura do revestimento fosse alcançada, de acordo com as recomendações da Tabela 4. Na Figura 19 é possível visualizar, de forma sucinta, as etapas empregadas para a preparação dos compósitos.



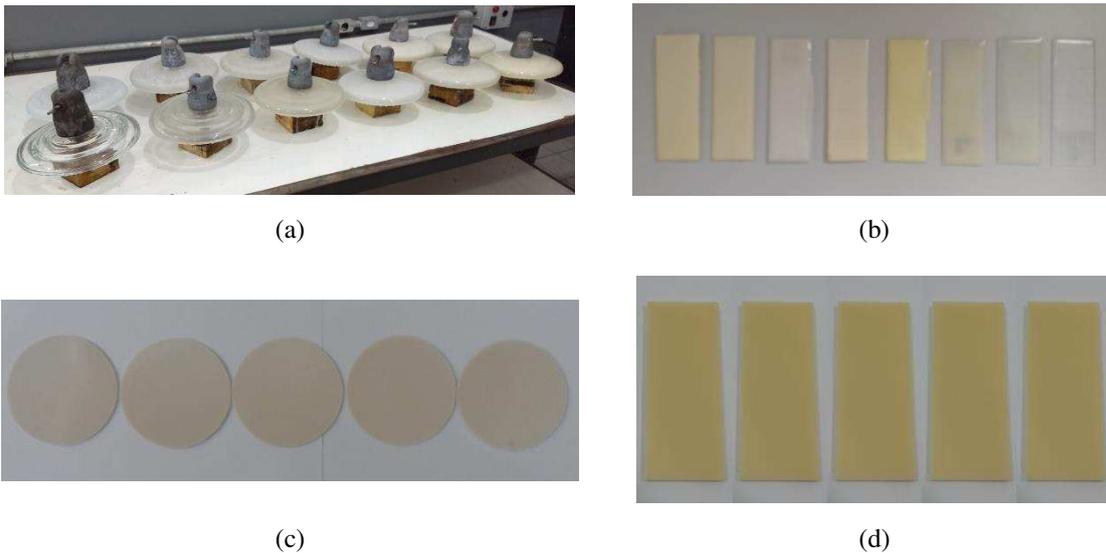
Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.1.1 AMOSTRAS

As amostras utilizadas consistiram em substratos de vidro revestidos e corpos de prova moldados com as composições de silicone, conforme ilustrado na Figura 20. O primeiro conjunto de amostras foi formado por 12 isoladores de suspensão revestidos com as composições S100, SC5, SC10, SA20, SAC5 e SAC10 e foram utilizados para ensaios de poluição artificial, conforme Figura 20 (a). O revestimento foi aplicado com o auxílio de um pincel após a limpeza da superfície do isolador. Além disso, lâminas de vidro retangulares com dimensões de 25 mm x 70 mm foram revestidas com as

composições indicadas na Tabela 7 e utilizadas para os ensaios de envelhecimento acelerado por radiação UV e avaliação da hidrofobicidade, conforme Figura 20 (b). O segundo conjunto de amostras foi formado por corpos de provas circulares (85 mm x 2 mm) e retangulares (50 mm x 120 mm x 6 mm) com as composições indicadas na Tabela 7, conforme Figura 20 (c) e Figura 20 (d). As amostras circulares foram utilizadas para a realização dos ensaios de rigidez dielétrica, constante dielétrica e tangente de perdas. As amostras retangulares foram utilizadas para avaliação da resistência do material aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão.

Figura 20 – Ilustração das amostras utilizadas para os ensaios de (a) poluição artificial (b) envelhecimento acelerado por radiação UV e hidrofobicidade (c) constante dielétrica e rigidez dielétrica (d) trilhamento elétrico e erosão.



Fonte: Próprio autor

#### 4.2.2 ENSAIOS

A seguir, serão apresentados os procedimentos e configurações adotados para a realização dos ensaios neste trabalho. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) e em laboratórios vinculados às unidades acadêmicas de Engenharia de Materiais e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande.

#### 4.2.2.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

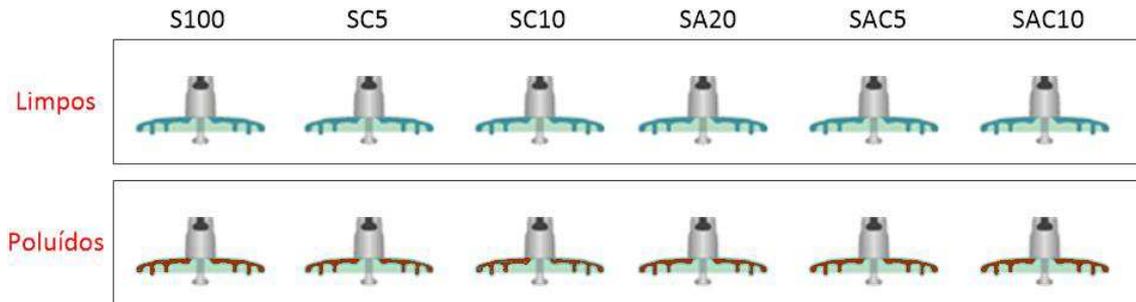
As análises de MEV foram realizadas na seção transversal de amostras obtidas a partir das formulações indicadas na Tabela 7. As superfícies das amostras foram previamente revestidas com uma camada de ouro utilizando o metalizador *Quick Coater* SC-701 da marca Sanyu Electron. Posteriormente, a distribuição das cargas na matriz de silicone e o aspecto morfológico foram avaliados a partir de micrografias obtidas por meio do microscópio eletrônico de varredura TESCAN, modelo VEGA 3, com tensão de operação de 10 kV. Os ensaios de MEV foram realizados no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) – UFCG.

#### 4.2.2.2 ENSAIO DE POLUIÇÃO ARTIFICIAL

Para a realização do ensaio de poluição artificial, isoladores com poluição e sem poluição foram submetidos a descargas disruptivas na frequência industrial para avaliar a suportabilidade dielétrica e promover um envelhecimento acelerado. A corrente de fuga foi monitorada antes e após a aplicação das descargas disruptivas para avaliar o estado do isolamento e investigar indícios de degradação.

O ensaio foi realizado em isoladores de suspensão revestidos com as composições indicadas na Tabela 7, exceto as composições SC20 e SAC20. Para a realização deste ensaio, os isoladores revestidos foram subdivididos em dois grupos. Cada grupo foi formado por isoladores revestidos com as composições analisadas e submetidos a dois diferentes níveis de poluição. Os isoladores do primeiro grupo não foram submetidos à poluição artificial. Os isoladores do segundo grupo foram submetidos a condições de poluição. A condutividade da suspensão contaminante aplicada no segundo grupo foi de 3 S/m e pode ser classificada como uma poluição média-pesada conforme IEC 60815-1 (2015) e IEC 60507 (2013). Na Figura 21 encontra-se esquematizada a formação dos grupos e condições aplicadas.

Figura 21 – Condições de poluição para os diferentes grupos formados.

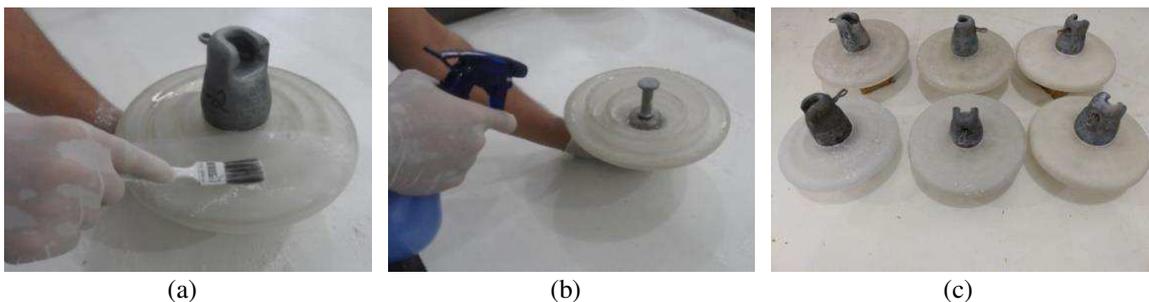


Fonte: Próprio autor.

A camada de poluição foi aplicada conforme recomendações descritas em CIGRE (2013) para isoladores poliméricos com recuperação da hidrofobicidade (seção 2.5.2). As etapas consistem, basicamente, na: limpeza da superfície do isolador, pré-condicionamento, camada de poluição e período de recuperação.

Inicialmente, a limpeza da superfície dos isoladores foi realizada utilizando-se água destilada. Para a etapa de pré-condicionamento foi empregado kaolin, na forma de pó. O kaolin foi aplicado na superfície do isolador com auxílio de um pincel e de forma a proporcionar uma distribuição uniforme na superfície. Em seguida, a suspensão contaminante foi aplicada à superfície do isolador por meio de borrifamento. A suspensão foi preparada conforme recomendações da norma IEC 60507: 40 g de kaolin, 1000 g de água e quantidade adequada de NaCl, de forma a obter a condutividade necessária para o ensaio. Finalizado a aplicação da poluição, as amostras foram mantidas em repouso, à temperatura ambiente, durante um período de 48 horas. Após o período de recuperação, os isoladores foram submetidos a ensaios elétricos. Na Figura 22 encontra-se ilustrada a aplicação da camada de poluição nos isoladores investigados.

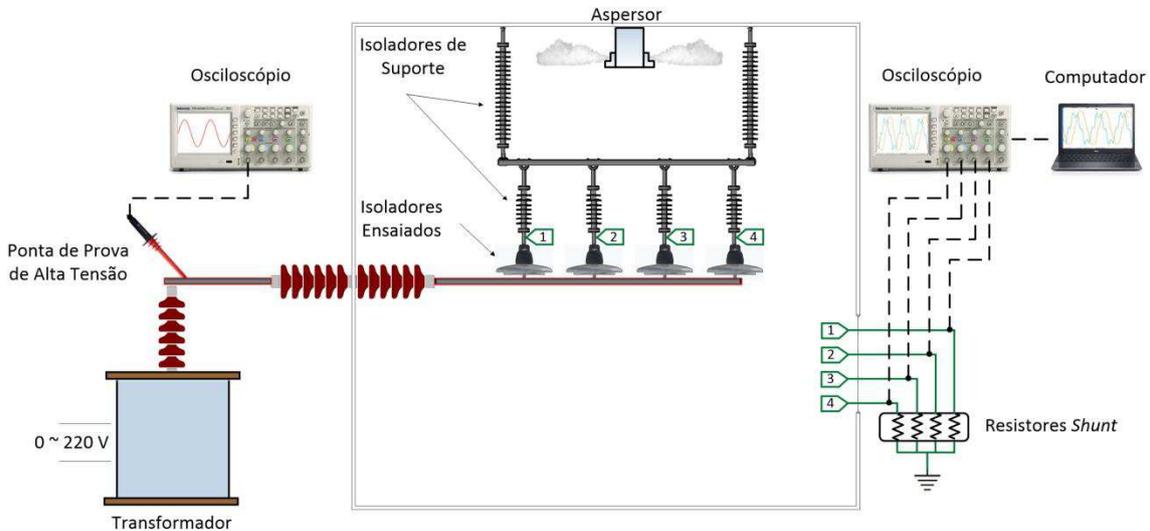
Figura 22 – Aplicação da camada de poluição nos isoladores (a) pré-condicionamento (b) camada de poluição (c) repouso.



Fonte: Próprio autor.

Para a realização do monitoramento da corrente de fuga, os isoladores foram inseridos em uma câmara de névoa com dimensões 6,5 m x 2,0 m x 4,0 m e instalados em isoladores de suporte, permitindo o ensaio simultâneo de até quatro isoladores, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Arranjo experimental para monitoramento da corrente de fuga.



Fonte: Próprio autor.

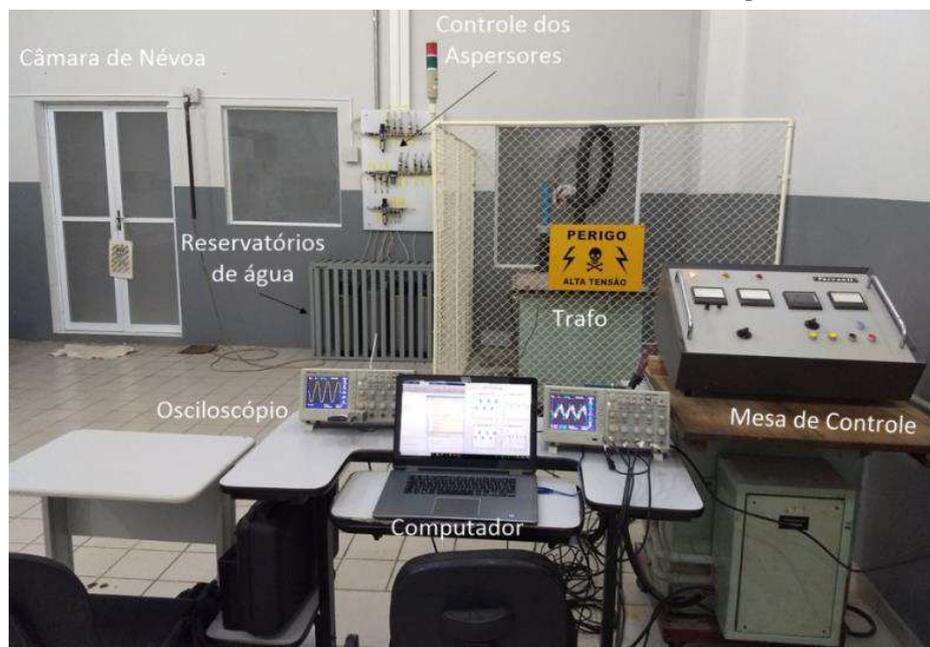
O circuito da Figura 23 é composto por um transformador elevador de tensão (220 V/120 kV), uma ponta de prova de alta tensão Tektronix P6015A, o objeto de teste (isolador ensaiado) em série com o resistor *shunt* ( $R_{shunt}$ ), dois osciloscópios digitais e um computador. A ponta de prova foi utilizada para medição da tensão aplicada. Os isoladores suportes proporcionam sustentação mecânica e atuam como alta impedância, fazendo com que a corrente de fuga seja direcionada para os resistores *shunt*. O sinal da corrente de fuga foi adquirido indiretamente a partir da queda de tensão sobre o resistor *shunt*. Os sinais de tensão e corrente foram digitalizados por meio de um osciloscópio digital e armazenados em um computador.

No interior da câmara foi gerada uma névoa por meio de aspersores localizados na parte superior e dispostos de modo a evitar a incidência direta da névoa sobre os isoladores. A névoa foi aplicada com baixa intensidade com a finalidade de tornar a camada de poluição condutiva. Para a formação da névoa, a pressão do ar e nos reservatórios de água foram de 4 bar. A condutividade da água utilizada para gerar a névoa foi 0,0325 S/m.

A névoa foi aplicada previamente por um período de quinze minutos antes da energização para proporcionar o umedecimento da superfície dos isoladores. Em

seguida, os isoladores foram submetidos a uma tensão alternada na frequência industrial com  $16 \text{ kV}_{\text{pico}}$ , que foi aplicada ininterruptamente por um período de 60 minutos sob névoa. O valor da tensão aplicada foi baseado em valores de referência para isoladores de suspensão submetidos a ensaios de poluição artificial especificados na IEC 60507 (1991). Na Figura 24 é possível visualizar a fotografia do arranjo utilizado em laboratório.

Figura 24 – Fotografias (a) Arranjo experimental utilizado para monitoramento da corrente de fuga (b) Vista interna da câmara de névoa (c) Câmara com névoa aplicada.



(a)



(b)



(c)

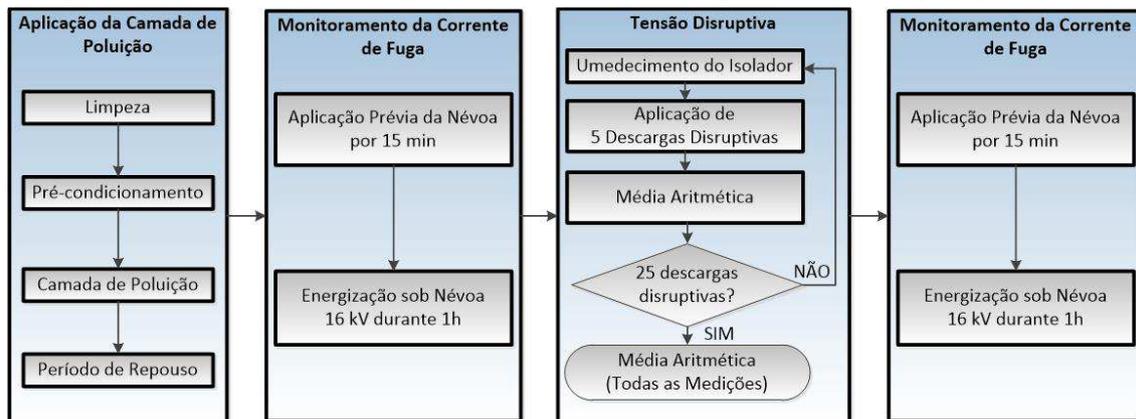
Fonte: Próprio autor.

No ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial os isoladores foram suspensos em uma estrutura similar a uma mísula de uma torre de transmissão e submetidos a um total de 25 descargas disruptivas (*flashover*). O ensaio foi realizado em cinco etapas iguais para cada isolador. Cada etapa consiste no umedecimento da superfície do isolador e aplicação de cinco descargas disruptivas, com intervalos de 1-2 minutos entre aplicação. O umedecimento foi realizado por meio do borrifamento de água destilada e de modo que a umidade não escorresse pela superfície do isolador. O intervalo de tempo entre as etapas foi de 1-3 minutos. A ruptura ocorreu pela elevação da tensão a uma taxa constante de 2 kV/s.

Para cada conjunto (C1, C2, C3, C4 e C5) contendo cinco medições de descargas disruptivas a média aritmética foi considerada. O valor de tensão disruptiva foi obtido a partir da média aritmética das medições. Além disso, o intervalo de confiança ao nível de 95% foi determinado para todo o conjunto de medição visando à realização das análises e confiabilidade da estimativa.

Na Figura 25 encontra-se ilustrada, de forma sucinta, a metodologia adotada para a realização dos ensaios para condições de poluição artificial.

Figura 25 – Metodologia adotada para a realização dos ensaios para condições de poluição artificial.



Fonte: Próprio autor.

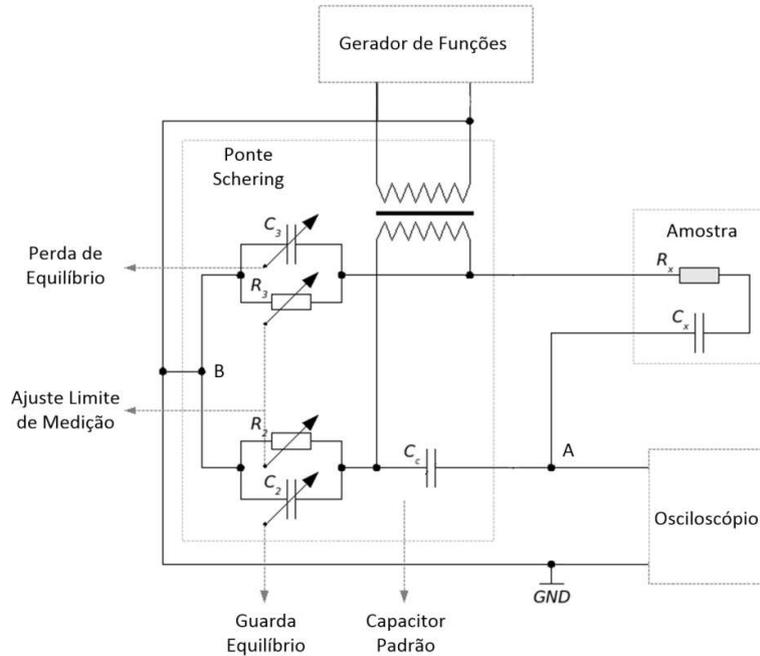
#### 4.2.2.3 CONSTANTE DIELETRICA E TANGENTE DE PERDAS

Para determinar a constante dielétrica e a tangente de perdas foram utilizadas cinco amostras de cada composição indicada na Tabela 7. As amostras possuíam formato de disco, com 83 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.

As medições da constante dielétrica e a tangente de perdas foram realizadas por meio de uma ponte Schering modelo TR-9701 TELMES. O estudo foi realizado para

quatro frequências diferentes: 0,1 kHz, 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. O esquema da ponte Schering utilizada pode ser visualizada na Figura 26.

Figura 26 - Esquema da ponte Schering TR-9701 TELMES



Fonte: Adaptado de Bánhidi (2007)

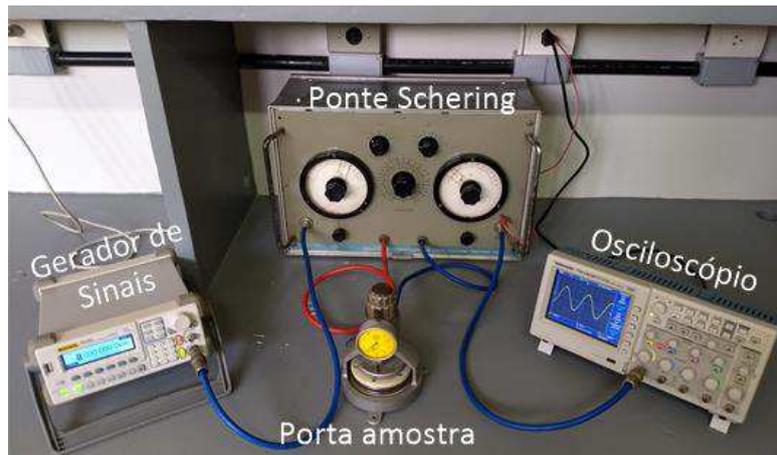
As amostras foram inseridas em um porta amostra formado por duas placas paralelas. O sinal de excitação aplicado à ponte foi uma senóide com amplitude de  $10 V_{pp}$ , originado mediante o gerador de funções modelo DG 1022 RIGOL. Um canal do osciloscópio foi conectado ao ponto A com o objetivo de detectar o momento em que a ponte se encontra em equilíbrio, isto é, o instante em que os pontos A e B possuem o mesmo potencial. O balanceamento da ponte foi realizado por meio de variações de resistores ( $R_2$  e  $R_3$ ) e capacitores ( $C_2$  e  $C_3$ ). Os valores de  $C_x$  e  $\tan \delta$  são dados pelas Equações (11) e (12), respectivamente.

$$C_x = \frac{R_2}{R_3} C_c \quad (11)$$

$$\tan \delta = \omega \cdot C_2 \cdot R_2 \quad (12)$$

A temperatura do ambiente e a umidade relativa do ar no momento da medição foram, respectivamente,  $23^\circ\text{C}$  e 60%. Na Figura 27 é possível visualizar uma fotografia da ponte Schering utilizada na determinação da constante dielétrica e tangente de perdas.

Figura 27 - Ponte Schering utilizada para as medições da constante dielétrica e tangente de perdas



Fonte: Próprio autor

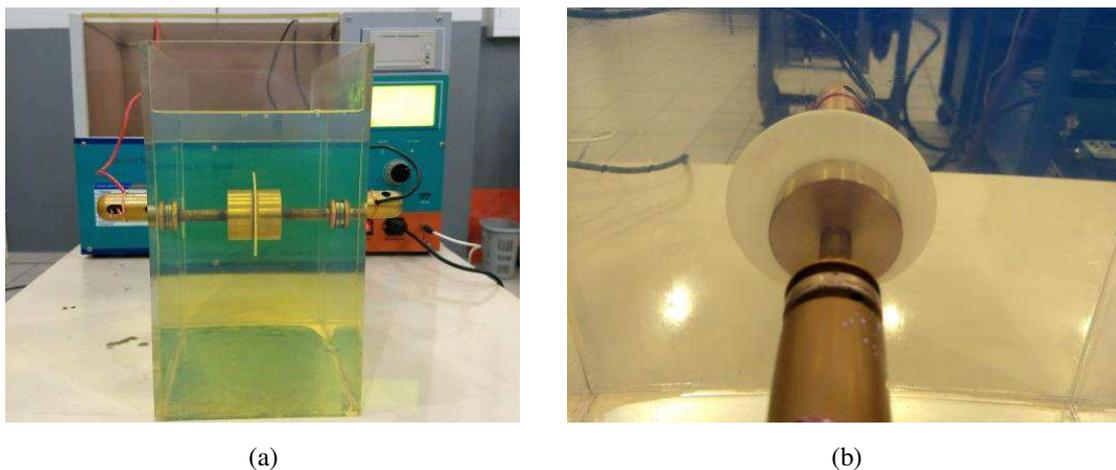
#### 4.2.2.4 RIGIDEZ DIELÉTRICA

A avaliação da rigidez dielétrica foi realizada para cinco amostras de cada composição indicada na Tabela 7 e baseada em recomendações descritas na norma ASTM D149. As amostras possuíam formato de disco, com 83 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.

As amostras foram colocadas entre dois eletrodos localizados no interior de um reservatório preenchido com óleo isolante. Os eletrodos possuíam formatos cilíndricos com 51 mm de diâmetro e 25 mm de espessura. Para a realização do ensaio foi empregado o método de curta duração para aplicação da tensão, especificado na norma ASTM D149. A tensão foi aplicada uniformemente nos eletrodos a uma taxa constante de 2 kV/s por meio de um equipamento para teste de rigidez dielétrica, modelo GDYJ-502 e com tensão de saída de 0-100 kV. Na Figura 28 é possível visualizar uma fotografia do arranjo utilizado para determinar a rigidez dielétrica dos compósitos investigados.

A partir dos valores medidos da rigidez dielétrica para cada conjunto de amostras, calculou-se a média e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95% para a realização das análises e confiabilidade da estimativa.

Figura 28 – Fotografia do ensaio de rigidez dielétrica (a) arranjo utilizado (b) amostra entre eletrodos.



Fonte: Próprio autor

#### 4.2.2.5 TRILHAMENTO ELÉTRICO E EROSÃO

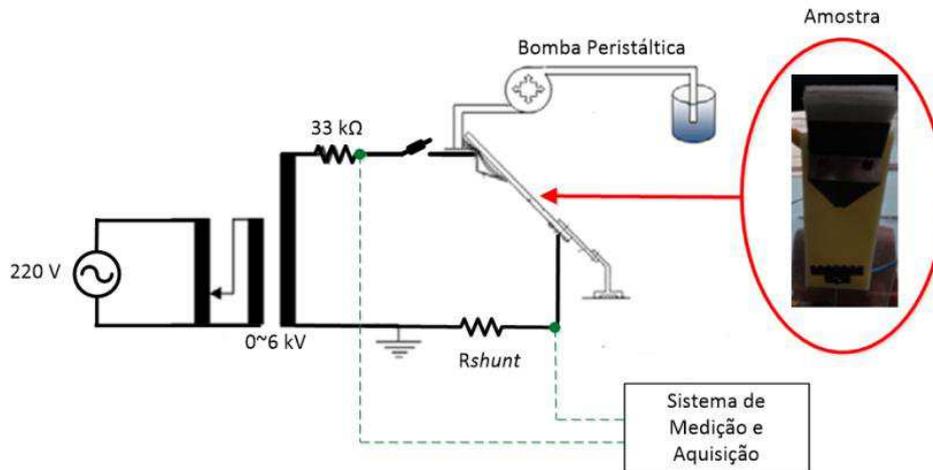
O ensaio para avaliação da resistência ao trilhamento elétrico e erosão foi realizado para cinco amostras de cada composição polimérica indicada na Tabela 7 e baseado em recomendações descritas na norma IEC 60587.

Inicialmente, a superfície das amostras foi tratada para retirada de oleosidade, brilho e resíduos que possam interferir no ensaio. A superfície foi polida com uma lixa de óxido de alumínio com granulação 400 e água destilada. Após o processo de lixamento, as amostras foram secas com papel toalha e aplicado álcool isopropílico na superfície para retirada de eventuais resíduos do processo de lixamento. As amostras foram secas à temperatura ambiente ( $\approx 25^{\circ}\text{C}$ ) por um período mínimo de 24 h.

Finalizado o tratamento, as amostras foram posicionadas em um suporte de acrílico inclinado de  $45^{\circ}$  da horizontal e fixadas por meio de eletrodos com design especificado por norma. As amostras foram submetidas a uma tensão alternada de  $3\text{ kV}_{\text{rms}}$  por meio de um transformador 120 V/6,6 kV. Uma solução condutiva foi gotejada sobre filtros de papel localizados entre o eletrodo superior e a amostra por meio de uma bomba peristáltica e com uma taxa de 0,3 ml/min. A solução condutiva possui resistividade de  $3,95\ \Omega\text{m}$  e foi preparada pela mistura de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , agente molhante Triton X-100 e água destilada nas proporções recomendadas pela norma IEC 60587. Um resistor de  $33\ \text{k}\Omega$  foi utilizado para limitar a corrente na superfície do material na ocorrência de uma ruptura elétrica.

A medição da tensão foi realizada por meio de um osciloscópio e com o auxílio da ponta de prova de alta tensão Tektronix P6015A. Os valores *rms* da corrente de fuga foram monitorados por meio de um sistema de medição embarcado conectado ao circuito. A corrente foi determinada a partir da queda de tensão sobre um resistor *shunt* ( $R_{shunt}$ ), localizado em série com a amostra. Na Figura 29 encontra-se ilustrado o esquema do arranjo experimental utilizado no ensaio.

Figura 29 – Diagrama esquemático para o ensaio de trilhamento elétrico e erosão.

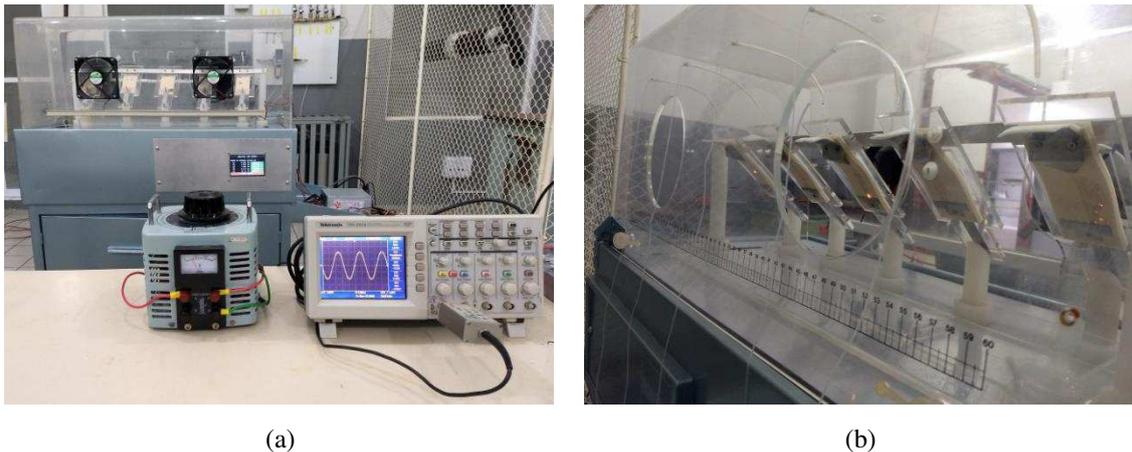


Fonte: Adaptado de Syakur *et al.* (2012).

As amostras foram avaliadas por meio de parâmetros elétricos e físicos. Os parâmetros elétricos estão associados ao monitoramento da corrente de fuga. Os parâmetros físicos consistem no comprimento do trilhamento elétrico e quantidade de massa erodida. O comprimento do trilhamento elétrico foi medido por meio do *software Image J* a partir de fotografias das amostras. A quantidade de massa erodida foi determinada a partir da pesagem das amostras, antes e ao término do ensaio. A partir dos valores medidos de comprimento do trilhamento e massa erodida, calculou-se a média e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95% para a realização das análises e confiabilidade da estimativa.

Para a realização dos ensaios de trilhamento elétrico e erosão foi desenvolvido um equipamento baseado no circuito mostrado na Figura 29 e que atende as especificações da norma IEC 60587. Os aspectos construtivos e princípio de funcionamento do equipamento são descritos posteriormente na seção 4.3.1. Na Figura 30 é possível visualizar fotografias do ensaio de trilhamento elétrico e erosão utilizando o equipamento desenvolvido.

Figura 30 – Ensaio de trilhamento elétrico e erosão (a) equipamento desenvolvido (b) amostras sob ensaio.



Fonte: Próprio autor

#### 4.2.2.6 ENVELHECIMENTO POR RADIAÇÃO UV

Para avaliação do envelhecimento provocado pela exposição à radiação UV foram utilizadas 8 amostras para cada composição indicadas na Tabela 7. As amostras foram constituídas por lâminas de vidro retangulares com dimensões de 25 mm x 70 mm e revestidas com as composições. As amostras foram submetidas ao envelhecimento artificial por exposição à radiação UV durante um período de aproximadamente 1.200 horas, que equivale a um período de aproximadamente 18 meses de exposição natural, conforme Figura 15.

O ensaio foi realizado considerando apenas a exposição à radiação UV por meio de quatro lâmpadas fluorescentes Philips de 40 W, com emissão de ultravioleta entre 280 nm e 315 nm (UVB). As amostras foram posicionadas a uma distância de 5 cm da fonte de radiação. A intensidade da radiação ultravioleta que atingiu a superfície das amostras foi de  $9 \text{ Wm}^{-2}$  e medida semanalmente com um medidor de UV modelo YK-34UV. A temperatura no interior da câmara foi aproximadamente  $41^\circ\text{C}$  e a temperatura externa foi mantida constante em  $25^\circ\text{C}$ .

Para a realização dos ensaios de envelhecimento acelerado foi desenvolvido uma câmara de intemperismo baseada nas especificações descritas pela ASTM G53. Os aspectos construtivos e princípio de funcionamento do equipamento são descritos posteriormente na seção 4.3.2. Na Figura 31 é possível visualizar a exposição das amostras investigadas à radiação UV por meio da câmara de intemperismo desenvolvida.

Figura 31 – Amostras expostas a radiação UV na câmara de intemperismo desenvolvida.



Fonte: Próprio autor.

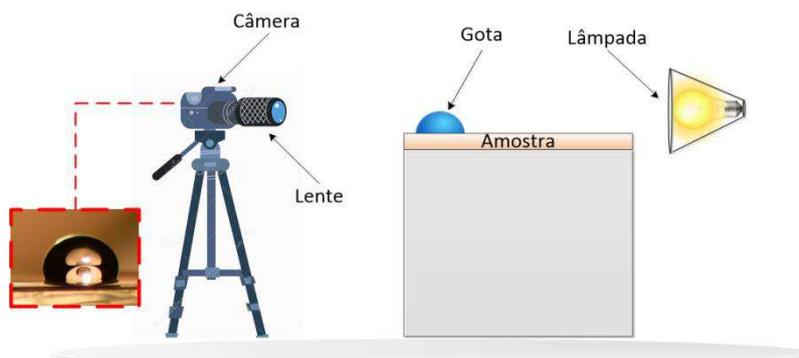
#### 4.2.2.7 HIDROFOBICIDADE

O método do ângulo de contato foi empregado para avaliar o grau de molhabilidade de um líquido em superfícies sólidas e, conseqüentemente, sua hidrofobicidade.

A medição do ângulo de contato foi baseada nas recomendações da IEC 62073 (2003). Cinco gotas foram aplicadas em áreas adjacentes da amostra. As gotas foram produzidas por meio de pipeta e água destilada. O volume das gotas foi de aproximadamente 15  $\mu$ L.

Para obtenção das imagens de ângulo de contato estático entre as gotas de água e a superfície foi utilizado o arranjo proposto por Nóbrega (2016). O arranjo é composto basicamente por um sistema óptico, a amostra e um sistema de iluminação. O arranjo pode ser visualizado na Figura 32.

Figura 32- Arranjo utilizado para medição dos ângulos de contato.



Fonte: Nóbrega (2016).

Para realizar a medição do ângulo de contato foi utilizado o *software Image J* empregando-se o método da inclinação da tangente para todas as medições. As medições dos ângulos de contato foram realizadas dos lados direito e esquerdo das gotas, obtendo-se a média desses ângulos como ângulo de contato estático.

A hidrofobicidade foi avaliada em diferentes instantes de tempo, conforme descrito abaixo:

- Antes de iniciar o envelhecimento por radiação UV, para conhecer o valor inicial da hidrofobicidade dos revestimentos preparados;
- Durante a realização do envelhecimento por radiação UV, em intervalos de 7 dias até o término do ensaio, para monitorar alterações na hidrofobicidade.

#### 4.2.2.8 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO – FTIR

As análises de FTIR foram realizadas em amostras da cera de carnaúba e em frações de revestimentos antes e após exposição à radiação UV. O ensaio foi realizado a partir de um espectrômetro VERTEX 70, fabricado pela *Bruker*, com varredura de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $400\text{ cm}^{-1}$ . A técnica da Refletância Total Atenuada (ATR) foi utilizada para atenuar a radiação penetrante (evanescente) que não é excluída no processo de reflexão devido à espessura das amostras. Para tanto, as amostras foram posicionadas em um cristal opticamente denso com alto índice de refração e pressionadas para proporcionar melhor contato. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos (LabSMaC).

### 4.3 CONCEPÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS

#### 4.3.1 EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO DO TRILHAMENTO ELÉTRICO E EROÇÃO

A realização de testes preliminares e padronizados para avaliação da resistência dos materiais isolantes aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão permite verificar

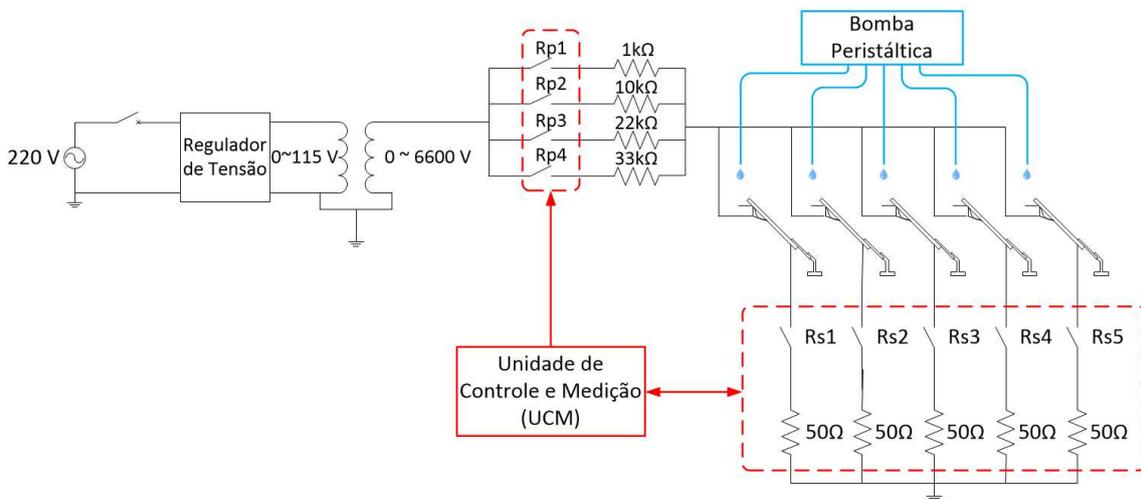
características de projeto, de fabricação e conformidade com padrões aceitos por normas específicas de empresas do setor elétrico, podendo detectar revestimentos com propriedades inadequadas ou susceptíveis a falhas.

Nesta seção são descritos os aspectos construtivos de um equipamento para avaliação de trilhamento elétrico e erosão de materiais isolantes baseado em especificações da IEC 60587.

#### 4.3.1.1 ESQUEMA DO EQUIPAMENTO

O equipamento projetado é baseado no circuito elétrico ilustrado na norma IEC 60587 e permite o ensaio de até cinco amostras simultaneamente. O diagrama esquemático do circuito utilizado no equipamento pode ser visualizado na Figura 33.

Figura 33 – Diagrama esquemático do equipamento de trilhamento elétrico e erosão



Fonte: Próprio autor

O circuito ilustrado na Figura 33 é composto por um regulador de tensão, um transformador elevador de tensão (0 – 6.600 V), resistores de proteção (1 kΩ, 10 kΩ, 22 kΩ e 33 kΩ), amostras, bomba peristáltica, relés de média tensão Rp e Rs, resistores *shunt* (50 Ω) e uma unidade de controle e medição. A seleção dos resistores de proteção está condicionada ao nível de tensão aplicada no ensaio e é realizado por meio do acionamento dos relés de média tensão Rp. As amostras são posicionadas com a superfície de ensaio voltada para baixo e inclinadas de  $45^\circ \pm 2^\circ$  da horizontal. A medição da corrente de fuga é realizada indiretamente a partir da queda de tensão nos resistores *shunt*. Os sinais de tensão sobre os resistores *shunt* são enviados para a

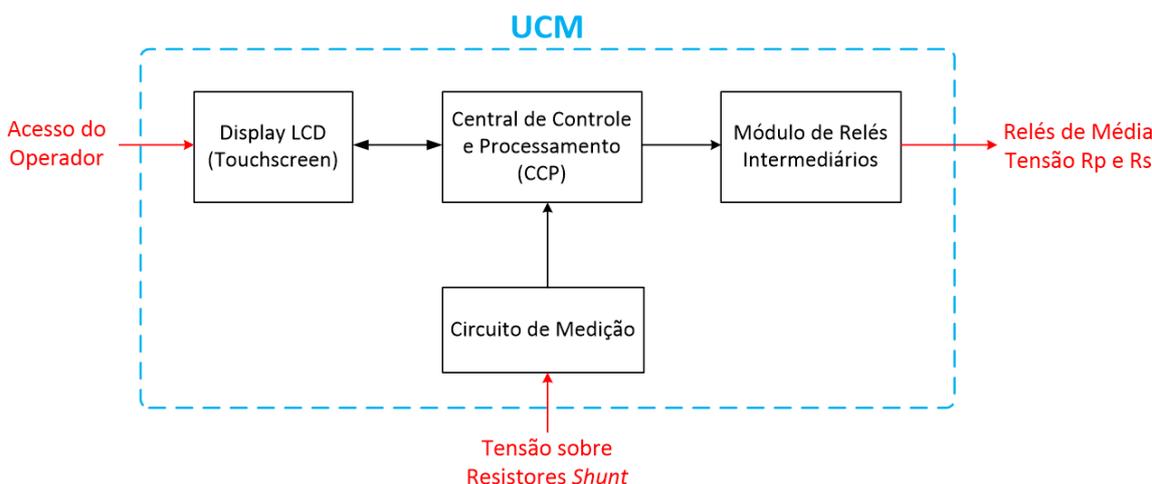
unidade de controle e medição (UCM), que realiza o tratamento do sinal, aquisição dos valores *rms* e efetua a interrupção das amostras na ocorrência de eventuais falhas por meio da abertura dos relés de média tensão  $R_s$ .

De acordo com a norma IEC 60587, a falha de uma amostra resulta na interrupção do ensaio e reprovação do lote ensaiado. No entanto, visando à realização de pesquisas e estudos mais aprofundados, o sistema desenvolvido neste trabalho proporciona a interrupção individual das amostras que atingem a falha, sem comprometer a continuidade do ensaio para as demais amostras.

#### 4.3.1.2 UNIDADE DE CONTROLE E MEDIÇÃO

A unidade de controle e medição (UCM) é responsável pela seleção dos resistores de proteção, interrupção das amostras na ocorrência de falha, monitoramento e processamento dos sinais de corrente de fuga e aquisição das medições. Na Figura 34 é apresentado o esquema da UCM.

Figura 34 – Esquema da Unidade de Controle e Medição



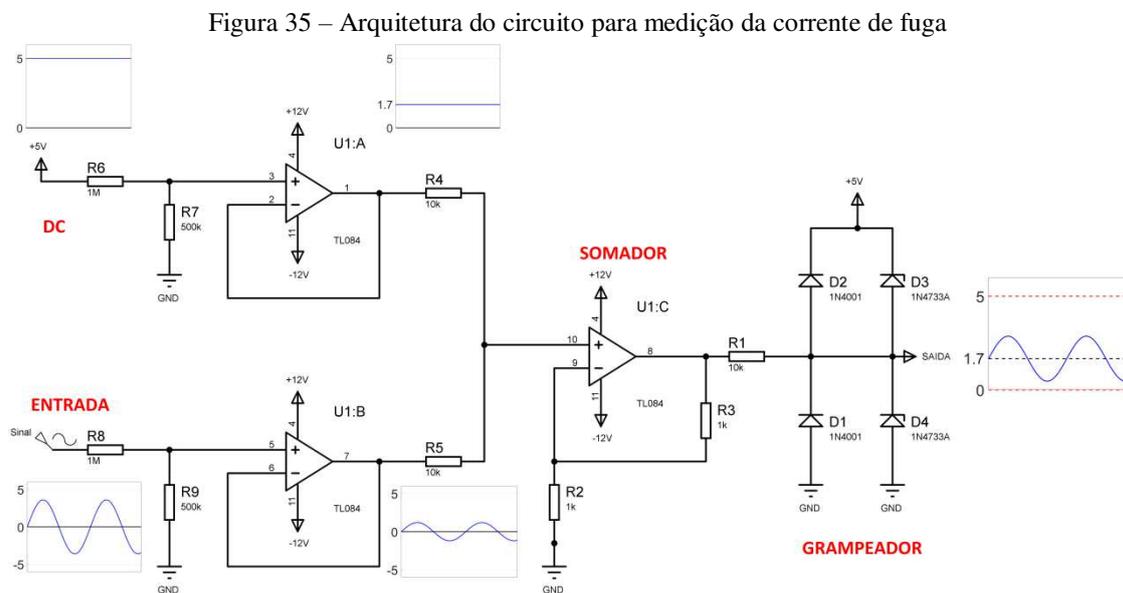
Fonte: Próprio autor

Basicamente, a UCM é composta por um LCD touchscreen, uma central de controle e processamento (CCP), módulo de relés intermediários e um circuito para medição da corrente de fuga. O LCD *touchscreen* permite a interface do equipamento com o usuário para ajustes dos parâmetros e monitoramento dos valores de corrente de fuga em cada amostra sob ensaio. O operador pode definir o método de ensaio, a tensão aplicada para permitir a seleção do resistor de proteção e as amostras que serão

utilizadas. A programação da interface gráfica é realizada na linguagem C. O módulo de relés de baixa tensão é comandado pela CCP e responsável pelo acionamento dos relés de média tensão Rp e Rs. O circuito de medição realiza o condicionamento dos sinais de tensão provenientes dos resistores *shunt* para que a CCP consiga fazer a aquisição de sinais analógicos na faixa de tensão suportável pelo microcontrolador.

#### 4.3.1.2.1 CIRCUITO DE MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA

O circuito de medição permite que o sinal de tensão medido no resistor *shunt* seja condicionado para um nível de tensão suportável pelas entradas analógicas do microcontrolador, isto é, entre 0 V e 5 V. A arquitetura do circuito pode ser visualizado na Figura 35.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 35, o sinal de entrada é atenuado em 1/3 por meio de um divisor de tensão resistivo e adicionado de um nível DC positivo com o objetivo de eliminar valores negativos. O deslocamento do sinal é realizado por meio de um amplificador operacional configurado como somador. O circuito foi projetado para permitir a medição de correntes inferiores a 100 mA. Para correntes superiores a 100 mA, ocorre o grampeamento da tensão no circuito de medição por meio de diodos instalados após o somador. O circuito grampeador permite limitar o nível de tensão da saída na ocorrência de sobretensões e proteger o microcontrolador.

#### 4.3.1.2.2 CENTRAL DE CONTROLE E PROCESSAMENTO

A Central de Controle e Processamento (CCP) é responsável pelo processamento dos sinais de tensão obtidos do circuito de medição e acionamento dos relés de média tensão (Rp e Rs) a partir de um módulo relé intermediário de baixa tensão. A CCP também realiza a verificação contínua do critério de parada para a corrente de fuga e comanda a interrupção da amostra na ocorrência de falha.

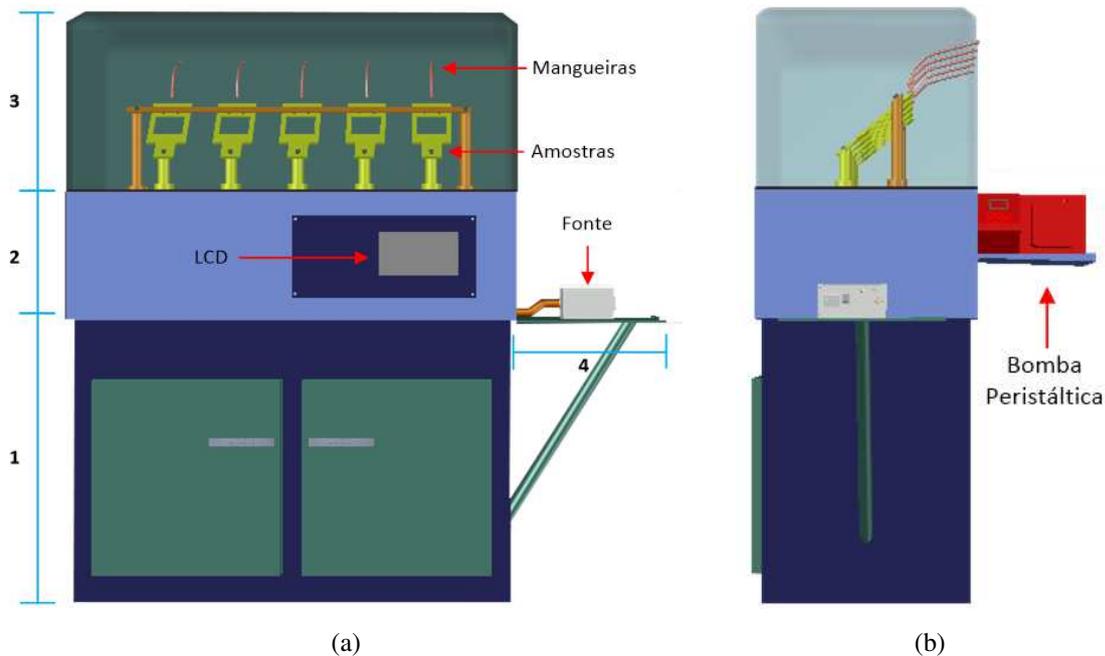
A central de controle e processamento é composta pela placa Arduino Mega 2560 e um dispositivo de armazenamento externo. A placa selecionada é baseada no microcontrolador ATmega2560 e possibilita flexibilidade e baixo custo para o desenvolvimento do sistema. O Arduino é composto por um conversor A/D de 10 bits que permite realizar o processamento dos sinais de corrente de fuga com precisão. Além disso, o microprocessador selecionado apresenta um número suficiente de entradas e saídas para conexão dos demais periféricos como LCD, relés intermediários e sinais de tensão obtidos do circuito de medição.

Para determinar os valores da corrente de fuga é realizado um processamento dos sinais de tensão condicionados, obtidos do circuito de medição. Na CCP, o sinal condicionado é digitalizado por meio do conversor A/D, subtraído do valor da tensão do nível DC e multiplicado por um fator 3 para compensar a atenuação do sinal no divisor resistivo do circuito de medição. Posteriormente, o valor eficaz da tensão é calculado e dividido pelo valor da resistência *shunt* ( $50\Omega$ ) para obtenção do valor eficaz da corrente de fuga. O tempo do processamento dos sinais de tensão e medição da corrente de fuga para as cinco amostras possui uma duração de aproximadamente 1 segundo. Os valores eficazes da corrente de fuga são salvos periodicamente em uma memória externa a cada seis segundos. Para cada medição é verificado o critério de parada da corrente, isto é, se corrente na amostra atinge  $60\text{ mA} \pm 10\%$  ou superior e persiste por 2 ou 3 segundos.

#### 4.3.1.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO EQUIPAMENTO

O circuito de alta tensão e a unidade de controle e medição foram acondicionados em uma estrutura de metal com cúpula transparente e de acrílico. A estrutura pode ser visualizada na Figura 36.

Figura 36 – Esquema do equipamento para a realização de ensaios de trilhamento elétrico e erosão  
(a) Vista frontal (b) Vista lateral.



Fonte: Próprio autor

A estrutura do equipamento desenvolvido é dividida basicamente em quatro partes, conforme indicado na Figura 36. No compartimento 1 ficam situados o transformador, os resistores de proteção e relés de média tensão  $R_p$ , responsáveis pela seleção dos resistores. A saída do transformador conecta-se a um barramento em que se encontram ligados quatro ramos formados por relés e resistores de proteção. Os relés e os resistores foram instalados em suportes de acrílico e fixados por meio de abraçadeiras. Um segundo barramento conecta os resistores a um cabo isolado responsável pela condução da tensão para o barramento localizado no compartimento 3.

O compartimento 3 é formado por uma cúpula transparente e reservado para a instalação das amostras. A cúpula permite a visualização do ensaio por diferentes ângulos e evita o contato acidental do operador com o circuito energizado. No interior do compartimento encontram-se instaladas mangueiras, exaustores, barramento de alumínio e espaço das amostras. As mangueiras são posicionadas em tubos rígidos fixados nas paredes da cúpula com curvatura e altura adequadas para aplicação da solução condutiva. Os exaustores são instalados nas paredes da cúpula e são responsáveis pela retirada de gases resultantes dos processos de degradação provocados por arcos elétricos. O barramento de alumínio encontra-se suspenso por meio de suportes de nylon e é responsável pela fixação e energização das amostras. O barramento é conectado ao cabo isolado por meio de um condutor rígido que atravessa

longitudinalmente um dos suportes de nylon. O ponto de conexão entre o condutor e o cabo isolado é realizado na parte superior do compartimento 2.

As amostras são posicionadas em suportes de acrílico e fixadas por meio de eletrodos com design especificados por norma. Os suportes de acrílico são vazados no meio da base para minimizar a área de contato com a amostra a ser ensaiada. As amostras são conectadas na parte superior ao barramento de alta tensão do compartimento 3 e na parte inferior à condutores instalados no interior de peças de nylon. A inclinação de 45° das amostras é obtida por meio de cortes realizados nas peças de nylon que se conectam nos extremos dos suportes de acrílico.

No compartimento 2 encontra-se localizados os relés Rs para interrupção das amostras, resistores *shunt* e a unidade de controle e medição. Os relés e resistores são instalados na parte superior do compartimento 2 em placas de nylon e fixados por meio de abraçadeiras. Os relés estão conectados aos resistores *shunt* e aos eletrodos inferiores das amostras. A conexão entre os eletrodos inferiores e o relé é realizada por meio de condutores que atravessam longitudinalmente peças de nylon. Os resistores *shunt* são conectados ao barramento de terra que se encontra interligado a toda estrutura metálica do equipamento. Para medição da corrente de fuga são conectados fios ao nó formado pelo relé e resistor *shunt* e conduzidos à unidade de controle e medição.

Para a unidade de controle e medição, o módulo de relés intermediários e o circuito de medição encontram-se acondicionados em uma caixa metálica aterrada e instaladas no interior do compartimento 2. A caixa possui conectores que permitem a conexão dos fios provenientes dos resistores *shunt*, fonte de alimentação e a comunicação com a CCP e bobinas dos relés de alta tensão. A CCP encontra-se conectada ao display LCD instalado no painel frontal do compartimento 2.

No compartimento 4 encontra-se instalado o variac, a fonte de alimentação da UCM e dispositivos de medição e proteção, como voltímetro e disjuntor. Na parte posterior do equipamento encontra-se instalado a bomba peristáltica, conforme visualizado na Figura 36 (b).

## 4.3.2 CÂMARA DE ENVELHECIMENTO ACELERADO POR EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO UV

A realização de testes de envelhecimento por exposição à radiação UV permite avaliar a vida útil e o comportamento dos materiais poliméricos utilizados em ambientes externos. Para tanto, câmaras de envelhecimento acelerado são utilizadas para simular de maneira controlada e padronizada situações que provocam a degradação dos polímeros, como radiação UV, temperatura e umidade. As câmaras proporcionam reprodutibilidade dos ensaios e o envelhecimento em períodos de tempo relativamente curtos.

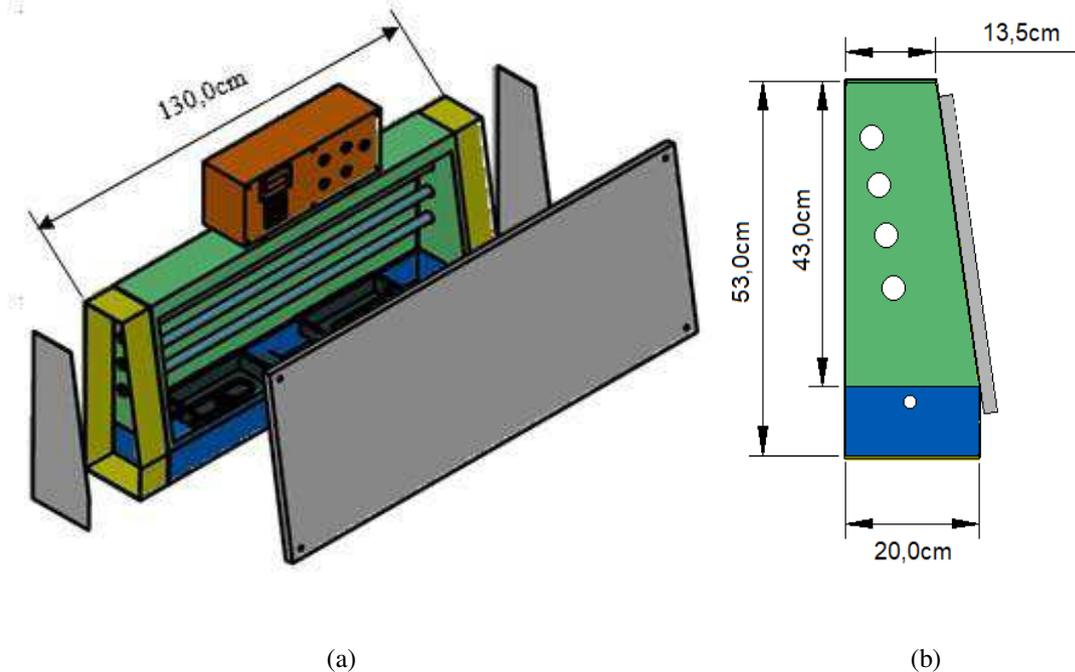
Nesta seção são descritos os aspectos construtivos de uma câmara de envelhecimento acelerado para exposição de materiais à radiação UV baseado em especificações da norma ASTM G53.

### 4.3.2.1 ESTRUTURA DO EQUIPAMENTO

O esquema da estrutura da câmara de envelhecimento pode ser visualizado na Figura 37. A estrutura foi construída com chapas de alumínio, que são resistentes à corrosão.

Basicamente, o equipamento projetado é formado por quatro lâmpadas UV tubulares, um sistema de condensação e um sistema de controle. As lâmpadas e as amostras são dispostas no compartimento de cor verde da Figura 37. As lâmpadas são espaçadas entre si de 70 mm e o plano que as contém encontra-se inclinado em relação ao plano vertical e a uma distância de 5 cm das amostras. Um termopar foi instalado na parte superior do compartimento para monitoramento da temperatura. Uma tampa de acesso foi instalada na parte frontal do equipamento com o objetivo de manter a câmara hermeticamente fechada e impedir riscos de exposição do operador a radiação UV.

Figura 37 – Esquema da câmara de envelhecimento acelerado com vistas em (a) perspectiva (b) lateral



Fonte: Próprio autor

Os reservatórios de água utilizados para realizar o aquecimento da água e condensação no interior do equipamento foram instalados na parte inferior da estrutura (região azul da Figura 37). As partes laterais da câmara, indicadas pela cor amarela da Figura 37, são compostas por cavidades com tampa e destinadas a instalação e isolamento dos contatos elétricos das lâmpadas de ultravioleta e das resistências de imersão dispostas nos reservatórios.

O sistema de controle responsável pela programação e monitoramento do ensaio encontra-se instalado na parte superior do equipamento, indicado pela cor marrom da Figura 37.

#### 4.3.2.2 SISTEMA DE CONDENSAÇÃO

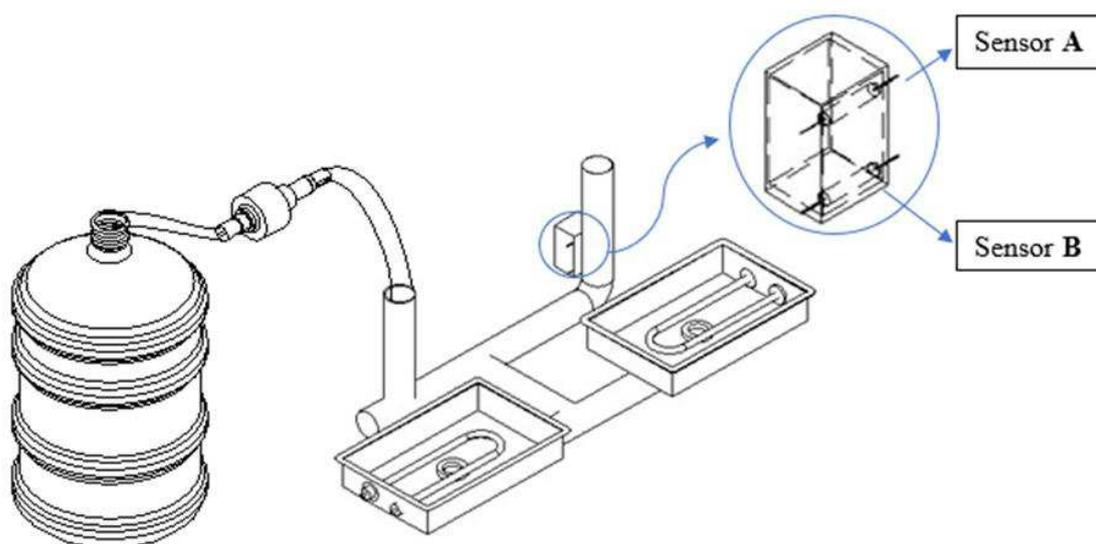
O sistema de condensação desenvolvido consiste, basicamente, em dois reservatórios de metal com resistências de imersão tipo U instaladas, bomba d'água e sensores magnéticos para controle do nível de água.

Os reservatórios de água são instalados na parte inferior da estrutura (região azul da Figura 37) e interconectados por uma tubulação metálica. Além disso, os reservatórios encontram-se conectados a uma tubulação de água em forma de U localizada na parte posterior do equipamento e destinada para o monitoramento e

regulação do nível de água. O esquema do sistema de condensação pode ser visualizado na Figura 38.

O monitoramento do nível de água é realizado por meio de chaves magnéticas (*reed switches*) instaladas na parede de um dos terminais da tubulação em forma de U. O acionamento das chaves magnéticas é realizado por meio de um ímã inserido em uma bola de isopor revestida com silicone para suportar alta temperatura. A bola de isopor foi inserida no interior da tubulação em forma de U e sua altura varia conforme a altura da coluna de água nos reservatórios.

Figura 38 – Esquema do sistema de condensação

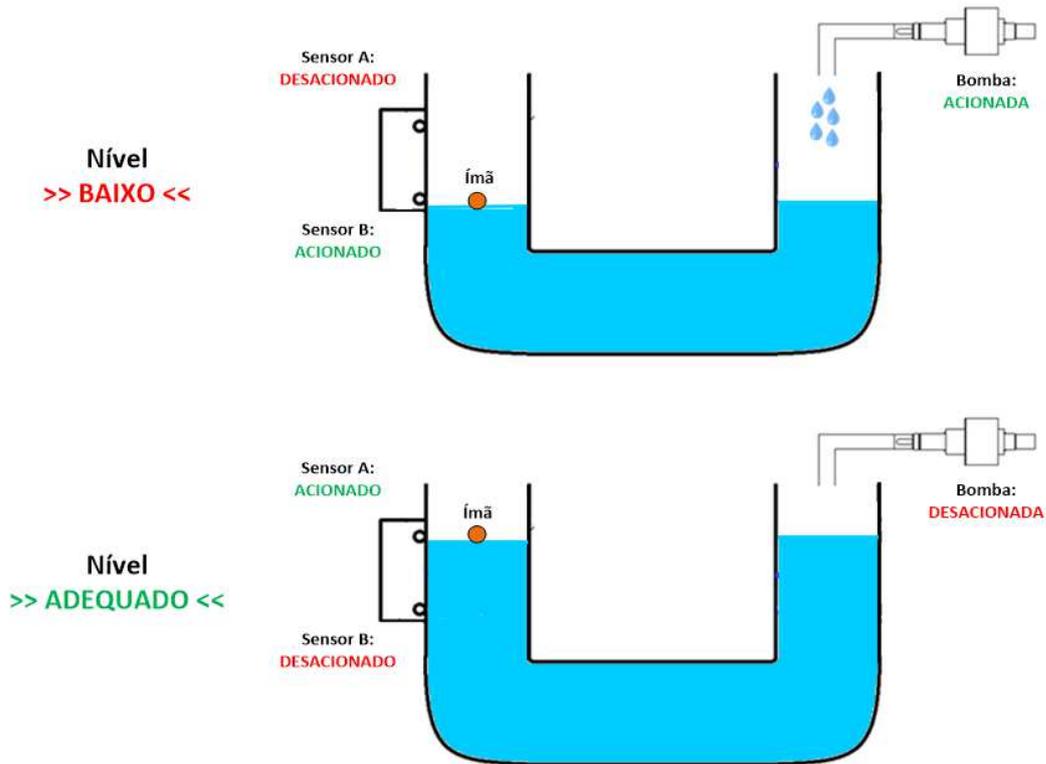


Fonte: Próprio autor

Uma bomba d'água (modelo ULKA EX5) foi instalada na parte posterior da estrutura e conectada ao outro terminal da tubulação em forma de U para permitir o fornecimento de água para os reservatórios. A água foi bombeada a partir de um reservatório externo de 20l. O procedimento para acionamento da bomba é baseado no funcionamento dos sensores A e B instalados na tubulação, conforme mostrado na Figura 39.

Quando o nível da coluna de água encontra-se em um nível crítico, ocorre o acionamento do sensor B e da bomba, conforme ilustrado na Figura 39 (a). Quando a coluna de água atinge o nível máximo é realizado o acionamento do sensor A e o desligamento da bomba, conforme ilustrado na Figura 39 (b). Os sensores estão conectados ao sistema de controle microcontrolado que realiza o acionamento de um relé responsável pela energização/desenergização da bomba.

Figura 39 – Princípio utilizado para controle do nível de água nos reservatórios (a) nível baixo (b) nível adequado.

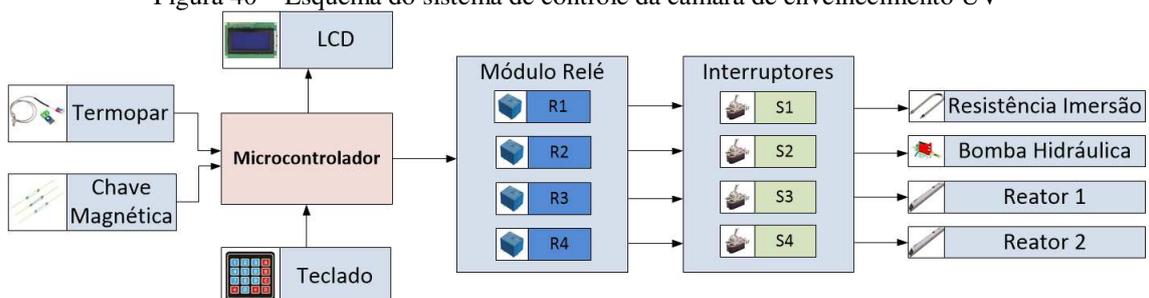


Fonte: Próprio autor

### 4.3.2.3 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle da câmara de envelhecimento é responsável pela ignição das lâmpadas, monitoramento da temperatura interna, acionamento das resistências de imersão, controle do nível de água do sistema de condensação e especificação dos ciclos de exposição ao longo do ensaio. O esquema do sistema de controle pode ser visualizado na Figura 40.

Figura 40 – Esquema do sistema de controle da câmara de envelhecimento UV



Fonte: Próprio autor

O sistema de controle é realizado por meio de um microcontrolador ATmega328P associado à dispositivos de entrada e saída. O microcontrolador empregado possibilita flexibilidade e baixo custo para o desenvolvimento do sistema. A configuração do ensaio é realizada pelo operador por meio de um teclado matricial e as informações da programação e monitoramento dos parâmetros do ensaio podem ser visualizadas por meio de um display LCD. Para a configuração do ensaio devem ser informados: a duração total do ensaio e dos ciclos de exposição à radiação UV e condensação. Além disso, deve ser informada a temperatura do ciclo de condensação.

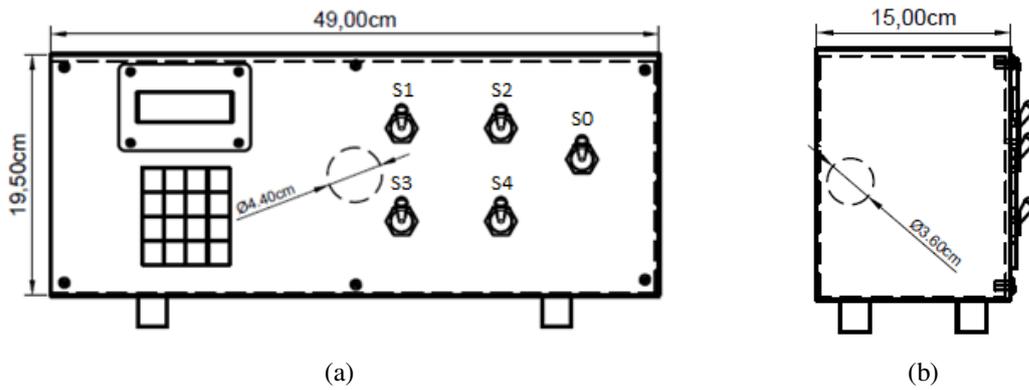
A temperatura no interior da câmara é monitorada por meio de um termopar conectado ao microcontrolador e indicada no LCD. Durante os ciclos de condensação, a temperatura medida pelo termopar é comparada com o valor pré-definido pelo operador. Para valores abaixo da temperatura informada pelo operador, as resistências de imersão são acionadas por meio do relé R1 para possibilitar o aquecimento da água dos reservatórios. Ao atingir a temperatura de referência, as resistências são desacionadas. O interruptor S1 permite realizar o desligamento manual da resistência caso seja observado algum problema ou por necessidade do operador.

As chaves magnéticas (*reed switch*) são utilizadas para o monitoramento do nível de água dos reservatórios. Para níveis abaixo de um ponto crítico ocorre o acionamento do relé R2 e a bomba é ligada. Caso contrário, a bomba é desligada.

Para o ciclo de exposição a radiação UV, os reatores são acionados por meio dos relés R3 e R4 para realizar a ignição das lâmpadas. Cada reator eletrônico realiza o acionamento de duas lâmpadas ultravioleta. As chaves S3 e S4 permitem selecionar manualmente a quantidade e/ou posição das lâmpadas que serão utilizadas no ensaio.

Os dispositivos mostrados na Figura 40, com exceção da resistência e bomba, foram acondicionados em um painel, conforme mostrado na Figura 41. Um disjuntor foi adicionado a parte interna do painel para permitir a proteção contra sobrecorrentes no equipamento. Além disso, uma chave geral S0 foi instalada para realizar o ligamento/desligamento do equipamento.

Figura 41 – Painel de controle da câmara de envelhecimento UV (a) vista frontal (b) vista lateral



Fonte: Próprio autor

Neste capítulo foram descritos os materiais e procedimentos utilizados na fabricação e caracterização dos compósitos de RTV-SIR utilizados nesta pesquisa. Além disso, foram realizadas explicações sobre o arranjo experimental, sistemas de medição adotados para os ensaios e descrição dos equipamentos desenvolvidos para viabilizar a realização da pesquisa.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios. Estudos comparativos entre os resultados obtidos também serão apresentados e discutidos.

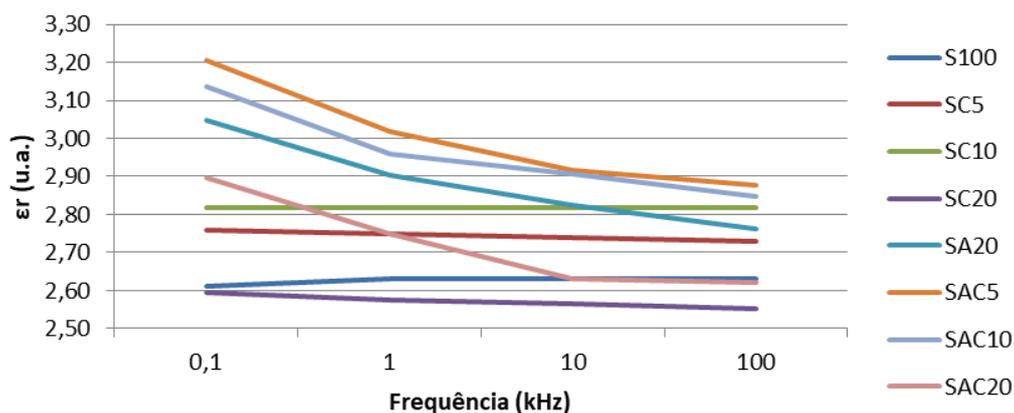
## 5 RESULTADOS

Neste capítulo são expostos os resultados obtidos durante a pesquisa, com a realização de análises microestruturais, físico-químicas e elétricas. Estudos comparativos dos resultados e análise do desempenho para diferentes condições de aplicação também são apresentados e discutidos.

### 5.1 CONSTANTE DIELÉTRICA E TANGENTE DE PERDAS

A partir da configuração descrita em 4.2.2.3, foram determinados os valores de capacitância que resultaram no equilíbrio da ponte Schering para frequências de 0,1 kHz, 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. A constante dielétrica para cada amostra foi determinada utilizando a Equação (4) (Seção 2.7). Na Figura 42 é possível visualizar os valores médios da constante dielétrica obtidos para os compostos investigados.

Figura 42 – Valores médios da constante dielétrica para diferentes frequências.



Fonte: Próprio autor

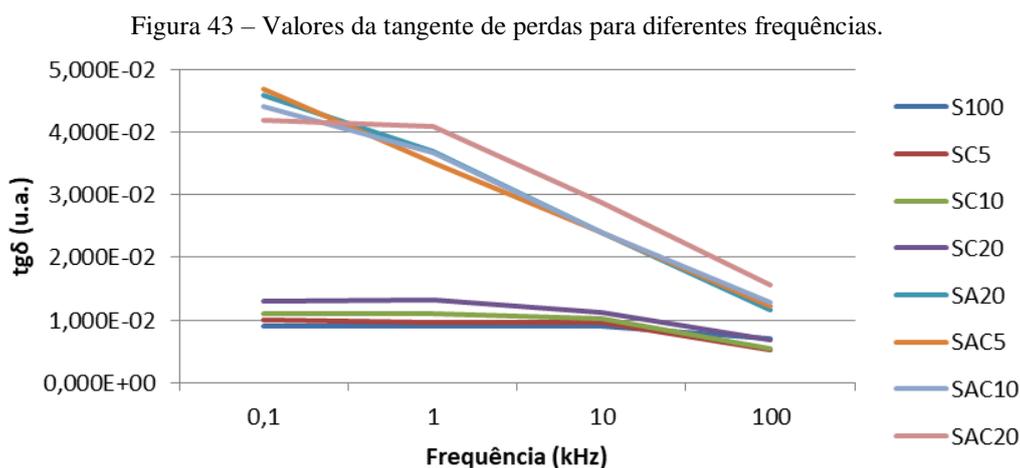
Analisando a Figura 42, verificou-se que a amostra S100 apresentou valores de constante dielétrica em torno de 2,62 e as moléculas tendem a acompanhar as variações do campo elétrico aplicado, indicando um comportamento apolar.

A adição da cera de carnaúba ao silicone em concentrações de 5% e 10% (amostras SC5 e SC10, respectivamente) provocou um leve aumento dos valores de constante dielétrica para valores em torno de 2,80 e constatou-se a predominância de um comportamento apolar. Contudo, a adição da cera de carnaúba em concentrações de

20% (amostra SC20) resultou na obtenção de valores de constante dielétrica ligeiramente inferiores a amostra S100. Além disso, verificou-se que as moléculas da amostra SC20 tendem a não acompanhar as variações do campo elétrico aplicado, apresentando uma redução dos valores de constante dielétrica com o aumento da frequência e indicando um comportamento polar.

A adição da ATH ao silicone na concentração de 20%, indicada pela amostra SA20, ocasionou o aumento do valor da constante dielétrica, atingindo valores superiores a 3,00. Contudo, a adição da ATH introduziu um comportamento polar às amostras, verificado pela tendência de redução da constante dielétrica com o aumento da frequência. A adição da ATH em concentrações de 20% e cera de carnaúba em concentrações de 5% e 10%, indicadas pelas amostras SAC5 e SAC10, provocou um leve aumento dos valores de constante dielétrica em relação a amostra SA20 e verifica-se um comportamento polar. A adição da ATH e da cera de carnaúba ao silicone em concentrações de 20% (amostra SAC20) resultou na obtenção de valores de constante dielétrica ligeiramente inferiores a amostra SA20 e um comportamento polar, com uma redução mais íngreme da constante dielétrica até a frequência de 10 kHz.

As tangentes de perdas para os compósitos foram medidas para as frequências citadas e podem ser visualizadas na Figura 43.



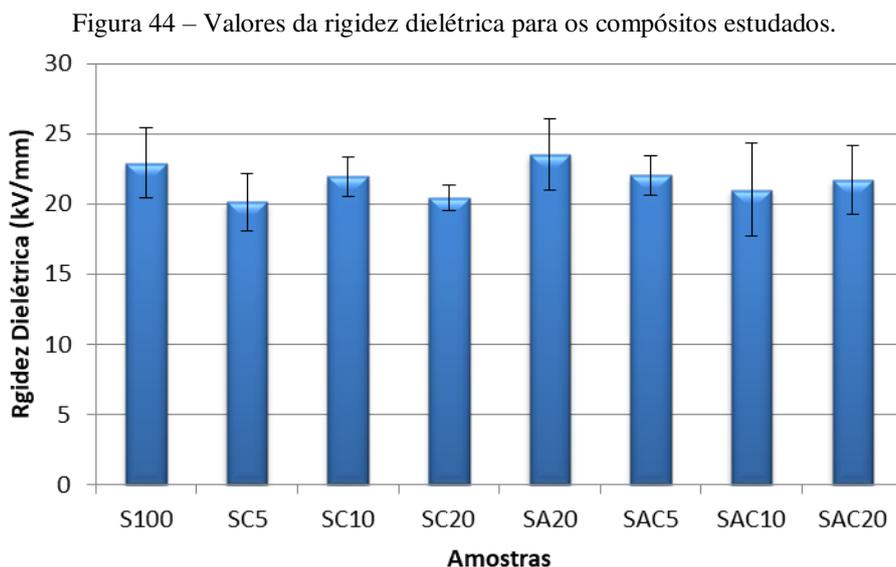
Fonte: Próprio autor

Analisando a Figura 43, evidenciou-se que a amostra de silicone puro (S100) apresentou os menores valores de tangente de perdas do conjunto de amostras analisadas. Além disso, constatou-se uma tendência de redução da tangente de perdas com o aumento da frequência, principalmente para frequências entre 10 kHz e 100 kHz. A adição da cera de carnaúba ao silicone provoca ligeiros aumentos da tangente de perdas e um comportamento similar a amostra S100.

A adição da ATH ao silicone (amostra SA20) ocasiona um leve aumento da tangente de perdas quando comparado a amostra S100. Contudo, verifica-se uma redução mais íngreme dos valores da tangente de perdas com o aumento da frequência. O aumento da frequência ocasiona um aumento da corrente reativa indicada na Equação (6) e, conseqüentemente, uma redução nos valores da tangente de perdas. A adição da ATH em concentrações de 20% e da cera de carnaúba em concentrações de 5%, 10% e 20% apresentaram valores e comportamentos da tangente de perdas similares a amostra SA20.

## 5.2 RIGIDEZ DIELÉTRICA

O ensaio de rigidez dielétrica foi realizado com o objetivo de avaliar a qualidade e a resistência das amostras à ruptura elétrica. Na Figura 44 é possível visualizar os valores da rigidez dielétrica obtidos para os compósitos investigados a partir da configuração descrita em 4.2.2.4.



A partir da Figura 44, verificou-se que os valores médios da rigidez dielétrica de todas as composições encontraram-se em torno de 21 kV/mm. Os resultados indicaram que os compósitos investigados atendem um dos critérios para aplicação no revestimento e na saia de isoladores integralmente poliméricos, com valores significativamente superiores a 10 kV/mm, conforme especificado na NBR 15122.

Quando se analisam as composições entre si na Figura 44, verifica-se que o compósito de silicone S100 apresentou um valor médio de 23 kV/mm, aproximadamente. A adição da cera de carnaúba ocasionou uma ligeira redução para valores médios em torno de 21 kV/mm. Contudo, as análises das barras de erro indicaram que não existem diferenças significativas entre as amostras para um intervalo de confiança de 95%. Os desvios nas medições podem estar associados a uma série de fatores intrínsecos e extrínsecos ao material como a resistividade volumétrica ou bolhas de ar presentes na amostra, por exemplo.

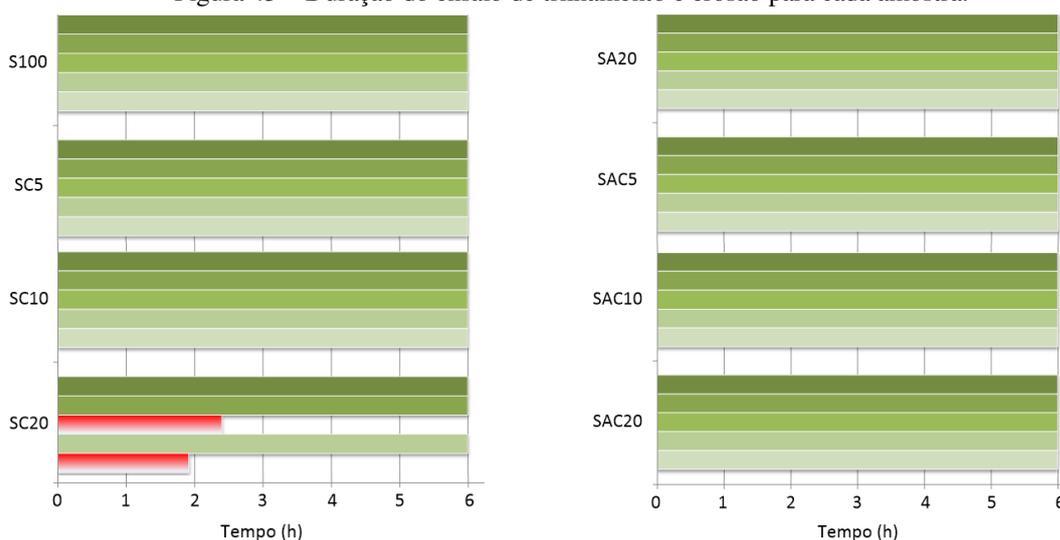
A adição da ATH ao silicone em concentrações de 20%, indicada pela amostra SA20, proporcionou valor médio de rigidez dielétrica em torno de 23 kV/mm e similar ao compósito S100. A adição da ATH em concentrações de 20% e cera de carnaúba em concentrações de 5%, 10% e 20% ao silicone resultou em valores médios de rigidez dielétrica em torno de 22 kV/mm. Contudo, as análises das barras de erro indicaram que não existem diferenças significativas entre as amostras para um intervalo de confiança de 95%.

### 5.3 TRILHAMENTO ELÉTRICO E EROSÃO

Amostras à base de RTV-SIR foram submetidas ao ensaio de trilhamento elétrico e erosão a partir dos procedimentos descritos na seção 4.2.2.5. O objetivo do ensaio consiste na avaliação da resistência à degradação e suportabilidade aos esforços elétricos quando uma tensão alternada é aplicada sobre um conjunto de amostras enquanto uma solução condutiva escoia pela superfície. Durante o ensaio, a falha das amostras pode ocorrer quando algum dos critérios de parada estabelecidos pela IEC 60587 (2007) é atingido, como: valores de corrente de fuga superiores a 60 mA por um período superior a 2 s, inflamabilidade ou perfuração da amostra por erosão, por exemplo.

Na Figura 45 é possível visualizar um diagrama de barras que ilustra a suportabilidade das cinco amostras avaliadas de cada compósito em função do período de duração do ensaio (6 h).

Figura 45 – Duração do ensaio de trilhamento e erosão para cada amostra.



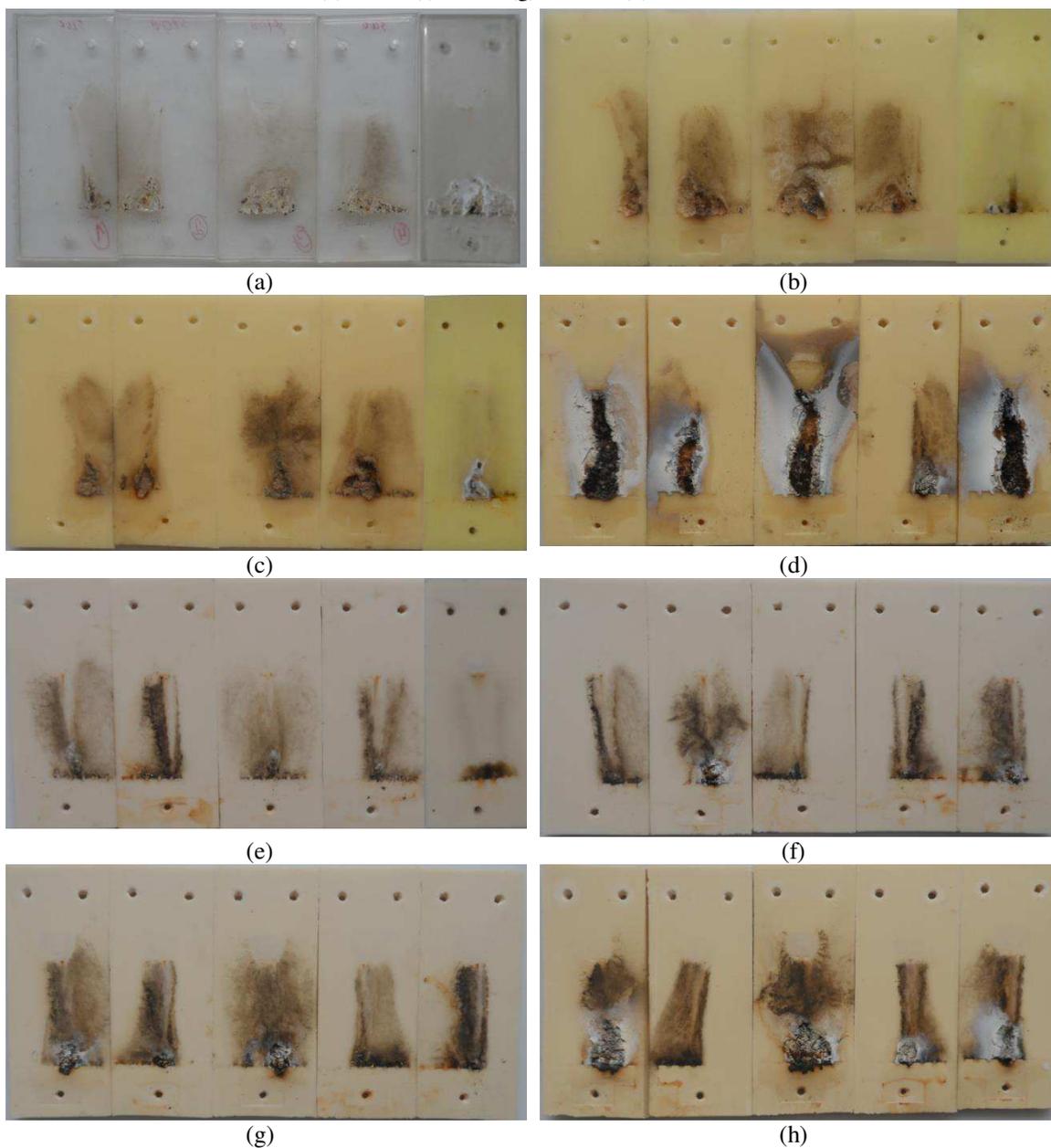
Fonte: Próprio autor

Quando se analisa a Figura 45, verifica-se que a amostra de silicone puro (S100) não apresentou falhas para nenhuma das cinco amostras testadas para uma tensão aplicada de 3 kV por um período de 6 h. A adição da cera de carnaúba ao silicone para concentrações de 5% e 10%, indicados pelos compósitos SC5 e SC10, também suportaram os esforços elétricos para as condições do ensaio realizado. Contudo, a adição de cera de carnaúba em concentrações de 20% (amostra SC20) resultou na falha de duas amostras. A falha ocorreu por meio do critério de parada da corrente de fuga, com valores superiores a 60 mA por um período superior a 2 s.

As amostras produzidas pela adição da ATH ao silicone (SA20) apresentaram suportabilidade aos esforços elétricos durante o período de 6 h. Além disso, a utilização simultânea da ATH em concentrações de 20% e da cera de carnaúba em concentrações de 5%, 10% e 20% no silicone não resultaram na falha de nenhuma das amostras. Quando se compara as amostras SC20 e SAC20, verifica-se que a ATH constituiu a principal responsável pela suportabilidade das amostras no ensaio.

Na Figura 46 é possível visualizar as amostras imediatamente após a realização do ensaio de trilhamento elétrico e erosão por um período de até 6h. Quando se analisa qualitativamente a Figura 46, verifica-se que a degradação ocorre predominantemente próxima ao eletrodo aterrado. Evidenciou-se um maior nível de degradação para a amostra SC20 quando comparada as demais amostras. Além disso, constatou-se que as amostras sem ATH apresentaram maiores danos. A ATH atua como retardante de chamas e minimiza os danos provocados pela ação de descargas elétricas superficiais.

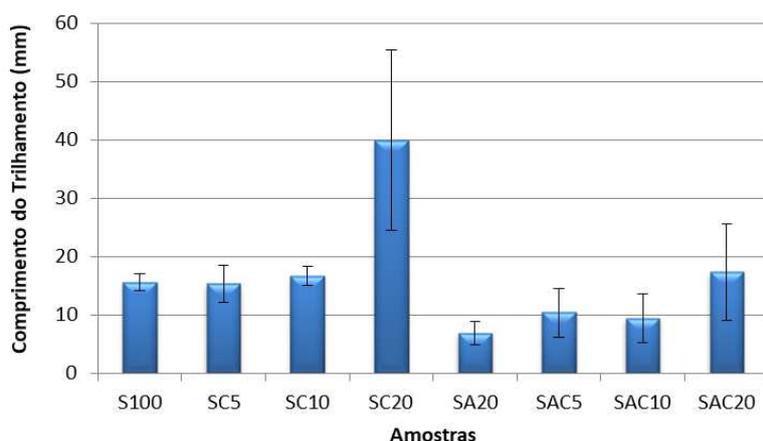
Figura 46 – Amostras após ensaio de trilhamento elétrico e erosão (a) S100 (b) SC5 (c) SC10 (d) SC20 (e) SA20 (f) SAC5 (g) SAC10 (h) SAC20.



Fonte: Próprio autor.

A intensidade da degradação das amostras foi quantificada por meio da medição do comprimento do trilhamento elétrico e da quantidade de massa erodida. Para fins de comparação, todas as amostras foram consideradas. Na Figura 47 são mostrados os valores médios de comprimento do trilhamento elétrico para cada compósito e o intervalo de confiança, indicado por meio de barra de erro.

Figura 47 – Comprimento do trilhamento elétrico para as amostras investigadas.



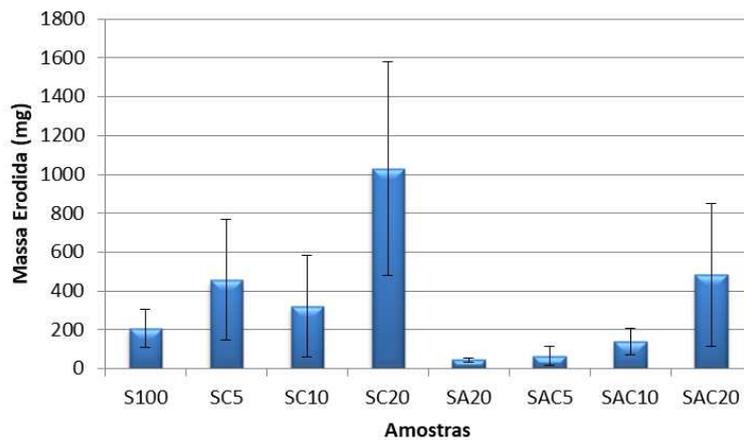
Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa a Figura 47, evidencia-se que as amostras de silicone puro (S100) apresentaram um comprimento médio de trilhamento em torno de 15 mm e, conseqüentemente, inferior ao valor crítico de 25 mm estabelecido pela norma IEC 60587. A adição da cera de carnaúba ao silicone para concentrações de 5% e 10%, indicado pelas amostras SC5 e SC10, apresentaram comprimentos de trilhamento similares às amostras S100. Contudo, a adição de 20% de cera de carnaúba ao silicone provocou um aumento do comprimento do trilhamento, com valor médio superior a 25 mm.

A adição da ATH ao silicone em concentrações de 20%, indicado pela amostra SA20, provocou uma redução significativa do comprimento do trilhamento quando comparado à amostra S100. A adição da cera de carnaúba em concentrações de 5% e 10% juntamente com a ATH em concentrações de 20% resultou em um ligeiro aumento do valor médio de comprimento do trilhamento. No entanto, não existem diferenças significativas entre as amostras SA20, SAC5 e SAC10 para um intervalo de confiança de 95%. A aplicação de 20% de cera de carnaúba (amostra SAC20) apresentou uma tendência de aumento dos valores médios de comprimento do trilhamento.

Na Figura 48 são mostrados os valores médios de massa erodida para cada compósito e o intervalo de confiança, indicado por meio de barra de erro.

Figura 48 – Quantidade de massa erodida para as amostras investigadas.



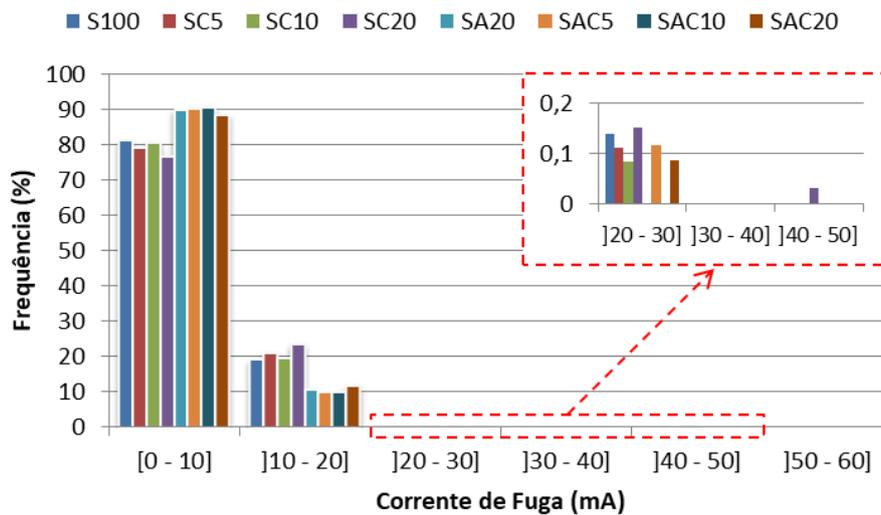
Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa a Figura 48, evidencia-se que as amostras de silicone puro (S100) apresentaram uma quantidade média de massa erodida de 200 mg, aproximadamente. A adição da cera de carnaúba ao silicone para concentrações de 5% e 10%, indicado pelas amostras SC5 e SC10, resultou em um pequeno aumento da quantidade de massa erodida. A adição de 20% de cera de carnaúba ao silicone resultou em maiores perdas de massa após a realização do ensaio.

A adição da ATH ao silicone em concentrações de 20%, indicado pela amostra SA20, provocou uma redução significativa na quantidade de massa erodida quando comparado às amostras S100, SC5, SC10 e SC20. A adição da cera de carnaúba em concentrações de 5% e 10% juntamente com a ATH em concentrações de 20% resultou em um ligeiro aumento do valor médio de comprimento do trilhamento. No entanto, não existem diferenças significativas entre as amostras SA20, SAC5 e SAC10 para um intervalo de confiança de 95%. A aplicação de 20% de cera de carnaúba (amostra SAC20) apresentou uma tendência de aumento dos valores médios da quantidade de massa erodida.

Durante a realização do ensaio de trilhamento elétrico e erosão, os valores *rms* da corrente de fuga foram medidos e utilizados como parâmetro para análise do desempenho das amostras a base de RTV-SIR. Na Figura 49 é mostrado o histograma dos valores *rms* da corrente de fuga medidos ao longo do período de realização do ensaio.

Figura 49 – Histograma da corrente de fuga para o ensaio de trilhamento elétrico e erosão



Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa o intervalo de 0 mA até 10 mA na Figura 49, verifica-se que a amostra S100 apresentou um nível de frequência de ocorrência de 80%, aproximadamente. Quando se adiciona a cera de carnaúba ao silicone para concentrações de 5%, 10% e 20%, verifica-se que a frequência de ocorrência dos valores de corrente de fuga foi similar a amostra S100. Com a adição de ATH ao silicone, indicado pela amostra SA20, verifica-se um aumento do número de ocorrências da corrente entre 0 mA e 10 mA, em torno de 90%. A adição da cera de carnaúba em concentrações de 5%, 10% e 20% juntamente com a ATH em concentrações de 20% manteve a frequência de ocorrência da corrente em torno de 90%.

Para o intervalo de 10 mA até 20 mA, verifica-se que a amostra S100 apresentou um nível de frequência de ocorrência de 20%, aproximadamente. Com a adição da cera de carnaúba ao silicone (amostras SC5, SC10 e SC20), verificou-se que os níveis de frequência de ocorrência se mantiveram em torno de 20%, com uma leve tendência de crescimento. Quando se adiciona a ATH ao silicone, indicado pela amostra SA20, verifica-se uma redução do número de ocorrências de valores de corrente para valores em torno de 10%. A adição da cera de carnaúba em concentrações de 5%, 10% e 20% à matriz com silicone juntamente com a ATH em concentrações de 20% manteve a frequência de ocorrência em torno de 10%.

Quando se analisa o intervalo de 20 mA até 30 mA, verifica-se para todas as amostras um nível de frequência de ocorrência inferior a 0,2%. No gráfico também se

pode constatar que não houve ocorrências para os intervalos de 30 mA até 40 mA e de 50 mA até 60 mA. Para o intervalo de 40 mA até 50 mA, constatou-se que a amostra SC20 apresentou uma frequência de ocorrência inferior a 0,1%.

Duas amostras da composição SC20 apresentaram correntes de fuga em torno de 60 mA e não foram consideradas no gráfico da Figura 49 por falharem em um período inferior à duração total do ensaio.

Portanto, é possível concluir que a adição da ATH à matriz polimérica do silicone minimiza os danos provocados pela ação de bandas secas na superfície dos revestimentos. A adição da cera de carnaúba em baixas concentrações não exerce influência significativa no desempenho dos revestimentos. Contudo, a utilização da cera de carnaúba em altas concentrações ( $\geq 20\%$ ) pode comprometer o desempenho e reduzir a durabilidade dos revestimentos.

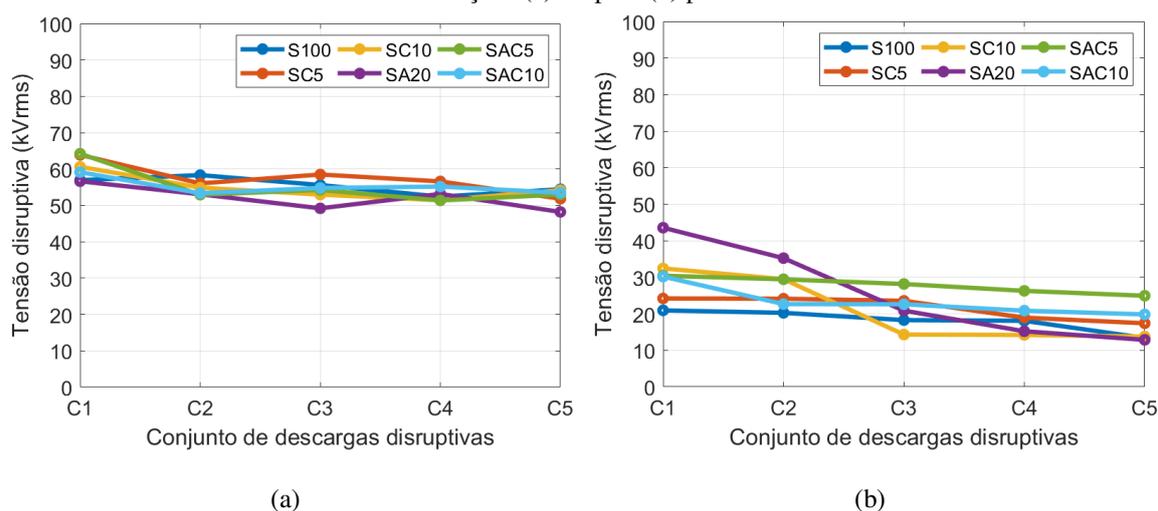
## 5.4 ENSAIO DE POLUIÇÃO ARTIFICIAL

A realização do ensaio de poluição teve como objetivos avaliar o desempenho da aplicação dos revestimentos de silicone investigados em isoladores de vidro quando submetidos a condições de limpos e com poluição. O desempenho dos revestimentos aplicados ao isolamento externo foi avaliado a partir da tensão disruptiva e da análise dos valores de pico da corrente de fuga, medidos antes e após a aplicação das descargas disruptivas, conforme descrito na seção 4.2.2.2.

### 5.4.1 TENSÃO DISRUPTIVA

Na Figura 50 são mostrados os valores das médias para cada conjunto (C1 a C5) composto pelas medições de cinco descargas disruptivas aplicadas sobre as amostras S100, SC5, SC10, SA20, SAC5 e SAC10 para as condições limpo e poluído. Durante o ensaio, a temperatura foi aproximadamente 26°C e a umidade relativa entre 60% e 70%.

Figura 50 – Valores médios de descargas disruptivas sobre isoladores revestidos para cada conjunto sob as condições (a) limpo e (b) poluído.



Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa a Figura 50, evidencia-se uma redução da suportabilidade dielétrica dos isoladores revestidos para condições de poluição. Para a condição limpo, Figura 50 (a), verifica-se que todos os isoladores revestidos apresentaram comportamentos similares ao longo da aplicação das descargas disruptivas. Os valores de tensão disruptiva apresentaram uma leve tendência de redução, com valores variando de 60 kV para o conjunto C1 a 50 kV para o conjunto C5, aproximadamente.

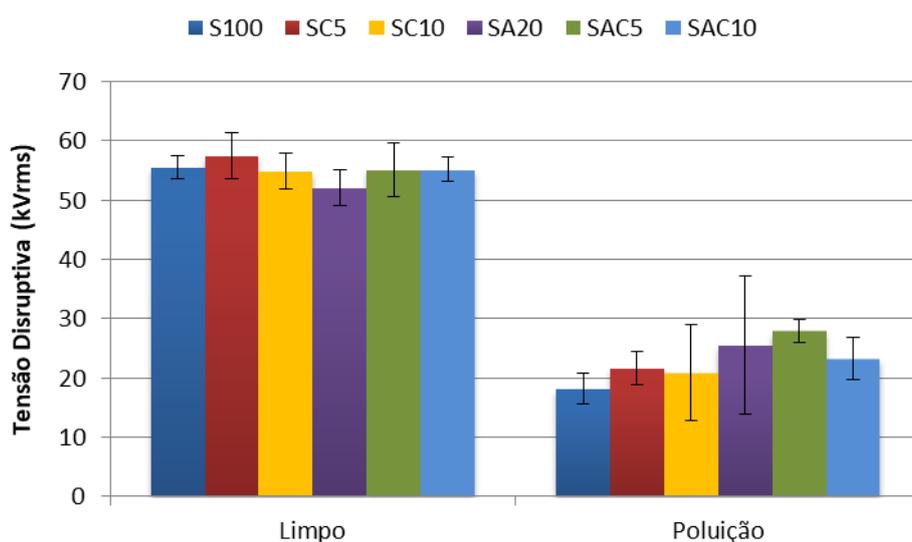
Para as condições de poluição, Figura 50 (b), constatou-se que as amostras de silicone puro (S100) apresentaram o menor valor médio de tensão disruptiva para o primeiro conjunto de medição C1, com aproximadamente 21 kV. Ao longo da aplicação das descargas disruptivas, os valores da tensão disruptiva tenderam a diminuir para valores próximos à 13 kV no conjunto C5. A adição da cera de carnaúba ao silicone para concentrações de 5% e 10%, indicado pelas amostras SC5 e SC10, ocasionou um aumento dos valores médios da tensão disruptiva em relação à amostra S100 no conjunto de medição C1, com aproximadamente 24 kV para a amostra SC5 e 32 kV para a amostra SC10. Contudo, os valores de tensão disruptiva tenderam a diminuir para valores em torno de 15 kV para o conjunto C5.

A adição da ATH ao silicone em concentrações de 20%, indicado pela amostra SA20, resultou nos maiores valores médios de tensão disruptiva para o conjunto de medição C1, com aproximadamente 43 kV. Contudo, verificou-se uma grande tendência de redução dos valores de tensão disruptiva, atingindo valores em torno de 15 kV para o conjunto C5. A adição da cera de carnaúba em concentrações de 5% e 10% à matriz do silicone juntamente com a ATH em concentrações de 20% ocasionou a obtenção de

valores médios de tensão disruptiva em torno de 30 kV para o conjunto de medição C1. No entanto, as mostras SAC5 e SAC10 apresentaram menor tendência de redução dos valores de tensão disruptiva quando comparados à amostra SA20, atingindo no conjunto C5 valores médios de 25 kV para a amostra SAC5 e 20 kV para a amostra SAC10.

Na Figura 51 são mostrados os valores médios da tensão disruptiva para as composições aplicadas à superfície de isoladores de vidro quando submetidos aos dois níveis de poluição. Os valores foram obtidos a partir da média aritmética das medições mostradas na Figura 50.

Figura 51 – Tensão disruptiva versus nível de poluição para revestimentos de silicone.



Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa a Figura 51, constata-se que as amostras avaliadas apresentaram uma redução dos valores médios de tensão disruptiva com a aplicação da poluição. Para a condição limpo, os valores de tensão disruptiva de todas as amostras situaram-se em torno de 53 kV e não foram evidenciadas diferenças significativas para um intervalo de confiança de 95%.

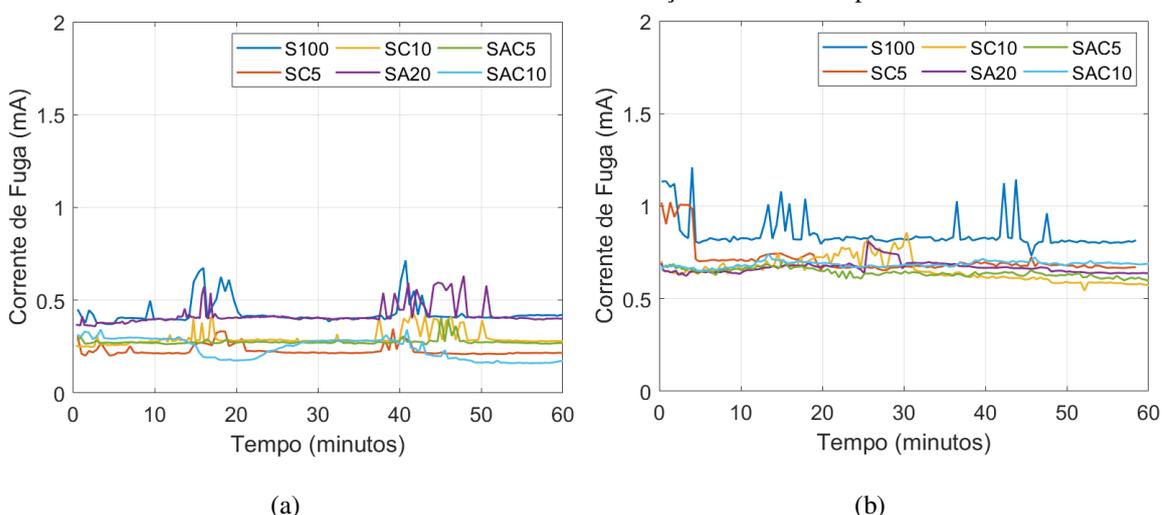
Para a condição de poluição da Figura 51, verificou-se que a amostra de silicone puro (S100) apresentou um valor médio de tensão disruptiva de 18 kV, aproximadamente. A adição da cera de carnaúba ao silicone em concentrações de 5% e 10% ocasionou um leve aumento dos valores de tensão disruptiva para valores em torno de 21 kV. A adição da ATH ao silicone em concentrações de 20%, indicado pela amostra SA20, resultou em um aumento do valor da tensão disruptiva ( $\approx 26$  kV) quando comparado as amostras S100, SC5 e SC10. A adição conjunta da cera de carnaúba na

concentração de 5% e ATH na concentração de 20% (amostra SAC5) resultou em um leve aumento do valor de tensão disruptiva quando comparado a amostra SA20. No entanto, a adição de 10% da cera de carnaúba juntamente com a ATH (amostra SAC10) ocasionou uma leve redução do valor médio da tensão disruptiva quando comparado a amostra SA20.

## 5.4.2 MONITORAMENTO DA CORRENTE DE FUGA

Os valores de pico da corrente de fuga foram medidos e utilizados como parâmetro de análise para avaliar o desempenho dos revestimentos aplicados aos isoladores de vidro e determinar indícios de degradação. Na Figura 52 é possível visualizar os valores da corrente de fuga medidos antes e após a aplicação de descargas disruptivas para a condição de limpo.

Figura 52 – Valores de pico das correntes de fuga medidas (a) antes e (b) após descargas disruptivas para isoladores com revestimento – Condição: Isolador Limpo.



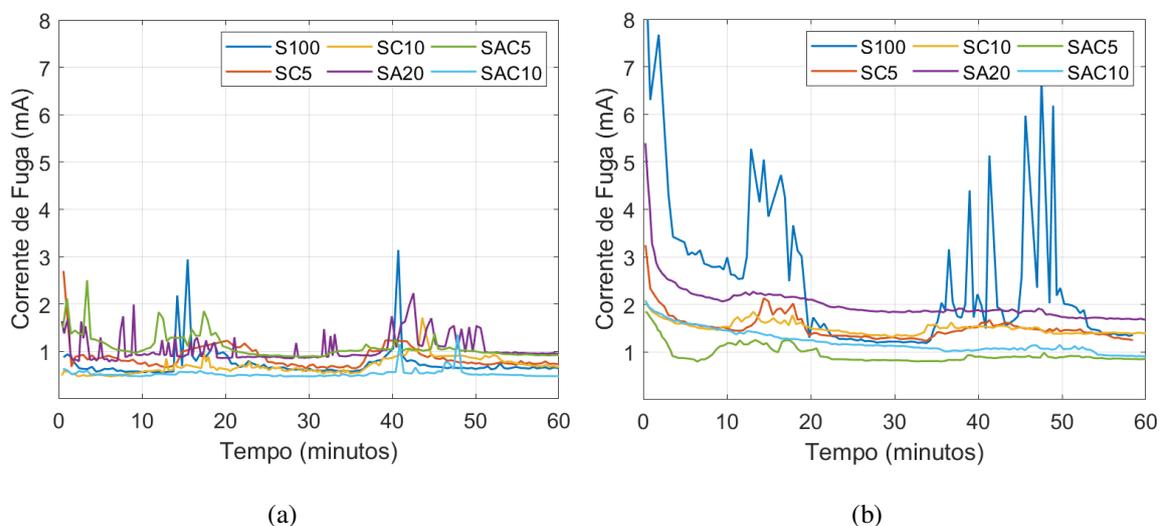
Fonte: Próprio autor.

Ao analisar os gráficos da Figura 52, verifica-se uma intensificação dos valores de corrente de fuga para as amostras após a aplicação das descargas disruptivas. Antes da aplicação, Figura 52 (a), as amostras apresentavam valores inferiores a 0,6 mA. As amostras de silicone (S100) e silicone com ATH (SA20) apresentaram valores médios em torno de 0,4 mA enquanto as demais amostras apresentaram valores em torno de 0,3 mA. As elevações repentinas nos valores medidos de corrente estão associadas a ocorrência de bandas secas na superfície do isolador.

Após a aplicação das descargas disruptivas para os isoladores limpos, Figura 52 (b), constatou-se uma elevação nos valores da corrente de fuga para todas as amostras, com valores superiores a 0,6 mA. A amostra de silicone puro (S100) apresentou os maiores valores, com até 1,2 mA. A amostra de silicone adicionada da cera de carnaúba em concentração de 5% (SC5) apresentou uma intensificação dos valores de corrente de fuga nos instantes iniciais da medição provavelmente devido a ação de bandas secas na superfície. Posteriormente, os valores da corrente de fuga para a amostra SC5 diminuíram e tenderam para valores em torno de 0,7 mA. As demais amostras apresentaram valores em torno de 0,7 mA durante todo o ensaio.

Na Figura 53 é possível visualizar os valores da corrente de fuga medidos antes e após a aplicação de descargas disruptivas para a condição de poluição e por um período de uma hora.

Figura 53 – Valores de pico das correntes de fuga medidas (a) antes e (b) após descargas disruptivas para isoladores com revestimento – Condição: Isolador Poluído.



Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa a Figura 53, verifica-se uma intensificação dos valores de corrente de fuga ocasionada pela poluição quando comparado aos valores dos gráficos da Figura 52 para a condição limpo. Na Figura 53 (a) constatou-se a ocorrência de correntes de fuga superiores a 0,6 mA antes da aplicação das descargas disruptivas. Valores de corrente até 3 mA foram observados para a amostra S100.

Após a aplicação das descargas disruptivas para os isoladores com poluição, Figura 53 (b), constatou-se uma intensificação dos valores de corrente de fuga para todas as amostras, com valores superiores a 1 mA. A amostra de silicone puro apresentou elevados valores de corrente de fuga, atingindo até 8 mA. A adição da cera

de carnaúba ao silicone em concentrações de 5% e 10% ocasionou uma redução nos valores da corrente de fuga, com valores variando em torno de 1,5 mA. A adição da ATH ao silicone para concentração de 20% proporcionou uma redução dos valores de corrente de fuga quando comparados à amostra S100. No entanto, os valores medidos da corrente de fuga para a amostra SA20 ainda foram superiores as amostras SC5 e SC10. A adição da ATH em concentrações de 20% e cera de carnaúba em concentrações de 5% e 10% ao silicone resultou nos menores valores de corrente de fuga, com valores variando em torno de 1 mA.

Danos visíveis em alguns dos revestimentos avaliados foram constatados após a aplicação das descargas disruptivas e medições das correntes de fuga. Na Figura 54 é possível visualizar indícios de danos no revestimento S100 provocados por descargas disruptivas e bandas secas. A ocorrência de danos pode ter contribuído na intensificação da corrente de fuga para as amostras avaliadas.

Figura 54 – Fotografia do revestimento S100 com indícios de danos provocados por descargas disruptivas e bandas secas.



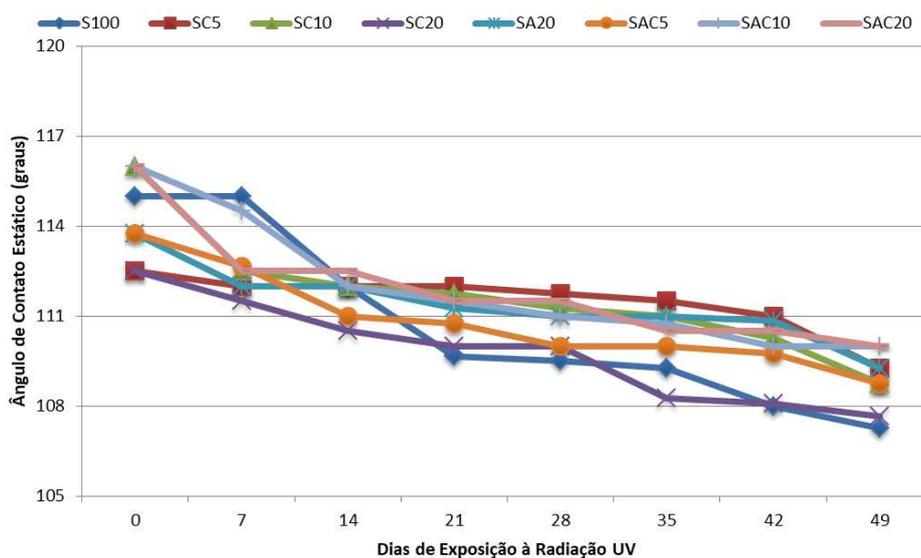
Fonte: Próprio autor

Pelo exposto, é possível concluir que a poluição consiste em um fator determinante para a manutenção do isolamento elétrico. Os resultados demonstraram que a adição da ATH e da cera de carnaúba na matriz do silicone permitem aperfeiçoar o desempenho do isolamento elétrico para condições de poluição. O melhor desempenho pode ser evidenciado com a amostra SAC5 que apresentou maior valor médio de tensão disruptiva e menores valores de corrente de fuga sob névoa por um período de uma hora após a aplicação das descargas disruptivas.

## 5.5 HIDROFOBICIDADE

Amostras a base de RTV-SIR foram submetidas ao envelhecimento acelerado por meio de exposição à radiação UV, conforme seção 4.2.2.6, e o comportamento hidrofóbico foi avaliado a partir de medições periódicas do ângulo de contato estático, conforme especificado na seção 4.2.2.7. Na Figura 55 são mostrados os valores de ângulo de contato medidos para cada amostra em intervalos de sete dias.

Figura 55 – Valores de ângulo de contato estático para amostras a base de RTV-SIR.



Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa a Figura 55, evidencia-se o comportamento hidrofóbico das amostras de RTV-SIR durante todo o período de exposição à radiação UV, com valores de ângulos de contato superiores a  $90^\circ$ . As amostras de silicone puro (S100) apresentaram valores de ângulo de contato de  $115^\circ$ , aproximadamente, antes da exposição à radiação UV. Contudo, após 49 dias de exposição à radiação UV, constatou-se uma redução do valor ângulo de contato para  $107^\circ$ .

A adição da cera de carnaúba ao silicone para concentrações de 5% e 20% resultou em valores de ângulo de contato ligeiramente inferiores à amostra S100 antes da exposição das amostras à radiação UV. A adição de 10% da cera de carnaúba resultou em valores de ângulo de contato ligeiramente superior à amostra S100. Contudo, ao final da exposição à radiação UV, as amostras apresentaram menor tendência de redução do ângulo de contato quando comparadas à amostra S100 e valores de  $109^\circ$ , aproximadamente.

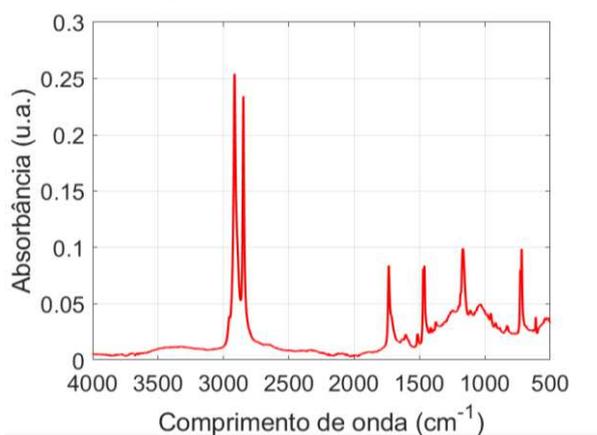
A adição da ATH em concentrações de 20% e da cera de carnaúba em concentrações de 5%, 10% e 20% ao silicone resultou em valores de ângulo de contato próximos a amostra S100 antes da exposição das amostras à radiação UV. Após 49 dias de exposição à radiação UV, verificou-se que as amostras compostas por ATH e cera de carnaúba apresentaram menor tendência de redução do ângulo de contato quando comparadas à amostra S100, com os maiores ângulos obtidos para as amostras SAC10 e SAC20.

## 5.6 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO - FTIR

A realização do ensaio de FTIR teve como objetivo caracterizar e identificar grupamentos químicos da cera de carnaúba e das composições de RTV-SIR investigadas, antes e após exposição à radiação UV.

Os espectros obtidos, na região do infravermelho, para a cera de carnaúba são mostrados na Figura 56 por meio da absorbância em função do comprimento de onda. As bandas de absorção e seus respectivos modos vibracionais são descritos na Tabela 8.

Figura 56 – Espectro de FTIR para a cera de carnaúba.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Descrição das bandas de absorção da cera de carnaúba.

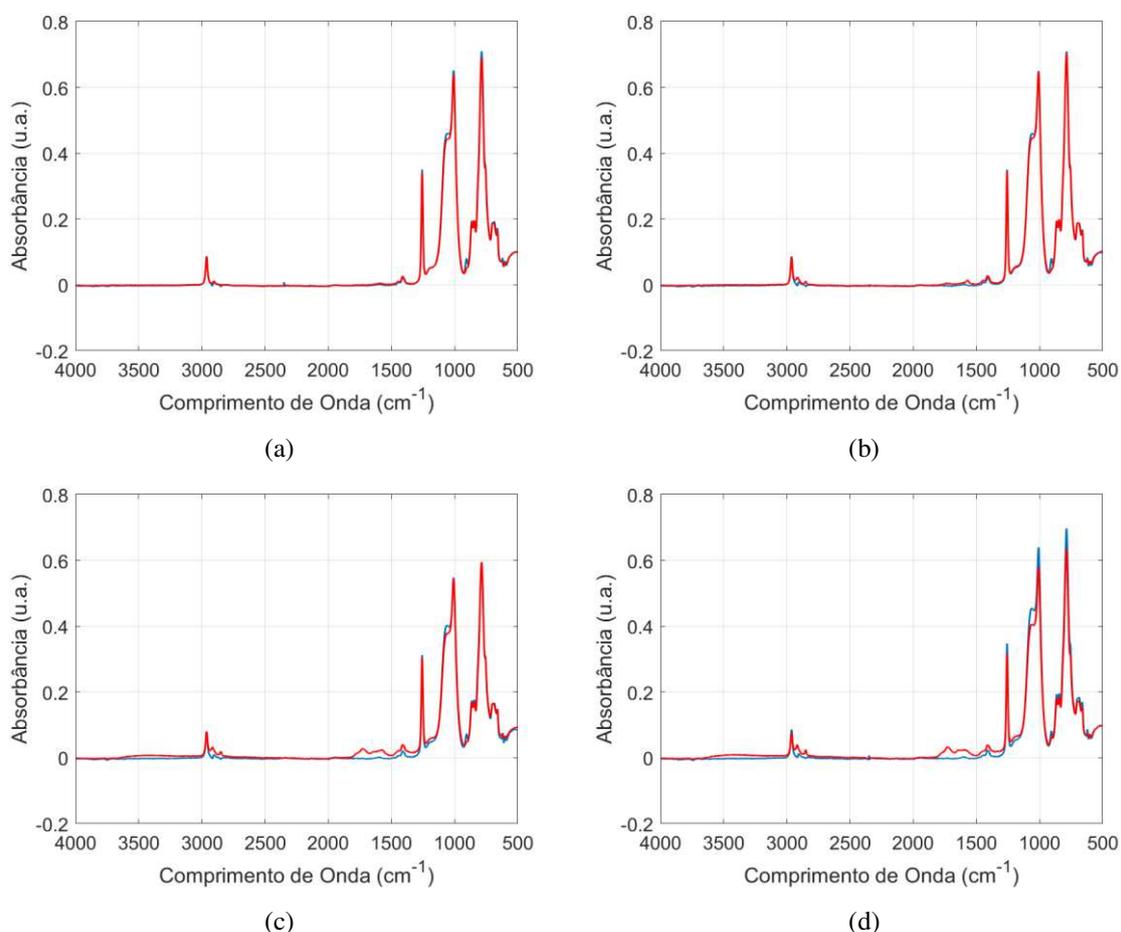
| Número de Ondas (cm <sup>-1</sup> ) | Grupos funcionais   |
|-------------------------------------|---|
| 3000 até 2848                       | Bandas referentes as vibrações de grupos CH <sub>2</sub> e CH <sub>3</sub>  |
| 1735                                | Banda referente as ligações C=O   |
| 1465-1375                           | Bandas referentes as vibrações dos grupos CH <sub>2</sub> e CH <sub>3</sub> |
| 1169                                | Banda referente as ligações C-O   |
| 720                                 | Banda referente as vibrações do grupo CH <sub>2</sub>                       |

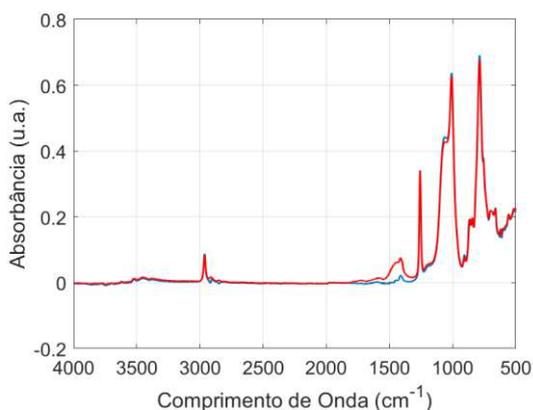
Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa o espectro de FTIR da cera de carnaúba na Figura 56, evidencia-se o surgimento de duas bandas de absorção com alta intensidade na região entre  $3000\text{ cm}^{-1}$  até  $2848\text{ cm}^{-1}$  que correspondem às vibrações de grupos metil e metileno. As bandas  $2915\text{ cm}^{-1}$  e  $2848\text{ cm}^{-1}$  estão associadas, respectivamente, aos estiramentos assimétrico e simétrico das ligações C-H de estruturas alifáticas formadas por carbonos primários e secundários. As bandas  $1735\text{ cm}^{-1}$  e  $1169\text{ cm}^{-1}$  correspondem ao estiramento das ligações C=O e C-O de ésteres, respectivamente. As bandas  $1463\text{ cm}^{-1}$  e  $719\text{ cm}^{-1}$  estão associadas às deformações angulares simétrica e assimétrica no plano de grupos  $\text{CH}_2$ , respectivamente.

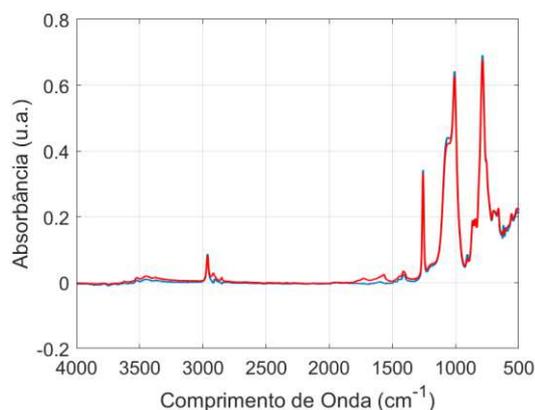
Na Figura 57 são ilustrados os espectros de FTIR dos compósitos de RTV-SIR antes e após a exposição a radiação UV por meio da absorbância em função do comprimento de onda. As bandas de absorção e seus respectivos modos vibracionais são descritos na Tabela 9.

Figura 57 - Espectro de FTIR antes (azul) e após (vermelho) exposição à radiação UV para as composições (a) S100 (b) SC5 (c) SC10 (d) SC20 (e) SA20 (f) SAC5 (g) SAC10 (h) SAC20

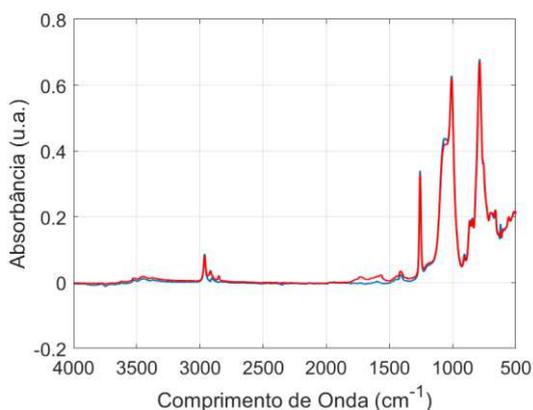




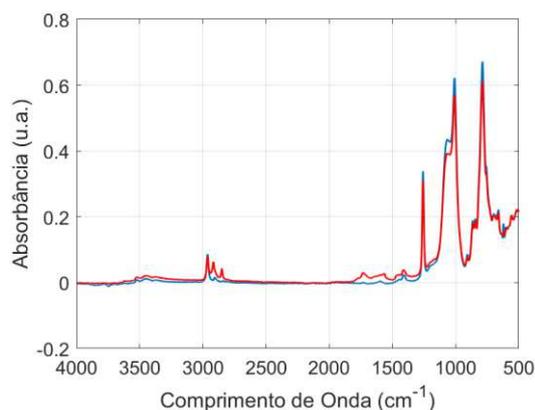
(e)



(f)



(g)



(h)

Fonte: Próprio autor

Tabela 9 – Descrição das bandas de absorção dos compósitos a base de RTV-SIR.

| Número de Ondas (cm <sup>-1</sup> ) | Grupos funcionais  |
|-------------------------------------|--|
| 3700 até 3200                       | Bandas referentes aos grupos OH e à água adsorvida                         |
| 3000 até 2848                       | Bandas referentes as vibrações de grupos CH <sub>2</sub> e CH <sub>3</sub> |
| 1735                                | Banda referente as ligações C=O  |
| 1580                                | Banda referentes as ligações C=C   |
| 1465-1375                           | Banda referente as vibrações de grupos CH <sub>2</sub> e CH <sub>3</sub>   |
| 1258                                | Banda referente as ligações Si-CH <sub>3</sub>                             |
| 1100 até 1000                       | Banda referente as ligações Si-O-Si  |
| 790                                 | Banda referente as ligações Si(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>              |
| 700                                 | Banda referente as ligações Si(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>              |

Fonte: Próprio autor

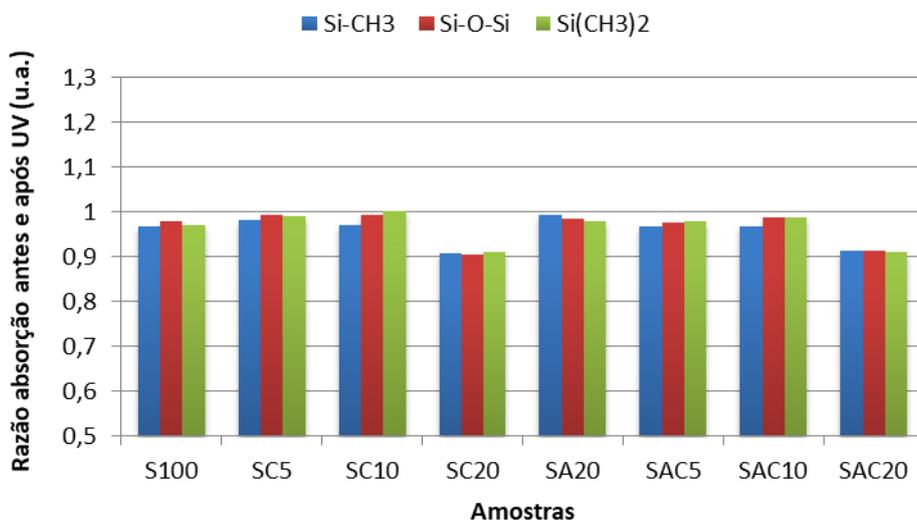
Quando se analisa os espectros de FTIR dos compósitos de RTV-SIR na Figura 57, constata-se a ocorrência de variações nas intensidades das bandas de absorção antes e após o envelhecimento por radiação UV. A ocorrência de bandas na região de 3700 cm<sup>-1</sup> até 3200 cm<sup>-1</sup> foi evidenciada para as Figura 57 (e) à Figura 57 (h) e corresponde ao estiramento assimétrico das ligações OH pertencentes à ATH. No

entanto, constatou-se o surgimento de bandas nessa região para a Figura 57 (c) e Figura 57 (d) após a exposição à radiação UV e que pode estar associado ao processo de hidroxilação na superfície dos compósitos. A região de  $3000\text{ cm}^{-1}$  até  $2848\text{ cm}^{-1}$  corresponde aos estiramentos assimétrico e simétrico das ligações dos grupos  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ .

A exposição à radiação UV provocou uma intensificação das bandas de absorção para a região de  $1900\text{ cm}^{-1}$  até  $1300\text{ cm}^{-1}$  para as amostras SC10, SC20 e todas contendo ATH, conforme ilustrado na Figura 57 (c) à Figura 57 (h). As bandas  $1735\text{ cm}^{-1}$  e  $1580\text{ cm}^{-1}$  estão associadas ao estiramento das ligações de  $\text{C}=\text{O}$  e  $\text{C}=\text{C}$ , respectivamente. A banda localizada na região de  $1465\text{ cm}^{-1}$  até  $1375\text{ cm}^{-1}$  corresponde a deformação angular das ligações dos grupos  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$  e foi mais intensa para a amostra SA20, conforme ilustrado na Figura 57 (e). A banda  $1258\text{ cm}^{-1}$  corresponde a deformação angular da ligação  $\text{Si}-\text{CH}_3$ . As bandas localizadas na região de  $1100\text{ cm}^{-1}$  até  $1000\text{ cm}^{-1}$  correspondem ao estiramento das ligações  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ . As bandas  $790\text{ cm}^{-1}$  e  $700\text{ cm}^{-1}$  correspondem as vibrações das ligações  $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$  e  $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ , respectivamente.

Para avaliar a degradação provocada pela radiação UV na borracha de silicone foi realizado a razão entre as intensidades das bandas de absorção após e antes a exposição à radiação UV para os principais grupos químicos que compõe a cadeia principal. Na Figura 58 é mostrada a razão das intensidades das bandas de absorção para as ligações  $\text{Si}-\text{CH}_3$ ,  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  e  $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$ .

Figura 58 – Razão entre bandas de absorção para as ligações  $\text{Si}-\text{CH}_3$ ,  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  e  $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$  antes e após exposição à radiação UV



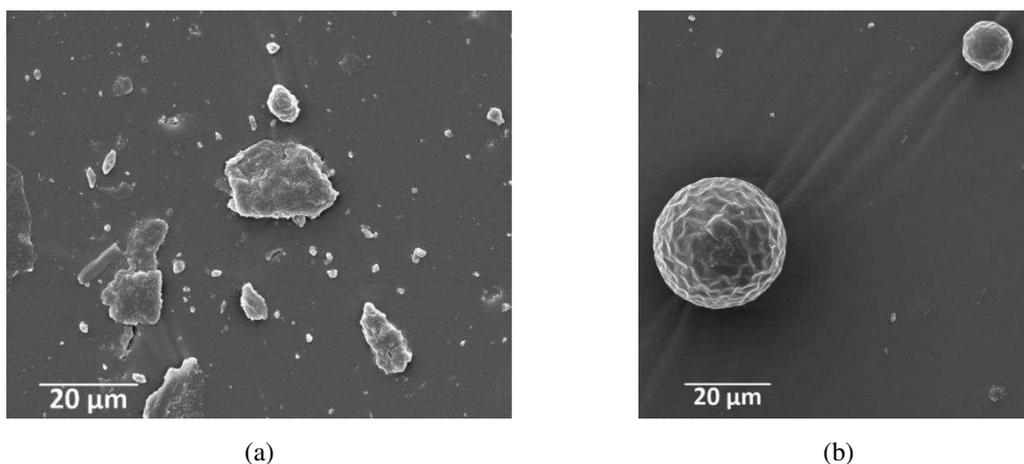
Fonte: Próprio autor

Quando se analisa a Figura 58, evidencia-se uma redução da intensidade das bandas de absorção após a exposição a radiação UV para as ligações Si-CH<sub>3</sub>, Si-O-Si e Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. A razão das intensidades das bandas de absorção apresentaram valores próximos da unidade, indicando baixa degradação da matriz polimérica após exposição à radiação UV. Os menores valores para a razão foram verificados para as amostras contendo 20% de cera de carnaúba na composição. A redução nos valores da razão das bandas de absorção para as ligações Si-CH<sub>3</sub> e Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> corrobora com a tendência redução dos valores de ângulo de contato das amostras após exposição à radiação UV, conforme discutido na seção 5.5.

## 5.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A realização de MEV teve como objetivo analisar a morfologia das cargas empregadas e investigar a sua dispersão na matriz polimérica. Na Figura 59 são mostradas fotomicrografias da ATH e da cera de carnaúba com aumentos de 2.000 x.

Figura 59 – Fotomicrografias obtidas por MEV para (a) ATH (b) Cera de carnaúba.

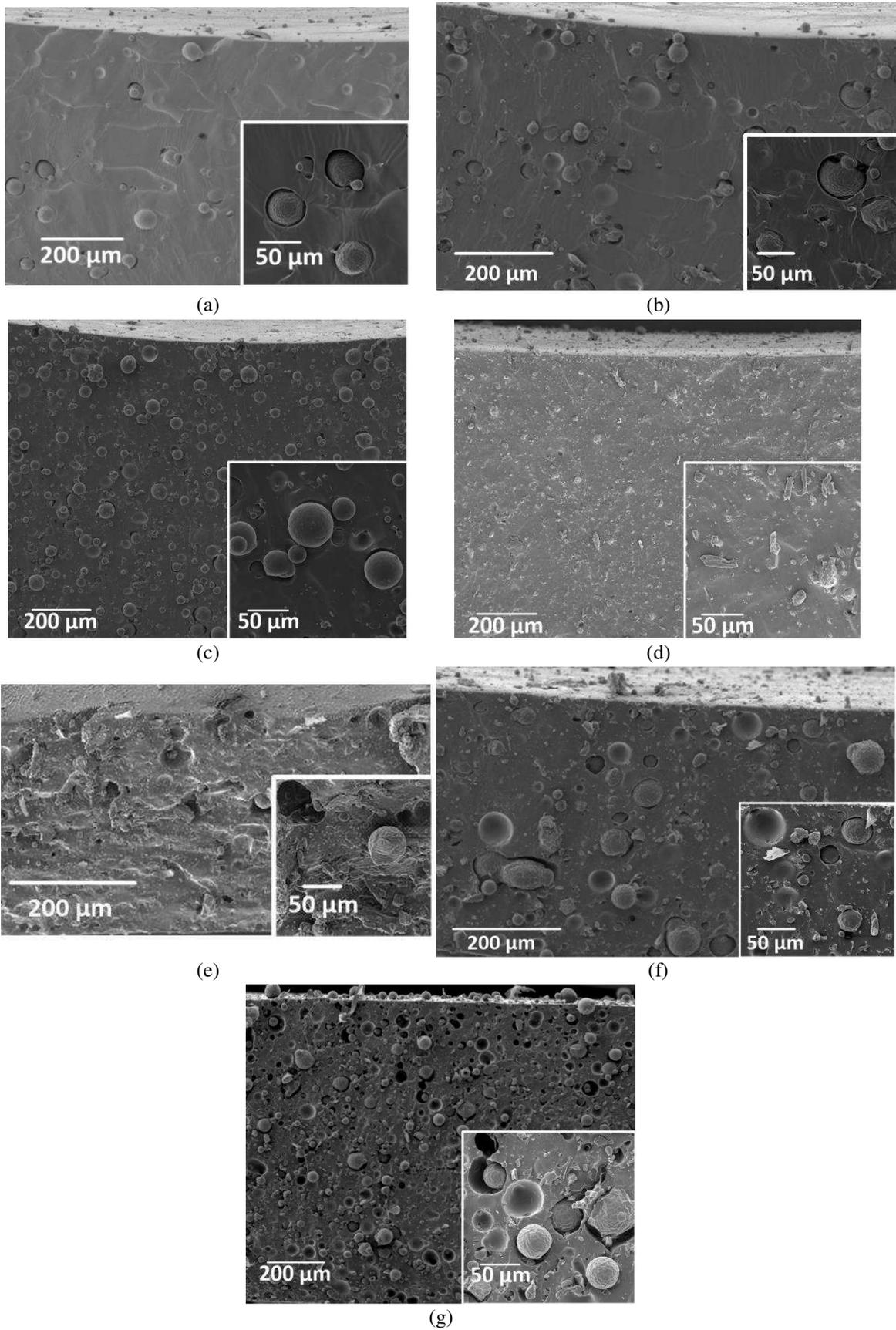


Fonte: Próprio autor

Na Figura 59 (a) verificou-se que a ATH é formada por partículas micrométricas com larga distribuição de tamanhos e formato de placas irregulares. Na Figura 59 (b) evidenciou-se que a cera de carnaúba é constituída por partículas micrométricas com formato esférico.

Para analisar a dispersão da ATH e da cera de carnaúba na matriz polimérica do silicone foram obtidas fotomicrografias da seção transversal para os compósitos investigados, conforme mostrado na Figura 60.

Figura 60 – Fotomicrografias da seção transversal com aumentos de 150x e 1000x para as amostras (a) SC5 (b) SC10 (c) SC20 (d) SA20 (e) SAC5 (f) SAC10 (g) SAC20.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 60, verificou-se a ocorrência de deformações na superfície, Figura 60 (e), e cavidades por remoção de cargas, Figura 60 (f). Os danos foram provocados pelo método de fratura empregado para obtenção das amostras, realizado exclusivamente por meio do corte utilizando material perfurocortante.

Quando se analisa a distribuição das cargas no interior do silicone, evidencia-se uma dispersão regular das cargas com a ocorrência de algumas regiões de heterogeneidade e aglomeração de cargas. Os maiores níveis de aglomeração e de regiões heterogêneas foram verificados para as amostras SC20 e SAC20, Figura 60 (c) e Figura 60 (g), respectivamente. As causas são devidas a problemas associados ao processo de mistura e ao grau de interação entre as cargas e o silicone.

Na Figura 60 evidencia-se que as cargas de cera de carnaúba possuem menor interação e formam regiões de vazios com a matriz polimérica do silicone quando comparadas as cargas de ATH. O aumento da concentração da cera de carnaúba tende a intensificar a formação de regiões heterogêneas, com maior número de vazios e maior aglomeração de cargas. Consequentemente, ocorre uma redução no desempenho dos revestimentos, conforme verificado para as amostras das composições SC20 e SAC20 após o ensaio de trilhamento elétrico e erosão (seção 5.3) e as medições de FTIR após exposição à radiação UV (seção 5.6).

O desempenho dos revestimentos pode ser aperfeiçoado a partir de uma melhor avaliação do método de mistura para minimizar a aglomeração de cargas e/ou utilização de agentes modificadores que proporcionam uma melhor adesão das cargas à matriz polimérica do silicone, conforme verificado no trabalho de Bezerra (2014).

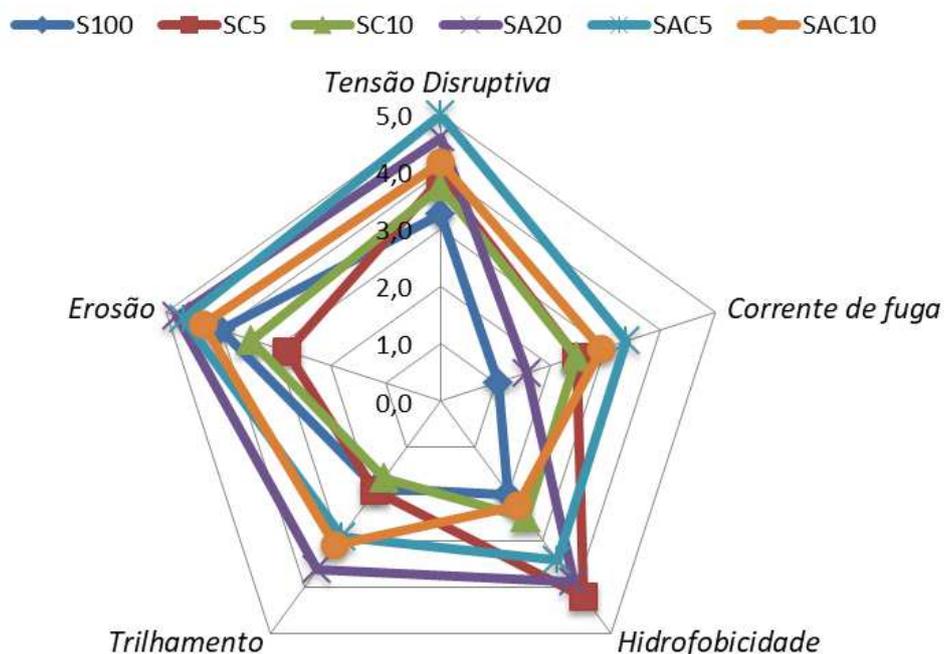
## 5.8 GRÁFICO DE RADAR

Na Figura 61 encontra-se ilustrado um gráfico de radar para a realização de uma avaliação geral dos resultados discutidos neste trabalho de tese. No gráfico é realizada uma comparação do desempenho das amostras investigadas, excetuando as amostras SC20 e SAC20 devido os baixos desempenhos e a não realização dos ensaios de tensão disruptiva e monitoramento da corrente de fuga sob névoa. Cada material foi graduado de 1 a 5, com os maiores valores representando os melhores desempenhos.

No gráfico de radar da Figura 61 foram ponderados os desempenhos das amostras considerando os ensaios em que foram realizadas análises em função do tempo com o

objetivo de subsidiar a seleção dos revestimentos em aplicações práticas. Os resultados de MEV, rigidez dielétrica, constante dielétrica e FTIR consistiram em análises pontuais que permitiram caracterizar e obter parâmetros de controle e qualidade do material produzido.

Figura 61 – Gráfico de radar.



Fonte: Próprio autor

Quando se analisa o gráfico da Figura 61, verifica-se que a amostra de silicone S100 apresentou o menor desempenho para o teste de tensão disruptiva em condições de poluição. A adição da cera de carnaúba (amostras SC5 e SC10) proporcionou uma pequena elevação do índice de desempenho, com aumento dos valores da tensão disruptiva. A adição da ATH ao silicone proporcionou uma elevação do índice de tensão disruptiva no gráfico de radar quando comparado às amostras sem a respectiva carga. O maior índice foi obtido para a amostra SAC5, formada pela composição da ATH e da cera de carnaúba em concentrações de 20% e 5%, respectivamente.

A avaliação da corrente de fuga ao longo do tempo para condições de poluição evidenciou menores desempenhos para as amostras de silicone puro (S100) e adicionado da ATH (SA20). A adição da cera de carnaúba proporcionou uma redução dos valores de corrente de fuga e, conseqüentemente, uma elevação dos índices no gráfico da Figura 61. Os melhores desempenhos foram obtidos pelas amostras SAC5 e SAC10, formadas pela adição da cera de carnaúba e ATH ao silicone.

Ao analisar a hidrofobicidade das amostras investigadas ao longo de 49 dias de exposição à radiação UV, verificou-se que todas as amostras mantiveram valores de ângulo de contato superiores a 90°. Contudo, o comportamento hidrofóbico ponderado no gráfico de radar evidenciou que a amostra S100 apresentou uma maior tendência de redução dos valores de ângulo de contato ao longo do período de exposição à radiação UV. A adição da cera de carnaúba em concentrações de 5%, indicado pela amostra SC5, proporcionou maiores índices no gráfico de radar. Já a adição da cera de carnaúba em concentrações de 10%, indicado pela amostra SC10, proporcionou índices de desempenho no gráfico de radar similares à amostra S100. A adição da ATH ao silicone proporcionou um desempenho superior a amostra S100 e similar a amostra SC5. A utilização conjunta da ATH e cera de carnaúba para concentrações de 20% e 5%, respectivamente, também proporcionou desempenhos superiores à amostra S100 e similares às amostras SC5 e SA20.

Quando se avalia a resistência das amostras aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão, evidencia-se que as amostras de silicone puro (S100) apresentaram baixos índices para trilhamento elétrico e médio para erosão. A adição da cera de carnaúba resultou em desempenhos similares à amostra S100 para trilhamento elétrico. Contudo, a adição da cera de carnaúba ocasionou um aumento das perdas de massa e, conseqüentemente, índices inferiores à amostra S100 no gráfico de radar. As amostras com ATH (SA20) na composição apresentaram os melhores desempenhos. A adição da ATH e da cera de carnaúba ao silicone resultou em desempenhos próximos à amostra SA20, com índices ligeiramente inferiores.

Pelo exposto, de modo geral, é possível verificar que as amostras SA20 e SAC5 apresentaram os melhores desempenhos enquanto que a amostra de silicone puro S100 apresentou o pior desempenho. A amostra SAC5 apresentou maiores índices de tensão disruptiva e corrente de fuga para condições de poluição, favorecendo a aplicação do revestimento em ambientes em que poluição e umidade são fatores determinantes. Contudo, a amostra SAC5 apresentou limitações com relação ao trilhamento elétrico, o que pode influenciar na durabilidade e eficiência do revestimento ao longo do tempo.

## 5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi avaliada a influência da cera de carnaúba no preenchimento de revestimentos aplicados no isolamento externo em alta tensão. Para tanto, amostras de RTV-SIR com diferentes concentrações de cera de carnaúba e ATH foram produzidas com o objetivo de explorar o desempenho em altas e baixas concentrações. O desempenho foi avaliado por meio de diversas análises, que envolviam desde análises de controle e qualidade das amostras até ensaios que submetiam as amostras a condições severas de utilização.

A preparação das amostras e a realização dos ensaios demandaram tempo e contaram com uma série de dificuldades associadas desde a aquisição dos materiais básicos para a realização da pesquisa, como o silicone, até a preparação de uma infraestrutura que viabilizasse a realização de ensaios específicos, como trilhamento elétrico e erosão. Para tanto, durante a pesquisa foram desenvolvidos dois equipamentos para a realização de ensaios de trilhamento elétrico e erosão e envelhecimento por radiação UV, conforme descritos na seção 4.3. Além disso, os ensaios consistiram em atividades laboriosas e demandaram longos períodos de tempo até a conclusão, por exemplo, envelhecimento por radiação UV com  $\approx 1.200$ h de duração.

A realização de ensaios de MEV, FTIR, constante dielétrica e rigidez dielétrica permitiram caracterizar e avaliar a qualidade do processo de desenvolvimento das amostras de silicone. As análises de MEV permitiram investigar o formato das cargas e a sua dispersão no interior do silicone. O estudo dos espectros de FTIR permitiu caracterizar quimicamente as diversas amostras de silicone e investigar alterações provocadas pela exposição à radiação UV. As medições de constante dielétrica permitiram avaliar a influência dos mecanismos de polarização para as amostras de silicone com a adição da cera de carnaúba e da ATH. A determinação da rigidez dielétrica permitiu avaliar se a adição de cargas ao silicone provoca alterações significativas e se proporciona uma suportabilidade dielétrica mínima para aplicações no isolamento elétrico.

A realização de ensaios com aplicação de esforços elétricos sobre as amostras para diferentes condições de poluição e umidade, assim como, a exposição de amostras à radiação UV possibilitaram avaliar a resistência à degradação e o desempenho dos diferentes compósitos ao longo do tempo quando submetidos a condições adversas às

quais poderiam ser submetidos em campo. Além disso, as análises permitiram investigar as vantagens e consequências da aplicação da cera de carnaúba e da ATH na composição dos revestimentos, conforme resumido no gráfico de radar mostrado na Figura 61 da seção anterior.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões da pesquisa e algumas propostas e perspectivas de trabalhos futuros.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa e algumas propostas e perspectivas de trabalhos futuros.

### 6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, a influência da cera de carnaúba no desempenho de revestimentos de borracha de silicone (SIR) aplicados no isolamento externo em alta tensão foi avaliada. Para tanto, amostras e revestimentos a base de RTV-SIR foram preparados contendo diferentes concentrações de ATH e cera de carnaúba, com a finalidade de reduzir custos e proporcionar desempenho adequado para o isolamento cerâmico, sob condições adversas de umidade e poluição. Os revestimentos foram submetidos a estresses físico-químicos, por meio de exposição à radiação UV, e elétricos por meio da aplicação de descargas disruptivas, energização sob condições de névoa e ensaios de trilhamento elétrico e erosão.

Os ensaios de MEV, FTIR, constante dielétrica e rigidez dielétrica representaram parâmetros satisfatórios para a caracterização e avaliação da qualidade do processo de desenvolvimento das amostras de RTV-SIR. As análises de MEV evidenciaram uma dispersão regular das cargas com a ocorrência de algumas regiões de aglomeração, principalmente para amostras com 20% de concentração da cera de carnaúba. Os espectros de FTIR permitiram identificar grupamentos químicos e o envelhecimento das amostras de silicone após exposição à radiação UV a partir da redução dos picos de absorbância. As medições de constante dielétrica indicaram o surgimento de um comportamento polar com o aumento da concentração da cera de carnaúba e para adição da ATH. As medições de rigidez dielétrica evidenciaram que todas as amostras possuem valores significativamente superiores a 10 kV/mm, favorecendo a aplicação no revestimento e na saia de isoladores integralmente poliméricos, conforme especificado na NBR 15122.

A realização de ensaios de poluição em isoladores com revestimentos aplicados na superfície permitiu investigar o desempenho da isolação para condições que

normalmente o equipamento pode estar submetido durante a operação em campo. A partir da aplicação de descargas disruptivas e do monitoramento da corrente de fuga sob névoa, foi possível concluir que a adição conjunta da ATH e da cera de carnaúba em concentrações de 20% e 5%, respectivamente, proporcionaram os melhores desempenhos com relação ao conjunto de composições avaliadas.

A exposição de amostras de silicone à radiação UV provocou uma leve tendência de redução dos valores de ângulo de contato ao longo do tempo. Contudo, as amostras permaneceram hidrofóbicas, com valores de ângulo de contato superiores a 90°. Além disso, um baixo grau de envelhecimento foi constatado para as amostras após exposição à radiação UV, conforme verificado por meio dos espectros de FTIR.

A realização dos ensaios de trilhamento elétrico e erosão permitiu avaliar resistência à degradação e suportabilidade aos esforços elétricos. A partir dos resultados é possível concluir que a adição da ATH à matriz polimérica do silicone minimiza os danos provocados pela ação de bandas secas na superfície dos revestimentos. A adição da cera de carnaúba em baixas concentrações não exerceu influência significativa no desempenho dos revestimentos. Contudo, a utilização da cera de carnaúba em altas concentrações ( $\geq 20\%$ ) pode comprometer o desempenho e reduzir a durabilidade dos revestimentos.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação ao trabalho realizado, propõe-se:

- Aprimorar o método de processamento e mistura de cargas à borracha de silicone empregando outras técnicas difundidas na literatura;
- Estudar a perda e recuperação da hidrofobicidade de amostras de RTV-SIR a partir de medições do ângulo de contato dinâmico;
- Avaliar a influência da adição de cargas e os efeitos do envelhecimento acelerado nas propriedades mecânicas de revestimentos de RTV-SIR;
- Buscar revestimentos que proporcionem maior resistência ao trilhamento elétrico e erosão na superfície por meio do teste de plano inclinado (IPT);
- Estudar o comportamento de revestimentos de RTV-SIR para tensões contínuas.

## REFERÊNCIAS

ADEXIM-CONEXIM. **Correlação entre o tempo real de intemperismo e a ação do sistema C-UV com base na ASTM G53/154.** Março, 2000.

ALCOA. **Catálogo de Produtos - Hydrogard GP.** Disponível em: [https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/download/alumina\\_hidratada/Hydrogard-GP.pdf](https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/download/alumina_hidratada/Hydrogard-GP.pdf). Acesso em junho de 2015.

ALMIRALL, I. P. **Empleo Conjunto de Cargas Micrométricas y Nanométricas para Mejorar el Desempeño de la Silicona Vulcanizada a Temperatura Ambiente Empleada para Recubrir el Aislamiento Externo.** Tese de Doutorado. Instituto Superior Politécnico José Antón Echeverría, 2013.

ALVES, M. O.; COELHO, J. D. **Extrativismo da carnaúba: relações de produção, tecnologia e mercados.** Banco do Nordeste do Brasil, 2008.

ANEEL. **Campanha de Fiscalização das Transmissoras de Energia Elétrica.** Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/avisos-e-comunicados?p\\_p\\_id=101\\_INSTANCE\\_xVhS2p1F8dhn&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-3&p\\_p\\_col\\_count=1](http://www.aneel.gov.br/avisos-e-comunicados?p_p_id=101_INSTANCE_xVhS2p1F8dhn&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-3&p_p_col_count=1). Acesso em Maio de 2017.

ASTM. D149, **Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.** Research Report, ASTM International, USA, 2013.

ASTM, G. 151. **Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources.** In: American Society for Testing and Materials. 2000. p. 684-693.

ASTM, G. 154. **Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials.** ASTM, 2001.

ASTM, G. 53. **Standard Practice for Operating Light-and Water-Exposure Apparatus (Fluorescent UV-Condensation Type) for Exposure of nonmetallic Materials.** Annual Book of ASTM Standards, v. 14, p. 1271-1279, 1998.

ASTM-D2303, **Standard Test Method for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Packing and Erosion of Insulating Materials.**

BÁNHIDI, V.; FÉNIY, B.; CSATÓ, G.; HEGMAN, N. **Investigation of changing dielectric properties during dehydration of saw dust modified clay compositions.** In: Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara. 2007. Tom. 5. Fasc. 3. p. 122-129.

BERNLAND, K. **Hydrophobic epoxy resin for outdoor electrical insulation.** Master Thesis, ABB Switzerland Corporate Research, 2005.

BEZERRA, D. C. **Revestimento de Isoladores Elétricos Utilizando Borracha de Silicone/ Alumina Trihidratada/ Nanosílica.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

BOGORÓDITSKI, N. P.; PÁSINKOV, V. V.; TAREEV, B. M. **Materiales electrotécnicos.** Editorial Mir, Moscou, 1979.

BORIN, A. **Aplicação de Quimiometria e Espectroscopia no Infravermelho no Controle de Qualidade de Lubrificantes.** Dissertação de Mestrado. Unicamp, Campinas, 2003.

BRAINI, S. **Coatings for outdoor high voltage insulators.** Tese de Doutorado. Cardiff University, 2013.

BRANDALISE, R. N. **Avaliação da degradação biótica e abiótica da mistura polimérica de polietileno de alta densidade com o poli (álcool vinílico)**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. New York: Wiley, 2007.

CAMPO, E. A. **Selection of polymeric materials: how to select design properties from different standards**. William Andrew, 2008.

CARDOSO, R., BALESTRO, A. C., DELLALLIBERA, A., COSTA, E. C. M., ANGELINI, J. M. G., MEI, L. H. I. **Silicone insulators of power transmission lines with a variable inorganic load concentration: Electrical and physiochemical analyses**. Measurement, v. 50, p. 63-73, 2014.

CIGRE, TF 33.04.07. **Natural and Artificial Ageing and Pollution Testing of Polymeric Insulators**. CIGRE Document, n. 142, 1999.

CIGRE, WG C4.303. **Artificial Pollution Test for Polymer Insulators**. CIGRE Technical Brochure, n. 555, 2013.

COSER, E. **Caracterização da borracha de silicone utilizada em isoladores para rede elétrica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.

D'ALVA, O. A. **O extrativismo da carnaúba no Ceará**. Fortaleza, 2007.

DAVE, V.; DUBEY, P.; GUPTA, H.O.; CHANDRA, R. **Nanotechnology for outdoor High voltage insulator: An experimental Investigation**. International Journal of ChemTech Research, Vol.5, No.2, pp 666-670, 2013.

DE PAOLI, M. A. **Degradação e estabilização de polímeros**. 2008.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I., MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EdiPUCRS, 2007.

FARZANEH, M.; CHISHOLM, W. A. **Insulators for icing and polluted environments**. John Wiley & Sons, 2009.

FECHINE, G. J. M.; SANTOS, J. A. B.; RABELLO, M. S. **Avaliação da fotodegradação de poliolefinas através de exposição natural e artificial**. Química Nova, v. 29, n. 4, p. 674, 2006.

FEITOSA NETO, S. A.; ALMEIDA, G. F. B.; CASTRO, A. A.; SOUSA, F. G. G.; GUIDO JUNIOR, P.; BARBOSA, R. P.; CUSTÓDIO, S. R. M.; ALMEIDA, T. G.; COSTA, T. R. V. **Relatório de Análise: Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão**. Agência Nacional de Energia Elétrica – Brasília, 2017.

FERREIRA, T. V. **Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos Vecse do Ruído Ultrassônico**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

FISCHER-CRIPPS, A. C. **A simple phenomenological approach to nanoindentation creep**. Materials Science and Engineering: A, v. 385, n. 1, p. 74-82, 2004.

FONCEPI. **Cera de Carnaúba**. Disponível em: <http://foncepi.com/products/>. Acesso em Maio de 2017.

FONTANELLA, C. A. **Recobrimentos hidrofóbicos para uso em isoladores porcelânicos de alta tensão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2007.

FONTANELLA, C. A.; OLIVEIRA, A. P. N de; HOTZA, D. **Recobrimentos poliméricos hidrofóbicos sobre isoladores elétricos de porcelana**. Matéria, v. 13, n. 4, p. 624-635, 2008.

FRÉCHETTE, M. F.; VAUGHAN, A.; ALLAIS, A; HÄRING, U. **Functional Nanomaterials for the Electrical Power Industry**, Technical Brochure, WG D1.40, 2016.

GEORGE, J. M., PRAT, S., LUMB, C., VIRLOGEUX, F., GUTMAN, I., LUNDENGARD, J., & MARZINOTTO, M. **Field experience and laboratory investigation of glass insulators having a factory-applied silicone rubber coating**. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 21, n. 6, p. 2594-2601, 2014.

GERMANO, A. G. **Influence of Fillers on Silicone Elastomers for Outdoor Insulation**. Tese de Doutorado. München, Technische Universität München, 2015.

GHOSH, D., BHANDARI, S., CHAKI, T. K., KHASTGIR, D. **Development of a high performance high voltage insulator for power transmission lines from blends of polydimethylsiloxane/ethylene vinyl acetate containing nanosilica**. RSC Advances, v. 5, n. 71, p. 57608-57618, 2015.

GOLDSTEIN, J; NEWBURY D.E. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis - A text for biologist, Materials Scientist and Geologists**. Plenum Press, New York, 2nd ed., 1992.

GOUDIE, J. L. **Silicones for outdoor insulator maintenance**. In: Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 02CH37316). IEEE, p. 256-259, 2002.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. **Outdoor Insulators**. Arizona: Ravi Gorur Inc, 1999.

GUTMAN, I.; DERNFALK, A. **Pollution tests for polymeric insulators made of hydrophobicity transfer materials**. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 17, n. 2, p. 384-393, 2010.

HACKAM, R. **Outdoor HV composite polymeric insulators**. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on 6.5 (1999): 557-585.

HALL, J.; ORBECK, T. **Evaluation of a new protective coating for porcelain insulators**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, n. 12, p. 4689-4696, 1982.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física–Eletromagnetismo**, Vol. 3, 8ª Edição. Editora LTC, 2009.

HILLBORG, H. **Loss and recovery of hydrophobicity of polydimethylsiloxane after exposure to electrical discharges**. 2001.

IEC 60243-1. **Electrical strength of insulating materials-Test methods-Part 1: Test at Power Frequencies**, 2013.

IEC 60507. **Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on ac systems**. 1991.

IEC 60587. **Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion**. 2007.

IEC 60815-1. **Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - - Parte 1 Definições, informações e princípios gerais**. 2015.

IEC, T. S. 62073. **Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces**, v. 1, p. 2003-06, 2003.

ILHAN, S.; CHERNEY, E. A. **Comparative tests on RTV silicone rubber coated porcelain suspension insulators in a salt-fog chamber**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 25, n. 3, p. 947-953, 2018.

INPE. **Radiação UV**. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/uv/>. Acesso em: Outubro de 2017.

- ISOLADORES SANTA TEREZINHA. **Isoladores de Suspensão de Vidro: Catálogo do fabricante.** Campinas: [s.n.], 2002.
- JEON, Y.; HONG, S. K.; KIM, M.. **Effect of Filler Concentration on Tracking Resistance of ATH-Filled Silicone Rubber Nanocomposites.** *Energies*, v. 12, n. 12, p. 2401, 2019.
- KARADY, G. G.; SHAH, M.; BROWN, R. L. **Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation-I.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 1965-1971, 1995.
- KIM, S. H.; CHERNEY, E. A.; HACKAM, R. **Effects of filler level in RTV silicone rubber coatings used in HV insulators.** *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, v. 27, n. 6, p. 1065-1072, 1992.
- KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High voltage engineering fundamentals.** Newnes, 2000.
- LIEBERMANN, J. **New effective ways toward solving the problem of contamination of porcelain insulators.** *Refractories and Industrial Ceramics*, v.43, n.1-2, p.55-64. 2002.
- LOPO, A. B., SPYRIDES, M. H. C., LUCIO, P. S., & SIGRÓ, J. **Radiação ultravioleta, ozônio total e aerossóis na cidade de Natal-RN.** *HOLOS*, v. 6, 2013.
- MADIDI, F.; MOMEN, G.; FARZANEH, M. **Development of a Stable TiO<sub>2</sub> Nanocomposite Self-Cleaning Coating for Outdoor Applications.** *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2016, 2016.
- MALIK, N. H. **Electrical Insulation In Power Systems.** Power Engineering. Marcel Dekker, 1998.
- MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura. Florianópolis: Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- MANJANG, S., PUTERA, R. P., AKIL, Y. S., KITTA, I. **Electrical and Mechanical Properties of Fly Ash Filled Silicone Rubber for High Voltage Insulator.** *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 10, n. 17, p. 7320-7327, 2015.
- MATHERSA, M.; VIBHAKAR, C.; DUTTA, B.; VASUDEV N. **Investigation on Room Temperature Vulcanized Silicon Insulation With and Without ATH Filler Loading by Incline Plane Tracking & Erosion Test Method.** 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017.
- MENDOZA, A. I., MORIANA, R., HILLBORG, H., & STRÖMBERG, E.. **Super-hydrophobic zinc oxide/silicone rubber nanocomposite surfaces.** *Surfaces and Interfaces*, v. 14, p. 146-157, 2019.
- MESA, J. A. **Temas de Ingeniería Eléctrica.** Editorial Felix Varela. La Habana, 2009.
- MESQUITA, R. C. M. **Seleção de genótipos superiores de carnaubeira: (Copernicia sp).** Formulário de projeto de pesquisa apresentado ao FUNDECI-ETENE-BNB. Fortaleza, 2005.
- MEYER, L. H. **A study of the role of fillers in silicone rubber compounds for outdoor insulation.** Tese de Doutorado, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2003.
- MEYER, L. H.; JAYARAM, S; CHERNEY, E. A. **Thermal conductivity of filled silicone rubber and its relationship to erosion resistance in the inclined plane test.** *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 11, n. 4, p. 620-630, 2004.
- MOMEN, G.; FARZANEH, M. **Study of ice accumulation on nanocomposite semiconducting coatings.** In: *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2010 Annual Report Conference on. IEEE, 2010. p. 1-4.
- MOMENTIVE PERFORMANCE MATERIALS. **Technical Data Sheet RTV615 and RTV655.** USA, 2007.

- MORTON, M. **Rubber Technology**. 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
- NAZIR, M. T., PHUNG, B. T., YU, S., & LI, S. **Effects of thermal properties on tracking and erosion resistance of micro-ATH/AIN/BN filled silicone rubber composites**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 25, n. 6, p. 2076-2085, 2018.
- NBR 10621. **Isoladores utilizados em sistemas de alta tensão em corrente alternada - Ensaio de poluição artificial**. ABNT, 2005.
- NBR. 10296. **Material isolante elétrico—avaliação de sua resistência ao trilhamento elétrico e erosão sob severas condições ambientais**, São Paulo, 1998.
- NBR. 15122. **Isoladores bastão compostos poliméricos para tensões acima de 1000V**. Rio de Janeiro, 2004.
- NEVES, D. A. **Sínteses e caracterização de nanoestruturas de óxido de zinco produzidas via electrospinning**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.
- NEVES, W. L. A. **Apostila Materiais Elétricos**. UFCG, 2001.
- NIEMI, R. G.; MITCHELL, D. D. **A new silicone plastic protective coating for line hardware**. In: Electrical Insulation Conference, 1968 8th. IEEE, 1968. p. 162-165.
- NÓBREGA, R. B. **Avaliação de uma Nova Carga na Composição de Revestimentos Externos Aplicados em Isoladores de Alta Tensão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
- OLIVEIRA, L. R. **Modelagem bidimensional de hidrofobicidade e superhidrofobicidade em superfícies de pilares**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2010.
- PIZZOLATTI, G.M. **Textos Curriculares de Análise Orgânica**. Departamento de Química – UFSC, p. 104-144, 2011.
- PRADEEP, M. A.; VASUDEV, N.; REDDY, P. V.; KHASTGIR, D. **Effect of ATH content on electrical and aging properties of EVA and silicone rubber blends for high voltage insulator compound**. Journal of applied polymer science, v. 104, n. 6, p. 3505-3516, 2007.
- RABELLO, M. S. **Aditivação de polímeros**. Artliber, 2000.
- RIOS, A. S. **Estudo do envelhecimento acelerado de materiais compósitos revestidos com poliuretano aplicados em aerogeradores**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2012.
- RODRIGUES, D. C. **Influência de amido de mandioca e cera de carnaúba sobre as propriedades físicas de filme à base de goma de cajueiro**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, 2012.
- SALA, O. **Fundamentos da Espectroscopia Raman e no Infravermelho**, Unesp, 2ª ed, 276 pp, 1996.
- SALAMA, M. M. A.; SALLAM, M. M. **A Mathematical Model for Tracking Time Calculation for Polymeric Materials**. Electrical Insulation, Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on. IEEE. [S.l.]. 1992.
- SANTOS, S. F. **Análise de filmes poliméricos densos de AcC/PHAmcl por técnicas de DSC, DMA, XPS, Ângulo de Contato e AFM**. Dissertação. Mestrado em Física, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.
- SARON, C. **Estudo da degradação térmica e fotoquímica das blendas PPO/HIPS**. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas, 2001.
- SEDIVER CATALOGUE. **Sediver toughened glass suspension insulators catalog**. ANSI - USA 2008.

- SEYEDMEHDI, S. A.; ZHANG, H.; ZHU, J. **Superhydrophobic RTV silicone rubber insulator coatings**. Applied Surface Science, v. 258, n. 7, p. 2972-2976, 2012.
- SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X., KIEMLE; D. J. **Spectrometric identification of organic compounds**. John Wiley & Sons, 2005.
- SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of instrumental analysis**. Cengage Learning, 2017.
- SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. McGraw Hill Brasil, 2013.
- SYAKUR, A. et al. **Hydrophobic Contact Angle and Surface Degradation of Epoxy Resin Compound with Silicon Rubber and Silica**. Electrical and Electronic Engineering, v. 2, n. 5, p. 284-291, 2012.
- TEPSILA, S.; SUKSRI, A. **Silicone rubber insulator using organic filler from golden apple snail shells**. Journal of Fundamental and Applied Sciences, v. 10, n. 3S, p. 785-792, 2018.
- WANG, Z.; TARIQ NAZIR, M.; PHUNG, B. T. **Effect of Micro-Sized Filler Loading on Surface Erosion of Silicone Rubber Composite Insulators**. 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017.
- WANG, Z., ZHANG, X., WANG, F., LAN, X., & ZHOU, Y. **Effects of aging on the structural, mechanical, and thermal properties of the silicone rubber current transformer insulation bushing for a 500 kV substation**. SpringerPlus, v. 5, n. 1, p. 790, 2016.
- WISDOM SCHOOL. **Partes de un microscopio electrónico de barrido**. Disponível em: [http://www.educa.madrid.org/web/cc.nsdelasabiduria.madrid/Ejercicios/Tema2\\_1b/SEM.htm](http://www.educa.madrid.org/web/cc.nsdelasabiduria.madrid/Ejercicios/Tema2_1b/SEM.htm). Acesso em: Outubro de 2016.
- YOSHIMITSU, Z., NAKAJIMA, A., WATANABE, T., & HASHIMOTO, K. **Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets**. Langmuir, v. 18, n. 15, p. 5818-5822, 2002.
- YOUNG, Thomas. **An essay on the cohesion of fluids**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, p. 65-87, 1805.
- YUAN, Y LEE, T. Randall. **Contact angle and wetting properties**. In: Surface science techniques. Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 3-34.
- ZHENG, F; HE, C. Q.; FANG, P. F.; WANG, J. G.; XIONG, B. Y.; WANG, K.; WANG, S. J. **The surface structure of UV exposed poly-dimethylsiloxane (PDMS) insulator studied by slow positron beam**. Applied Surface Science, v. 283, p. 327-331, 2013.
- ZISMAN, W. A. **Influence of constitution on adhesion**. Pages 33-71 in Handbook of Adhesives. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1976.