



Universidade Federal
de Campina Grande

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

RAPHAEL BORGES DA NÓBREGA

**AVALIAÇÃO DE UMA NOVA CARGA NA COMPOSIÇÃO DE
REVESTIMENTOS EXTERNOS APLICADOS EM ISOLADORES
DE ALTA TENSÃO**

Campina Grande, Paraíba.
Fevereiro de 2016

RAPHAEL BORGES DA NÓBREGA

AVALIAÇÃO DE UMA NOVA CARGA NA COMPOSIÇÃO DE
REVESTIMENTOS EXTERNOS APLICADOS EM ISOLADORES
DE ALTA TENSÃO

*Dissertação submetida à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Mestre em Ciências
no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Processamento de Energia.

Orientador:
Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba.
Fevereiro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

N754a Nóbrega, Raphael Borges da.
Avaliação de uma nova carga na composição de revestimentos externos aplicados em isoladores de alta tensão / Raphael Borges da Nóbrega. – Campina Grande, 2016.
79 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Engenharia Elétrica e Informática.
"Orientação: Prof. D. Sc. Edson Guedes da Costa".
Referências.

1 Isoladores. 2. Revestimentos. 3. Borracha de Silicone. 4. Alumina Tri-Hidrata. 5. Constante Dielétrica. I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU 621.315.6(043)

**"AVALIAÇÃO DE UMA NOVA CARGA NA COMPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS
EXTERNOS APLICADOS EM ISOLADORES DE ALTA TENSÃO"**

RAPHAEL BORGES DA NÓBREGA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/02/2016



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



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



TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



ANDRÉ DANTAS GERMANO, Dr., UFCG
Examinador(a)



ANA CRISTINA FIGUEIREDO DE MELO COSTA, , 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 a minha filha, Rafaelly, por toda motivação, paciência, amor e confiança.

Agradeço a minha irmã, Rayssa, ao meu cunhado, Artur, e ao meu sobrinho e afilhado, Felipe, 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 ao professor Edson Guedes pela orientação, incentivo e amizade.

Agradeço a Daniella por toda ajuda e suporte para o andamento desta pesquisa.

Agradeço a Lidja, Felipe Lucena e Hiago por toda a ajuda durante a realização dos ensaios em laboratório. Apesar dos horários, às vezes inconvenientes, não mediram esforços para ajudar.

Agradeço ao professor André Germano por toda a amizade e contribuição neste trabalho.

Agradeço aos técnicos do LAT por todo o suporte para a realização dos ensaios. Em especial a Igor, por toda a assistência na manutenção dos equipamentos e na montagem dos ensaios.

Agradeço aos meus companheiros de sala Luiz Augusto, Valdemir, Gabriel Vidal e Pablo por toda a amizade, ajuda e motivação para a conclusão desta etapa da pesquisa.

Agradeço a todos os meus colegas do LAT pelo companheirismo e pelas inúmeras contribuições para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) pela infraestrutura concedida para o preparo das amostras utilizadas neste trabalho.

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

*“Nas grandes batalhas da vida
o primeiro passo para a vitória
é o desejo de vencer.”*

Mahatma Gandhi.

RESUMO

Neste trabalho foi avaliado o desempenho de revestimentos poliméricos aplicados a isoladores de vidro tipo suspensão. Os revestimentos foram compostos por borracha de silicone vulcanizável a temperatura ambiente acrescida de partículas de alumina tri-hidratada e de uma nova carga em diferentes proporções mássicas. A nova carga foi caracterizada eletricamente pela medição da sua constante dielétrica e tangente de perdas. Amostras de isoladores revestidos com as várias composições foram submetidas 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 constante dielétrica da nova carga foi aproximadamente 3,0 para várias frequências e a tangente de perdas tem sua ordem de grandeza em torno de 10^{-3} . A avaliação dos valores de pico da corrente de fuga evidenciou que a adição de baixas concentrações da nova carga a borracha de silicone proporcionou bons desempenhos ao isolamento. Análise da distorção harmônica total e da razão entre 3º e 5º harmônicos evidenciaram o envelhecimento das amostras durante o ensaio. O monitoramento da hidrofobicidade, após a realização do ensaio cíclico de névoa salina, indicou que os revestimentos apresentaram recuperação parcial ou total da hidrofobicidade. De forma geral, os melhores resultados foram verificados para os revestimentos que continham 5% em peso da nova carga.

Palavras-chave: Revestimentos, isoladores, borracha de silicone, alumina tri-hidratada, materiais alternativos, constante dielétrica, análise harmônica, hidrofobicidade.

ABSTRACT

In this research the performance of polymeric coatings applied to suspension glass insulator was evaluated. The coatings were composed of Silicone Rubber at Room Temperature Vulcanized added to alumina trihydrate and a new filler at different mass proportions. The new filler was electrically characterized by measuring of this dielectric constant and loss tangent. Insulators samples coated with various compositions were subjected to cyclic salt fog tests whose purpose was to degrade the insulation. The performance of the coatings was evaluated from leakage current measurements, harmonic analysis and monitoring recovery of hydrophobicity. The dielectric constant of the new filler was approximately 3,0 over wide frequency range and loss tangent around 10^{-3} . The evaluation of leakage current peak values showed that the addition of low concentrations of new filler to Silicone Rubber provided good performance isolation. Analysis of Total Harmonic Distortion and the ratio between 3rd and 5th harmonics showed the aging of samples during the test. Monitoring of hydrophobicity, after execution the cyclic salt fog test indicated that the coatings showed partial or total recovery of hydrophobicity. In general, the best results were obtained for the coatings that contained 5 wt% of the new filler.

Keywords: Coatings, insulators, silicone rubber, alumina trihydrate, alternative materials, dielectric constant, harmonic analysis, hydrophobicity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Isoladores. (a) Porcelana (b) Vidro (c) Polimérico.....	6
Figura 2 - Estrutura da cadeia a base de EPDM	10
Figura 3- Estrutura genérica da cadeia a base de PDMS.....	10
Figura 4- Tempo até a falha do revestimento de RTV-SIR em função do tamanho das partículas de ATH.....	13
Figura 5 – Capacitor de placas paralelas	14
Figura 6 – Variação da permissividade com a frequência para um dielétrico que apresenta todos os mecanismos de polarização.....	16
Figura 7 – Diagrama fasorial das correntes que circulam em um dielétrico	16
Figura 8 – Associação de capacitores em função da disposição do dielétrico. (a) Série (b) Paralelo	17
Figura 9 - Tensão superficial em um líquido.....	18
Figura 10- Ângulo de contato formado entre uma gota e uma superfície sólida.....	19
Figura 11- Classes de hidrofobicidade conforme o guia STRI	21
Figura 12 - Fotografia de Isoladores de suspensão da Sediver.....	37
Figura 13 - Isolador revestido.....	39
Figura 14 - Fluxograma da metodologia de obtenção dos compósitos de silicone com cargas de ATH e do novo material	40
Figura 15 – Esquema da ponte Schering TR-9701TELMES	41
Figura 16 – Capacitor de placas paralelas contendo a nova carga	42
Figura 17 – Medição da constante dielétrica em laboratório (a) Ponte Schering (b) Capacitor de placas paralelas.....	42
Figura 18 – Esquema da câmara de névoa salina – Vista frontal	43
Figura 19 – Esquema da câmara de névoa salina – Vista superior.....	44
Figura 20 – Fotografias da câmara de névoa: (a) Exterior (b) Interior.....	44
Figura 21 - Arranjo experimental utilizado no ensaio cíclico de névoa salina.....	45
Figura 22 – Fotografias: (a) Arranjo experimental utilizado no ensaio cíclico de névoa salina. (b) Sistema de aquisição de dados.....	46
Figura 23 – Configuração dos ciclos de aplicação da névoa.....	47
Figura 24- Arranjo utilizado para medição dos ângulos de contato	48

Figura 25 – Medição de ângulo de contato utilizando o software Image J	49
Figura 26 – Valores de constantes dielétricas medidas para o nylon em diferentes frequências.....	50
Figura 27 – Valores de constantes dielétricas medidas para a nova carga em diferentes frequências.....	51
Figura 28 – Sinais de tensão aplicada e corrente de fuga para duas amostras após a aplicação da névoa durante o primeiro ciclo do ensaio (a) Sem revestimento (b) S80/A0/N20.....	52
Figura 29 – Sinais de tensão aplicada e corrente de fuga filtrados para duas amostras após a aplicação da névoa durante o primeiro ciclo do ensaio (a) Sem revestimento (b) S80/A0/N20.....	53
Figura 30 – Valores de corrente de fuga obtidos em diferentes momentos durante o ensaio cíclico de névoa salina para amostras sem revestimento (vermelho) e com revestimento S80/A0/N20 (azul).....	55
Figura 31 – Valores de corrente de fuga obtidos em diferentes momentos durante o ensaio cíclico de névoa salina para as amostras com revestimento.....	56
Figura 32 – Valores de corrente de fuga obtidos em diferentes momentos durante o ensaio cíclico de névoa salina para o revestimento S75/A20/N5 e revestimentos presentes na literatura.....	57
Figura 33 – Forma de onda da corrente (a) e componentes harmônicas (b) para o isolador com revestimento S90/A0/N10 durante o período seco do ensaio cíclico de névoa salina.....	61
Figura 34 – Forma de onda da corrente (a) e componentes harmônicas (b) para o isolador com revestimento S90/A0/N10 sob condições de névoa salina.....	62
Figura 35 – DHT para os revestimentos, sob névoa salina, durante o primeiro e o quinto ciclo do ensaio.....	62
Figura 36 – Razão entre componentes de 3º e 5º harmônicos para os revestimentos, sob névoa salina, durante o primeiro e o quinto ciclo do ensaio.....	63
Figura 37 – Variação da razão de 3º e 5º harmônicas para o primeiro e o quinto ciclo .	64
Figura 38 – Medição dos ângulos de contato dos revestimentos estudados.....	67
Figura 39 - Gotas de água em contato com o revestimento S95/A0/N5 antes da realização do ensaio cíclico de névoa salina. (a) Fotografia obtida. (b) Ângulo de contato para uma das gotas.....	69

Figura 40 – Gotas de água em contato com o revestimento S95/A0/N5 imediatamente após a realização do ensaio cíclico de névoa salina. (a) Fotografia obtida. (b) Ângulo de contato para uma das gotas 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Elastômeros empregados no revestimento externo até meados da década de 80	9
Tabela 2- Energia necessária para romper as ligações químicas das cadeias de PDMS	11
Tabela 3 – Constante dielétrica de alguns materiais.....	15
Tabela 4 – Tabela de análise de variância de um experimento com delineamento DBC25	
Tabela 5- Resumo das contribuições das pesquisas e cargas típicas utilizadas na RTV-SIR	33
Tabela 6 – Propriedades da borracha de silicone RTV 615	35
Tabela 7 – Tempo de cura aproximado da RTV 615	36
Tabela 8 – Especificações da ATH utilizada.....	36
Tabela 9 – Especificações técnicas do isolador de vidro utilizado.....	37
Tabela 10- Percentual de concentração mássica para cada revestimento investigado ...	38
Tabela 11 – Valores de pico das correntes de fuga medidos em diferentes instantes de tempo para cada ciclo do ensaio	54
Tabela 12 – Tabela de fatores de dupla entrada (revestimento e ciclos) a partir de medições da corrente de fuga obtidas no ensaio cíclico de névoa salina	59
Tabela 13 – ANOVA para valores de corrente de fuga.....	59
Tabela 14 – Teste de Tukey para os revestimentos estudados	60
Tabela 15 – Resultados da classificação da hidrofobicidade para os isoladores revestidos	65

LISTA DE ABREVIATURAS

ANOVA	–	Analysis of Variance (Análise de Variância)
ANSI	–	American National Standards Institute
ATH	–	Alumina Tri-hidratada
CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Contínua
CE	–	Cycloaliphatic Epoxy (Epóxi Cicloalifático)
DBC	–	Delineamento em Blocos Casualizado
DHT	–	Distorção Harmônica Total
DIC	–	Delineamento Inteiramente Casualizado
EPDM	–	Ethylene Propylene Diene Monomer (Monômero de Etileno Dieno Propileno)
EPM	–	Ethylene Propylene Monomer (Monômero de Etileno Propileno)
EPR	–	Ethylene Propylene Rubber (Borracha de Etileno Propileno)
GL	–	Grau de Liberdade
HTV	–	High Temperature Vulcanization (Vulcanização em Alta Temperatura)
IEC	–	International Electrotechnical Commission
IPT	–	Inclined Plane Testing (Teste de Plano Inclinado)
LSR	–	Liquid Silicone Rubber (Borracha de Silicone Líquida)
MDH	–	Magnesium hydroxide (Hidróxido de Magnésio)
MEV	–	Microscopia Eletrônica de Varredura
MQ	–	Média dos Quadrados ou Quadrados Médios
PDMS	–	Polydimethylsiloxane (Polidimetilsiloxano)
RTV	–	Room Temperature Vulcanization (Vulcanização à Temperatura Ambiente)

- SIR – Silicone Rubber (Borracha de Silicone)
- SQ – Soma dos Quadrados
- STRI – Swedish Transmission Research Institute
- 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
- UV – Ultravioleta

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Delimitação do Tema.....	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivo.....	4
1.3	Estrutura do texto.....	4
2	Fundamentação Teórica	6
2.1	Isoladores Elétricos	6
2.2	Falhas em Isoladores	7
2.3	Revestimentos Utilizados no Isolamento Externo	8
2.4	Borracha de Silicone	10
2.5	Influência dos Aditivos no Revestimento Externo	12
2.6	Constante Dielétrica e Tangente de Perdas.....	14
2.7	Hidrofobicidade	18
2.8	Ensaio de Névoa Salina	21
2.9	Análise Harmônica.....	22
2.10	Análise Estatística.....	23
2.10.1	Teste F para Análise de Variância.....	24
2.10.2	Teste de Tukey.....	26
3	Revisão Bibliográfica.....	28
4	Metodologia	35
4.1	Material.....	35
4.1.1	Borracha de Silicone	35
4.1.2	Cargas	36
4.1.3	Isoladores de Vidro	37
4.2	Métodos.....	38

4.2.1	Preparação dos Revestimentos.....	38
4.2.2	Ensaios	40
4.2.2.1	Medição da Constante Dielétrica e Tangente de Perdas da Nova Carga..	40
4.2.2.2	Ensaio Cíclico de Névoa Salina.....	43
4.2.2.3	Hidrofobicidade	47
4.2.2.3.1	Método Spray	47
4.2.2.3.2	Método do Ângulo de Contato	48
5	Resultados e Análises	50
5.1	Constante Dielétrica da Nova Carga.....	50
5.2	Ensaio Cíclico de Névoa Salina.....	52
5.2.1	Análise Qualitativa dos Resultados do Ensaio Cíclico de Névoa Salina.....	53
5.2.2	Análise de Variância para a Corrente de Fuga.....	58
5.2.3	Avaliação das Componentes Harmônicas.....	61
5.3	Avaliação da Hidrofobicidade	64
5.3.1	Método Spray.....	64
5.3.2	Método do Ângulo de Contato.....	67
6	Considerações Finais, Conclusões e Trabalhos Futuros	71
6.1	Considerações finais	71
6.2	Conclusões	73
6.3	Trabalhos Futuros	74
	Referências	75
	Glossário.....	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Desde a descoberta da eletricidade até os dias atuais existe a preocupação de transmitir a energia elétrica entre os centros geradores e os centros consumidores com bons níveis de continuidade, confiabilidade e baixo custo.

A transmissão da energia elétrica é realizada basicamente por meio de condutores metálicos suspensos em torres conectados mediante o uso de isoladores elétricos. Eles devem possuir boas propriedades dielétricas e mecânicas. As propriedades dielétricas garantem o isolamento elétrico entre a torre e os condutores energizados; e as mecânicas provêm a sustentação mecânica dos condutores, em condições normais e anormais do sistema. Assim, o desempenho dos isoladores elétricos apresenta-se como um dos principais parâmetros associados à confiabilidade do sistema, tendo em vista a finalidade a qual se destinam.

Uma das principais causas de interrupção do fornecimento da energia elétrica, nas linhas transmissão e de distribuição, deve-se a falhas no isolamento. Em regiões sujeitas à poluição ou com atmosfera salina a incidência de falhas é mais acentuada. A deposição de partículas de poluição associada à presença de umidade reduz a resistência superficial do isolador, favorecendo o aumento da corrente de fuga, podendo provocar degradação na superfície e surgimento de uma descarga disruptiva fase-terra (*flashover*).

Diversas alternativas têm sido adotadas na manutenção do isolamento elétrico, principalmente quando inseridos em ambientes sujeitos a intempéries. Entre as soluções adotadas ao longo do tempo 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 isolantes na sua superfície. A limpeza dos isoladores se caracteriza pela retirada dos depósitos de poluição de sua superfície. A modificação no formato permite a utilização dos isoladores em ambientes e atmosferas mais críticas como, por exemplo, em regiões de altitude elevada ou altos índices 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 poliméricos aos isoladores tem proporcionado a redução da corrente de fuga, inibido a formação de camada de poluição, repulsão à umidade e, conseqüentemente, redução da probabilidade de ocorrência de *flashover*.

Das soluções apresentadas, a aplicação de revestimentos representa uma das alternativas mais viáveis e aplicáveis para os sistemas já instalados, com intervalos entre intervenções menos frequentes e podendo ser mais econômica.

Pelo exposto, necessita-se minimizar as perdas e aumentar a confiabilidade dos sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica. Logo, é imprescindível melhorar o desempenho dos isoladores, principalmente, quando os níveis de poluição e umidade são fatores preponderantes.

1.1 MOTIVAÇÃO

De maneira geral, os isoladores encontrados no sistema elétrico são classificados em poliméricos e cerâmicos, a depender do material dielétrico empregado na fabricação. Os primeiros são formados predominantemente por compostos orgânicos (plásticos, borrachas), enquanto os segundos são constituídos por materiais inorgânicos (vidro e porcelana).

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). Atualmente, materiais cerâmicos ainda são largamente utilizados no isolamento de diversos equipamentos do sistema elétrico, como buchas de transformadores, isoladores, para-raios, transformadores de potencial (TP e TPC) e transformadores de corrente (TC).

Os isoladores cerâmicos apresentam elevada rigidez dielétrica, resistência à degradação natural e são inertes à maioria dos produtos químicos. No entanto, o desempenho dos isoladores cerâmicos é comprometido quando inseridos em ambientes contendo alto nível de umidade e poluição. Nestes isoladores, o composto eletrolítico, formado pela água e partículas de poluição, tende a se espalhar na superfície, podendo formar películas condutivas e, conseqüentemente, intensificar a corrente de fuga e

formação de arcos elétricos. Em uma situação crítica, pode ocasionar o surgimento de um *flashover*, interrompendo a transmissão da energia elétrica.

Durante as últimas décadas, materiais alternativos têm emergido a fim de aumentar a resistência ao surgimento do *flashover*, a exemplo dos polímeros. Suas características hidrofóbicas evitam a formação de películas de água na superfície do isolador, atenuando os efeitos das descargas superficiais quando inseridos em ambientes contendo alto nível de umidade e poluição.

Isoladores poliméricos foram empregados em meados do século XX no sistema elétrico. Inicialmente sofreram grande resistência para serem introduzidos por se tratar de uma nova tecnologia e existirem dúvidas a respeito do seu desempenho. No entanto, hoje, os isoladores poliméricos são bastante utilizados no sistema elétrico (COSER, 2009).

A substituição dos isoladores cerâmicos pelos poliméricos representa uma possível solução para o problema das falhas ocasionadas por poluição e umidade no sistema elétrico. No entanto, a substituição indiscriminada ou geral, quando possível, apresenta custos elevados. Em outras situações, como chaves e invólucros (buchas) de equipamentos, a substituição pode ser inviável devido a razões técnicas (resistência mecânica, por exemplo). Além disso, as técnicas de diagnósticos aplicadas a isoladores cerâmicos são mais difundidas e confiáveis que as técnicas empregadas para isoladores poliméricos. Uma solução intermediária consiste na introdução de revestimentos poliméricos aos isolamentos cerâmicos, em que características como hidrofobicidade são acrescidas, permitindo explorar as vantagens de ambas as tecnologias.

Os revestimentos utilizados no isolamento externo são constituídos basicamente por um polímero base (como o silicone, por exemplo) ao qual normalmente são acrescidas algumas cargas no intuito de melhorar as propriedades do revestimento e reduzir o custo final do material. Dentre as cargas comumente empregadas, é possível citar a alumina tri-hidratada (ATH) e a sílica.

A busca por novos materiais e/ou novos procedimentos, que proporcionem melhor desempenho ao isolamento elétrico e reduzam os custos associados ao processo de fabricação ou manutenção, é um dos grandes objetivos de algumas empresas inseridas no mercado de energia elétrica.

Neste trabalho será investigado o desempenho de revestimentos contendo uma nova carga em sua composição. A carga introduzida é típica da região Nordeste do Brasil e, por ser um insumo local, visa reduzir custos relacionados à fabricação dos

revestimentos. Além disso, a carga possui características hidrofóbicas naturais, o que favorece sua aplicação. Assim, os revestimentos a serem estudados serão compostos por borracha de silicone (SIR), cargas micrométricas de alumina tri-hidratada (ATH) e a nova carga.

1.2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa consiste na avaliação do desempenho de revestimentos compostos por borracha de silicone (SIR), partículas micrométricas de alumina tri-hidratada (ATH) e uma nova carga, típica da região Nordeste do Brasil.

Como objetivos específicos foram estabelecidos:

- Avaliar o comportamento dielétrico da nova carga;
- Estudar o comportamento hidrofóbico de revestimentos de SIR no tempo;
- Investigar o desempenho de diversos revestimentos de SIR durante o ensaio de névoa salina a partir do monitoramento da corrente de fuga;
- Realizar análises harmônicas dos sinais de corrente de fuga para revestimentos de SIR durante o ensaio de névoa salina;
- Mostrar a viabilidade do emprego da nova carga na composição de revestimentos externos.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

No Capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica sobre isoladores elétricos, falhas em isoladores, borracha de silicone, influência dos aditivos na composição do revestimento, constante dielétrica, tangente de perdas, hidrofobicidade, ensaio de névoa salina, análise harmônica e ferramentas estatísticas utilizadas como apoio para justificar alguns resultados.

Em seguida, no Capítulo 3, será 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 será descrita a metodologia proposta, enfatizando os detalhes acerca do material utilizado e o método de mistura empregado no preparo dos revestimentos, procedimento para avaliação da hidrofobicidade, realização do ensaio cíclico de névoa salina e medição da constante dielétrica e da tangente de perdas da nova carga.

Posteriormente, no Capítulo 5 serão descritos os resultados obtidos, bem como as devidas considerações.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e contribuições, além de propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

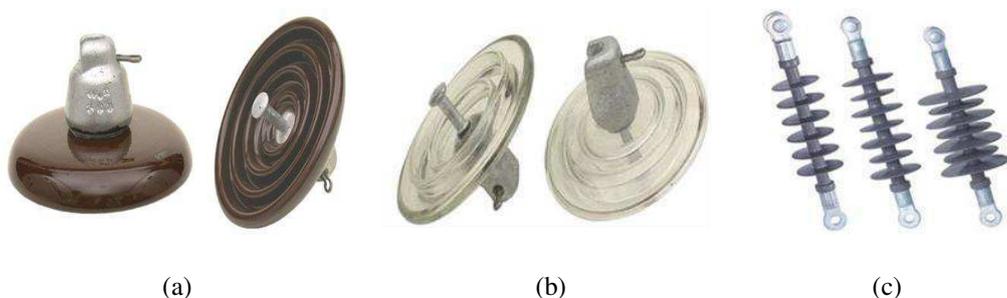
Neste capítulo será apresentada uma fundamentação teórica necessária para auxiliar o leitor no entendimento do tema proposto, fornecendo informações sobre isoladores elétricos, causas das falhas, borracha de silicone, influência dos aditivos na composição do revestimento, constante dielétrica, tangente de perdas, hidrofobicidade, ensaio de névoa salina, análise harmônica e ferramentas estatísticas utilizadas como apoio para justificar alguns resultados obtidos.

2.1 ISOLADORES ELÉTRICOS

Isoladores elétricos, em geral, são utilizados no sistema elétrico de potência com a finalidade de realizar o isolamento elétrico entre cabos energizados e sua estrutura de suporte. Além de ser um excelente isolante, este equipamento deve possuir boas características mecânicas a fim de suportar peso dos condutores e os esforços da tração, do vento, da temperatura, dos curto circuitos e das vibrações.

O isolador consiste em um sistema composto pelo material dielétrico, eletrodos terminais e partes internas que ajudam a conectar o dielétrico aos eletrodos, e pode ser classificado em basicamente três tipos quanto ao material dielétrico empregado na fabricação: porcelana, vidro ou polimérico. (GORUR *et al.*, 1999).

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



Fonte: Santa Terezinha (2002)

A porcelana e o vidro são materiais inorgânicos bastante utilizados ao longo dos anos e conhecidos por serem 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, devido à elevada energia superficial, a umidade tende a se espalhar ao longo da superfície ao invés de formar gotas isoladas, favorecendo o desenvolvimento de correntes de fuga. Além disso, são materiais densos e frágeis, necessitando de estruturas mais reforçadas para comportá-los, e estão mais susceptíveis a danos ocasionados pelo vandalismo (KIM *et al.*, 1992; GORUR *et al.*, 1999).

Os isoladores poliméricos são constituídos de materiais orgânicos, principalmente hidrocarbonetos, e possuem melhores características hidrofóbicas, são leves, menores e os custos associados são reduzidos quando comparados aos de porcelana e de vidro. No entanto, estão mais propensos à deterioração decorrente do aquecimento ocasionado por descargas elétricas, reações químicas e intempéries, que podem resultar em mudanças irreversíveis nas características elétricas e mecânicas ao longo do tempo (GORUR *et al.*, 1999).

2.2 FALHAS EM ISOLADORES

Uma das principais causas de interrupção no fornecimento de energia elétrica está relacionada às falhas no isolamento elétrico. O desempenho dos isoladores elétricos é de fundamental importância em termos de qualidade do serviço, segurança e confiabilidade do sistema (PRESSI, 2014).

Os defeitos em isoladores podem ser decorrentes dos processos de fabricação, envelhecimento, instalação, vandalismo, degradação biológica e condições ambientais como ação do vento e da chuva (GORUR, 1999). No entanto, um dos principais fatores responsáveis pelas falhas é a presença de contaminantes encontrados na atmosfera.

Os contaminantes presentes na atmosfera são diversos (sal, poeira, fertilizantes, fuligens) e com o passar do tempo podem se depositar na superfície do isolador. Em condições secas, os contaminantes não representam uma ameaça, pois não são condutores. No entanto, na presença da umidade do ar, podem ocasionar a formação de um composto eletrolítico, aumentando o fluxo de corrente na superfície do isolador e resultando na formação de áreas com alta densidade de corrente (FARZANEH & CHISHOLM, 2009; BRAINI, 2013).

A intensificação da corrente de fuga ocasiona o aquecimento local, resultando na formação de regiões secas (bandas secas) na superfície do isolador. A condutividade das bandas secas é muito menor que a condutividade da camada eletrolítica presente na superfície do isolador. A diferença de potencial entre as bandas secas torna-se elevada, ocasionando a formação de arcos elétricos na superfície do isolador. Assim, as bandas secas correspondem à causa fundamental do início do processo de falha do isolamento por contaminação (FARZANEH & CHISHOLM, 2009).

Se não ocorrer a remoção dos contaminantes da superfície do isolador, ao longo do tempo mais partículas irão ser depositadas e quando a umidade for suficientemente elevada, poderá ocorrer o surgimento de uma descarga disruptiva fase-terra em torno do isolador. Esta descarga é conhecida como *flashover* (SUWARNO & PRATOMOSIWI, 2009).

A utilização de isoladores elétricos com superfícies antipoluentes pode minimizar a probabilidade de ocorrência do fenômeno de *flashover*. Para esta finalidade são utilizados materiais orgânicos capazes de conferir propriedades hidrofóbicas à superfície dos isoladores, melhorando o desempenho elétrico e minimizando correntes de fuga sob condições normais de operação. A hidrofobicidade concedida aos isoladores impede a formação de películas de água, fazendo com que a água permaneça em gotas separadas umas das outras por áreas secas, dificultando a ocorrência da corrente de fuga, mesmo em níveis elevados de contaminação (LIEBERMANN, 2002).

2.3 REVESTIMENTOS UTILIZADOS NO ISOLAMENTO EXTERNO

Muitos revestimentos foram aplicados a isoladores cerâmicos com o objetivo de conferir propriedades hidrofóbicas a superfície e, conseqüentemente, melhorar seu desempenho em ambientes sujeitos a intempéries. Óleos, graxas, tintas e vernizes são exemplos de materiais aplicados ao revestimento externo. No entanto, preocupações sobre o desempenho do isolamento, durante longos períodos de tempo, limitaram o uso desses materiais.

A aplicação de óleos na superfície dos isoladores permite que a água seja repelida devido à força de atração entre moléculas ser pequena. Na década de 1920, isoladores cerâmicos foram projetados para áreas contaminadas contendo um reservatório de óleo. No entanto, aspectos estruturais dos isoladores e a facilidade de

remoção do óleo, provocadas pela ação dos ventos e chuva, inviabilizaram sua utilização (GORUR et al., 1995).

As graxas, assim como os óleos, possuem capacidade de repelir água e apresentam maior dificuldade de remoção quando submetidos a fatores ambientais como chuva e vento. As graxas a base de hidrocarbonetos foram inicialmente utilizadas devido ao baixo custo de aquisição. No entanto, elas funcionavam satisfatoriamente para uma estreita faixa de temperaturas com valores relativamente baixos (0 a 60°). O aquecimento elevado provocava o deslizamento da graxa, limitando sua utilização (KIM et al., 1992).

A busca por revestimentos mais duradouros e com propriedades elétricas que minimizem os problemas desencadeados por ambientes com elevados níveis de umidade e poluição incentivou o desenvolvimento e aplicação de elastômeros na proteção dos isoladores. Na Tabela 1 podem ser vistos os diversos elastômeros aplicados no revestimento externo até meados da década de 80.

Tabela 1- Elastômeros empregados no revestimento externo até meados da década de 80

Fabricante	País	Material	Ano
Ceraver	França	EPR ¹	1975
Ohio Brass	EUA	EPR	1976
Rosenthal	Alemanha	SIR ²	1976
Sediver	EUA	EPR	1977
Transmission Development	Inglaterra	CE ³	1977
Laap	EUA	EPR	1980
Reliable	EUA	SIR	1983

¹ EPR – Borracha a base de etileno propileno;

² SIR – Borracha a base de silicone;

³ CE – Borracha a base de epóxi cicloalifático.

Fonte: Hackam (1999)

Em meados de 1986, a Ohio Brass introduziu no mercado uma liga formada por monômero de etileno propileno (EPM) e SIR, mudando três anos após para um composto a base de monômero de etileno dienopropileno (EPDM) e SIR (GORUR et al., 1995). Quando aplicados em proporções ótimas, os compostos apresentam bom desempenho, possuindo as propriedades mecânicas dos EPDM juntamente com as excelentes características hidrofóbicas da SIR (ZHAO & BERNSTORF, 1998).

silicone pode ser atribuída a presença de ligações Si-O em sua estrutura química, que necessitam de maior energia para a ocorrência de quebra da ligação (MORTON, 1989). Na Tabela 2 é possível visualizar a energia necessária para romper as ligações químicas das cadeias de PDMS.

Tabela 2- Energia necessária para romper as ligações químicas das cadeias de PDMS

Ligação Química	Energia necessária (kJ/mol)
Si – O	445
C – H	414
C – O	360
C – C	348
Si – C	318
Si – H	318

Fonte: Gorur *et al.* (1999)

Compostos de borracha de silicone são altamente hidrofóbicos devido à presença de grupos metil na superfície do composto, que diminuem a energia de superfície desses materiais. No entanto, quando esses compostos estão sujeitos a condições severas de umidade, a superfície do elastômero pode perder gradualmente sua hidrofobicidade (KIM *et al.* 1992; COSER, 2009; ALMIRALL, 2013).

A borracha de silicone possui uma propriedade que a torna diferenciada com relação aos outros polímeros, que consiste na capacidade de se recuperar da perda de hidrofobicidade. A recuperação da hidrofobicidade está relacionada à difusão dos grupos metil que apresentam baixo peso molecular. Quando em condições severas de umidade, ocorre um processo de reorientação das moléculas causado pelo surgimento de uma interface de alta energia criada pela água. Em um posterior período seco, ocorre o processo inverso e a borracha de silicone recupera, gradativamente, sua hidrofobicidade. Esta propriedade proporciona maior resistência ao desenvolvimento de correntes de fuga, bandas secas e *flashover*, influenciando positivamente no desempenho do isolador em condições de poluição (MEYER, 2003; ALMIRALL, 2013).

As borrachas de silicone (SIR) possuem três tipos comumente encontrados no dia a dia: vulcanizadas a temperatura ambiente (RTV), vulcanizadas a altas temperaturas (HTV) e borracha de silicone líquida (LSR). A vulcanização consiste na alteração da estrutura química da borracha através de um processo de reticulação em que cadeias poliméricas lineares produzem polímeros tridimensionais com alta massa molar, tornando a estrutura do polímero mais rígida e conferindo propriedades elásticas ao material (COSER, 2009).

A utilização de revestimentos poliméricos a base de RTV-SIR em isoladores cerâmicos vem apresentando bom desempenho em condições de intensa umidade e poluição (CHERNEY *et al.*, 1991; CHERNEY & GORUR, 1999; SIDERAKIS, 2008; SUWARNO & PRATOMOSIWI, 2009).

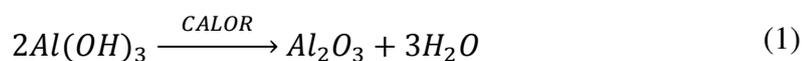
2.5 INFLUÊNCIA DOS ADITIVOS NO REVESTIMENTO EXTERNO

A utilização de cargas é muito importante para obtenção de características específicas nas formulações da borracha de silicone. Além de proporcionar maior rigidez e melhor comportamento elétrico, elas reduzem o custo final do material por apresentarem menor custo que o polímero base (MEYER, 2003). Para proporcionar maior resistência ao trilhamento elétrico e à erosão do material, muitos revestimentos fazem uso de alumina tri-hidratada (ATH) ou sílica (vidro ou quartzo em pó), ou até uma combinação de ambas (ALMIRALL, 2013).

A adição de sílica proporciona maior resistência, dureza e tenacidade à borracha de silicone e, devido à sua afinidade molecular com a matriz polimérica do silicone, proporciona uma maior resistência ao trilhamento elétrico e a erosão (MEYER, 2003). A ATH, por outro lado, não possui boa afinidade molecular com a matriz polimérica do silicone, quando comparado à sílica. Para proporcionar a união química entre as cargas orgânica e inorgânica é necessário realizar um tratamento de superfície, chamado de silanização.

A alumina tri-hidratada (ATH) é um produto inorgânico de origem sintética, com elevada pureza e grande consistência físico-química. A ATH é incorporada aos compostos poliméricos como um material de enchimento, retardante de chama e supressor de fumaça. Desta forma, o acréscimo de ATH ao composto fornece uma melhor condutividade térmica em relação à sílica (SIDERAKIS *et al.*, 2008).

O efeito retardante de chama conferido pela ATH deve-se principalmente à reação endotérmica, em que para um aumento da temperatura na superfície superior a 220°C implica na decomposição da ATH em alumina e água na forma de vapor, conforme mostrado na Equação (1).

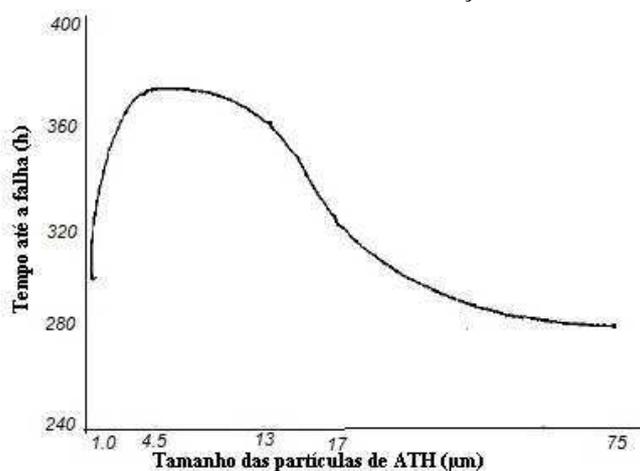


A partir da Equação (1), a água liberada na reação endotérmica elimina o calor necessário para reação da pirólise do polímero, reduzindo a formação de gases combustíveis, como o monóxido de carbono. Já o óxido de alumínio resultante age como uma camada protetora na superfície da matriz polimérica, reduzindo a difusão do oxigênio para o meio reativo, o que dificulta a troca de calor e, portanto, a propagação do fogo (ALCOA, 2015).

Além dos aditivos, podem ser adicionados corantes, agentes de reticulação e promotores de adesão à borracha. Na mistura dos componentes, muitas vezes são utilizados solventes, cuja única função é atuar como meio portador para que a RTV-SIR possa ser aplicada na superfície do isolador. Após a aplicação, o solvente evapora e a RTV-SIR vulcaniza na temperatura ambiente. Logo, o tipo de solvente, o agente de cura e a umidade do ar são fatores determinantes para o bom desempenho do revestimento (BRAINI, 2013).

A resistência à erosão e ao trilhamento elétrico nas borrachas de silicone não depende apenas do tipo de aditivo utilizado, mas também do processamento da mistura, quantidade e tamanho das partículas utilizadas (HACKAM, 1999). A utilização exagerada de aditivos na formulação do polímero pode aumentar a rugosidade superficial do material, levando a uma maior deposição de partículas de poluição e, conseqüentemente, uma redução no desempenho do revestimento (MEYER, 2003). Na Figura 4 é possível observar o tempo até a ocorrência da falha do revestimento RTV-SIR em função do tamanho das partículas de ATH.

Figura 4- Tempo até a falha do revestimento de RTV-SIR em função do tamanho das partículas de ATH



Fonte: Hackam (1999)

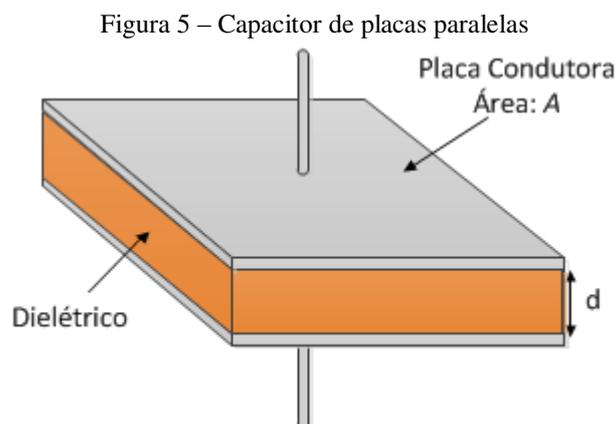
Verifica-se que a utilização de partículas de ATH com tamanho de $4,5 \mu\text{m}$ resulta em um maior tempo de vida da RTV-SIR. Com o aumento do tamanho das partículas de ATH, a superfície da RTV torna-se mais rugosa, provocando um aumento da corrente de fuga, maior perda de hidrofobicidade, intensificação das descargas e menor tempo de vida. Quando a partícula possui tamanho de $1 \mu\text{m}$, a falha ocorre devido à formação de grandes agregados discretamente localizados na superfície (DENG *et al.*, 1995 apud HACKAM, 1999).

2.6 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 (ΔV). A constante de proporcionalidade corresponde a capacitância (C), medida em *Farads* (F), e pode ser expressa conforme a Equação (2) (HALLIDAY, 2009):

$$Q = C \cdot \Delta V. \quad (2)$$

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 5.



Fonte: Adaptado de Halliday (2009)

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

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (3)$$

onde ϵ_r e ϵ_0 correspondem, respectivamente, as permissividades elétricas relativa e no vácuo. A permissividade relativa também é conhecida por constante dielétrica.

Na Tabela 3 é possível visualizar alguns materiais dielétricos e suas constantes dielétricas.

Tabela 3 – Constante dielétrica de alguns materiais

Material	Constante Dielétrica (ϵ_r)
Ar	1,00054
Nylon	3,7
Óleo de transformador	2,2
Papel	3,5
Poliestireno	2,6
Porcelana	6,5
Silício	12
Vácuo	1

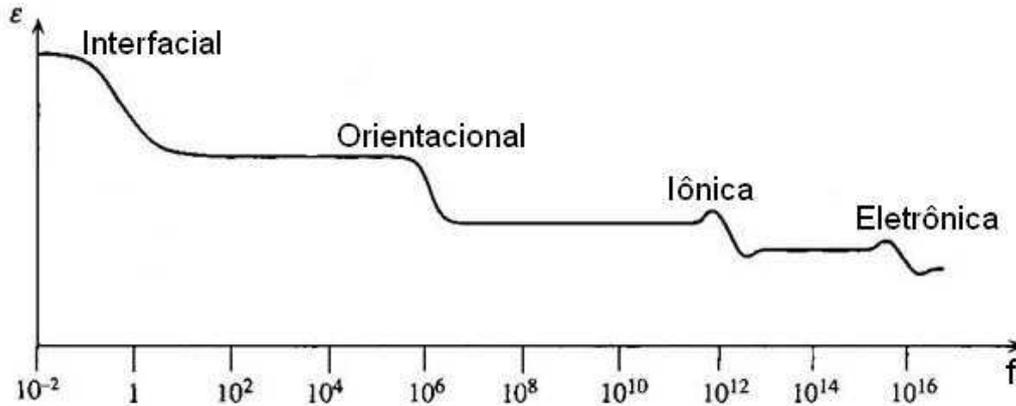
Fonte: Costa e Fernandes Jr. (2000)

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 encontrados em Kuffel *et al.* (2000), Neves (2001) e Mesa (2009).

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 6.

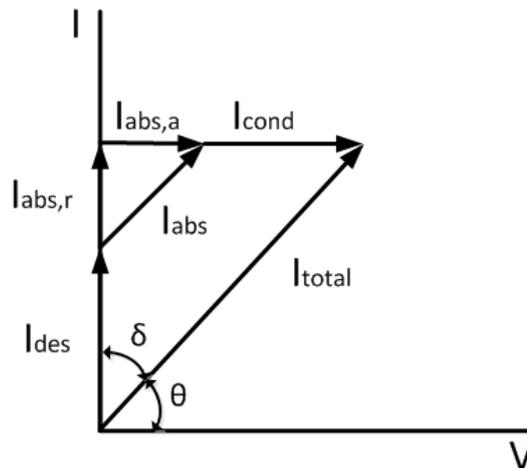
Figura 6 – Variação da permissividade com a frequência para um dielétrico que apresenta todos os mecanismos de polarização



Fonte: Adaptado de Neves (2001)

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 7.

Figura 7 – Diagrama fasorial das correntes que circulam em um dielétrico

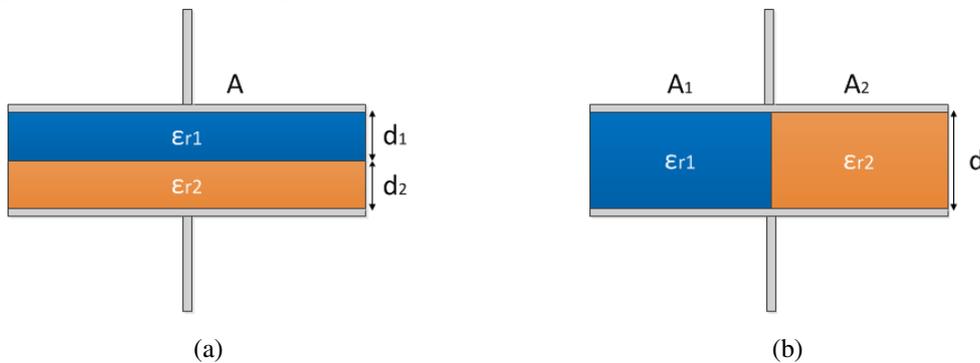


Fonte: Mesa (2009)

Na Figura 7, a corrente total resulta na formação de dois ângulos complementares, δ e θ , 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 ($\text{tg } \delta$), expressa pela razão entre as componentes ativa e reativa da corrente que circula no dielétrico.

Um dielétrico pode ser constituído por um ou mais dielétricos, resultando em um valor de constante dielétrica equivalente. A associação faz analogia a capacitores, em que cada dielétrico representa um capacitor. Assim, ao inserir múltiplos dielétricos entre as placas de um capacitor, a capacitância medida (equivalente) pode ser obtida a partir de associações série/paralelo de capacitores para cada dielétrico (a depender da disposição). Na Figura 8 é possível visualizar as associações série/paralelo de capacitores em função da disposição do dielétrico.

Figura 8 – Associação de capacitores em função da disposição do dielétrico. (a) Série (b) Paralelo



Fonte: Próprio autor

Para o capacitor da Figura 8 (a), a capacitância é expressa em função da associação série dos dois dielétricos entre as placas, conforme Equação (4).

$$C_{série} = \frac{1}{\frac{d_1}{\epsilon_{r1}\epsilon_0 A} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}\epsilon_0 A}} \quad (4)$$

Para o capacitor da Figura 8 (b), a capacitância é expressa em função da associação paralelo dos dois dielétricos entre as placas, conforme Equação (5).

$$C_{paralelo} = \frac{\epsilon_{r1}\epsilon_0 A_1}{d} + \frac{\epsilon_{r2}\epsilon_0 A_2}{d} \quad (5)$$

2.7 HIDROFOBICIDADE

A hidrofobicidade consiste na característica que alguns materiais naturalmente apresentam de repelir água. O conceito de hidrofobicidade está associado às propriedades de molhabilidade de uma superfície por água. Segundo Zisman (1976), molhabilidade é a habilidade de um líquido aderir em um sólido espalhando-se ao longo de sua superfície em diferentes graus, resultante das interações moleculares entre o líquido e a superfície.

A tensão superficial de um líquido é originada a partir das forças de atração entre as moléculas que o compõe. A força resultante das moléculas que se encontram na superfície do líquido apresenta comportamento diferente das moléculas que se encontram em seu interior. Cada molécula no volume é atraída igualmente em todas as direções pelas moléculas vizinhas do líquido, resultando em uma força resultante nula. No entanto, as moléculas localizadas na superfície não possuem moléculas vizinhas em todas as direções, sendo atraídas para o interior do volume pelas moléculas, resultando em uma força não nula e criando uma pressão interna. Conseqüentemente, ocorre a contração do líquido para manter o menor estado de energia livre na superfície, conforme mostrado na Figura 9 (FONTANELLA, 2007; YUAN & LEE, 2013).

Figura 9 - Tensão superficial em um líquido



Fonte: Yuan & Lee (2013)

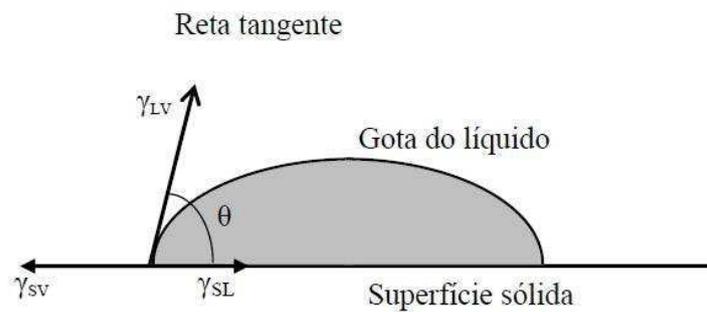
A presença de forças externas, como a gravidade e as forças associadas à interação das moléculas do líquido com as partículas que compõem uma superfície sólida, podem deformar a gota (YUAN & LEE, 2013). Na ausência de forças externas, essa força atrativa entre as moléculas faz com que o líquido coalesça em forma de uma gota esférica (SANTOS, 2005).

Quanto maior a proporção de grupos polares na molécula do líquido, maior a atração entre elas. Grandes forças de atração originam grandes tensões superficiais, fazendo com que o líquido forme pequenas gotas sobre a superfície ao invés de molhá-

la uniformemente. Além disso, uma superfície rica em ligações polares possui energia superficial maior que uma superfície com poucas dessas ligações. Logo, sendo a água um líquido polar, ao entrar em contato com uma região contendo alta energia superficial, ela tende a se espalhar ao invés de formar pequenas gotas (SANTOS, 2005).

Portanto, a energia da superfície a qual o líquido repousa influencia significativamente na tensão e energia superficiais resultantes do líquido. Uma maneira de quantificar esse comportamento é o uso da medição do ângulo de contato (YUAN & LEE, 2013). O ângulo de contato corresponde ao ângulo formado entre a interface líquido/vapor e a superfície do sólido onde a gota se encontra. O conceito do ângulo de contato é ilustrado na Figura 10.

Figura 10- Ângulo de contato formado entre uma gota e uma superfície sólida



Fonte: Fontanella (2007)

Os primeiros estudos descritos na literatura sobre ângulo de contato foram realizados por Thomas Young (1805). Este afirmou que o ângulo de uma gota líquida em uma superfície sólida ideal é definido a partir do equilíbrio termodinâmico da gota sob a ação das três tensões interfaciais. Logo, sua forma depende das energias envolvidas no sistema, conforme a Equação (6).

$$\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos \theta \quad (6)$$

em que

γ_{sv} – Tensão superficial sólido/vapor

γ_{sl} – Tensão superficial sólido/líquido

γ_{lv} – Tensão superficial líquido/vapor

θ – Ângulo de contato de Young

O ângulo de contato obtido por Young é baseado no equilíbrio de uma gota simétrica em uma superfície plana, horizontal, suave, homogênea e sólida, de modo que um único ângulo de contato é obtido. Na prática, existem muitos estados de equilíbrio

instável da gota presente em uma superfície sólida, sendo observados geralmente ângulos que não são iguais ao ângulo de contato de equilíbrio. Isso acontece porque os ângulos de contato de superfícies poliméricas são influenciados por outros fenômenos como rugosidade, heterogeneidade química, orientação molecular e solubilidade parcial do polímero, no caso de misturas poliméricas (SANTOS, 2005; YUAN & LEE, 2013).

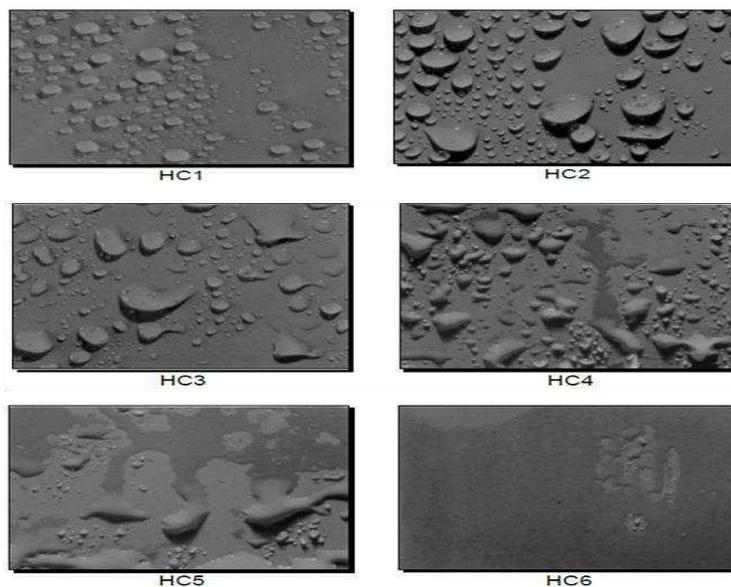
Na literatura não existe conformidade sobre um ângulo de contato mínimo que caracterize uma superfície como hidrofóbica. Valores de ângulo de contato variando entre 60° e 90° são utilizados como referência (VALCARCE *et al.*, 2002; SANTOS, 2005; YUAN & LEE, 2013).

Para avaliar a hidrofobicidade de materiais poliméricos, normalmente são utilizados três métodos: determinação da tensão superficial, medição do ângulo de contato e classificação dos níveis de hidrofobicidade por borrifamento de líquidos (*spray*). Neste trabalho serão utilizados os dois últimos métodos.

O procedimento para medição do ângulo de contato estático é baseado nas recomendações da IEC 62073 (2003). Nesta norma é sugerido que as amostras de ensaio sejam planas sempre que possível e de modo que permita a aplicação de pelo menos três gotas de água em áreas adjacentes separadas umas das outras. Recomenda-se utilizar água deionizada, de modo a evitar que impurezas afetem a tensão superficial. O volume da gota normalmente deve estar entre 5 e 50 µL, dependendo da rugosidade da superfície.

O método de borrifamento de líquidos, ou método *spray*, é geralmente utilizado para avaliar o nível de hidrofobicidade do material no local, devido sua praticidade. No entanto, sua análise é bastante subjetiva por parte do pesquisador. A classificação da hidrofobicidade utilizando o método *spray* é realizada, geralmente, utilizando-se o procedimento descrito no guia STRI (*Swedish Transmission Research Institute*). Neste guia a hidrofobicidade é classificada em sete classes (HC1 a HC7) em que a superfície HC1 corresponde à superfície mais hidrofóbica enquanto que a superfície HC7 corresponde a superfície completamente hidrofílica (STRI, 1992). Na Figura 11 são mostradas imagens das classes de hidrofobicidade (HC1 a HC6) contidas no guia. A imagem correspondente à classe HC7 não é disposta no guia STRI, mas corresponde a superfície completamente recoberta por uma película de água.

Figura 11- Classes de hidrofobicidade conforme o guia STRI



Fonte: Guide STRI (1992)

A classificação consiste basicamente na aplicação de uma névoa artificial na superfície do isolador revestido e posterior comparação dos padrões obtidos com as classes de hidrofobicidade contidas no guia. De acordo com o guia STRI (1992), a névoa é gerada utilizando apenas uma garrafa comum de borrifamento de líquidos. É recomendado que a água não possua substâncias químicas, como detergentes e solventes.

2.8 ENSAIO DE NÉVOA SALINA

O ensaio de névoa salina consiste em uma técnica de envelhecimento polimérico que expõe o polímero a uma atmosfera agressiva de NaCl, acelerando o processo corrosivo e podendo afetar o comportamento hidrofóbico do material (FONTANELLA, 2007). Assim, o ensaio de névoa salina é usado para avaliar o desempenho dos materiais poliméricos submetidos a intempéries em um curto período de tempo, podendo detectar revestimentos com propriedades inadequadas ou susceptíveis a falhas.

Normalmente, o ensaio de névoa salina é realizado em cabines na qual estão instalados, no seu interior, aspersores responsáveis pela geração da névoa. O sistema de aspersão é formado basicamente por uma conexão de ar comprimido de alta pressão e uma conexão de água, em que ao ocorrer a incidência do jato de ar com o de água

ocorre a formação da névoa. A água resultante da névoa é coletada em um recipiente que, por sua vez, é utilizada na realimentação do sistema de aspersores (IEC 60507, 1991; NBR 10621, 2005).

O envelhecimento por tensão elétrica é baseado nas normas NBR 6936, NBR 10621 e IEC 60507. Durante o ensaio de névoa salina, os isoladores devem ser submetidos a outros estresses de forma a reproduzir de forma mais fidedigna às condições ambientais. A adição de alta tensão durante o ensaio de névoa salina promove a geração de descargas superficiais, descargas parciais, formação de bandas secas, trilhamento elétrico, provocando assim a degradação do revestimento polimérico. A depender do equipamento e do fenômeno que se deseja avaliar, descargas *flashover* podem ser utilizadas na intensificação do envelhecimento (GERMANO, 2010).

Dentre os parâmetros avaliados durante o ensaio de névoa salina, a medição da corrente de fuga permite obter informações acerca do estado do isolamento. Uma elevada corrente de fuga indica presença de poluição, degradação do isolamento, ocorrência de descargas ou efeito da alta umidade. Além disso, análises de distorções harmônicas dos sinais de corrente e tensão têm se mostrado eficientes no diagnóstico de equipamentos instalados no sistema.

2.9 ANÁLISE HARMÔNICA

A análise das componentes harmônicas do sinal de corrente de fuga é bastante utilizada como ferramenta de diagnóstico para avaliação do estado do isolamento. Informações sobre o grau de envelhecimento do isolamento, influência da poluição e condições superficiais podem ser obtidas por meio da análise harmônica. A relação entre as componentes de 3° e 5° harmônicas e análise da distorção harmônica total tem sido extensivamente correlacionadas com as condições do isolamento (BASHIR & AHMAD, 2010; TOUSI & MIRZAIE, 2013).

As componentes harmônicas, responsáveis pela distorção dos sinais da corrente de fuga, podem ser analisadas matematicamente por meio da Transformada de Fourier. Esta técnica permite decompor qualquer função periódica não senoidal em componentes de diferentes frequências (ARRILLAGA & WATSON, 2003). Na Equação (7) é mostrado o cálculo da série de Fourier para uma função periódica $x(t)$.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nw_0 t) + b_n \sin(nw_0 t)] \quad (7)$$

sendo

- a_0 : Valor médio ou nível DC de $x(t)$;
- a_n e b_n : Coeficientes da série;
- n : Ordem harmônica de $x(t)$;
- w_0 : Frequência fundamental.

A avaliação da distorção harmônica total (DHT) é comumente utilizada para quantificar o efeito dos harmônicos no sistema de potência. Ela é expressa em termos da razão entre o valor eficaz das componentes harmônicas e a componente fundamental de tensão ou corrente, conforme a Equação (8),

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N M_n^2}}{M_1} \quad (8)$$

em que,

- M_n : Valor eficaz de corrente das componentes harmônicas de ordem n ;
- M_1 : Valor eficaz de tensão ou corrente fundamental.

2.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística é utilizada como uma ferramenta que permite auxiliar na tomada de decisões de uma população, com base na observação de amostras. Ela consiste, basicamente, em determinar se os resultados obtidos são devidos ao acaso ou a causas identificáveis.

Ao tomar decisões, é comum a formulação de hipóteses relativas às populações, com o objetivo de rejeitá-las ou invalidá-las. Em estatística, normalmente são formuladas as seguintes hipóteses (BANZATTO & KRONKA, 2006):

- Hipótese de nulidade (H_0) – Não existem diferenças entre as amostras comparadas, ou seja, a variância entre as amostras comparadas é nula;
- Hipótese alternativa (H_1) – Existem diferenças significativas entre as amostras comparadas, ou seja, a variância entre as amostras comparadas não é nula.

Decidir aceitar ou rejeitar uma determinada hipótese estatística pode resultar na ocorrência dos seguintes erros (BANZATTO & KRONKA, 2006):

- Erro tipo I: Rejeitar uma hipótese verdadeira, que deveria ser aceita;
- Erro tipo II: Aceitar uma hipótese falsa, que deveria ser rejeitada.

Testes de hipóteses ou testes de significância são utilizados de forma a auxiliar na tomada de decisão. A confiabilidade da escolha está associada ao nível de significância do teste (α), que consiste na probabilidade máxima de cometer um erro do tipo I. Na prática, níveis de significância de 1% e 5% são mais utilizados. O grau de confiança do teste, que expressa a confiança de ter tomado a decisão correta de escolha, é representado por $1-\alpha$ (em porcentagem).

Para realização da análise estatística é imprescindível a adoção de um delineamento (planejamento) experimental adequado. O delineamento é responsável pelo controle do erro, isolando as principais fontes de variação, e identifica os tratamentos relevantes durante a análise estatística (DUARTE, 1996). Tratamento consiste no efeito do método, elemento ou material que se deseja medir ou comparar em um experimento. Como exemplos de delineamentos experimentais, é possível citar: delineamento inteiramente casualizado (DIC), delineamento em blocos casualizados (DBC), delineamento em quadrados latino, entre outros.

A utilização do delineamento em blocos casualizados permite comparar adequadamente os tratamentos, mesmo que as unidades experimentais apresentem certa heterogeneidade. No delineamento, as unidades experimentais são subdivididas em grupos homogêneos (chamados de blocos), de modo que o número de unidades em um bloco seja igual ao número de tratamentos estudado. Os tratamentos são designados ao acaso às unidades experimentais dentro de cada bloco (DUARTE, 1996; BANZATTO & KRONKA, 2006).

2.10.1 TESTE F PARA ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Análise de Variância (ANOVA) é um método estatístico utilizado para investigar se existem diferenças significativas entre as médias de duas ou mais populações. O processo é baseado na decomposição da variação total, existente entre uma série de observações, em duas partes: fatores controlados e não controlados. Os fatores controlados estão relacionados às causas conhecidas e independentes, enquanto

os fatores não controlados estão associados à porção residual de origem desconhecida e natureza aleatória (DUARTE, 1996; BANZATTO & KRONKA, 2006).

As medições de variância são confrontadas por meio de um teste de hipótese (teste F) em que é avaliada sua significância. Na análise de variância, as estimativas são dadas em função dos quadrados médios (MQ) para cada fonte de variação. Ao aplicar o teste F, valores de F (ou valores de Fisher) são determinados mediante a razão entre os quadrados médios devido aos efeitos dos fatores controlados (tratamentos e blocos) e não controlados (resíduos) (BANZATTO & KRONKA, 2006).

Os valores de F calculados (F_{calc}) são comparados a valores limites, obtidos em tabelas de distribuição de F (F_{tab}), e determinados em função do nível de significância e do número de graus de liberdade dos fatores controlados e não controlados. O valor de F_{tab} indica o valor máximo que F_{calc} poderá assumir devido apenas a flutuações amostrais. Assim, se:

- $F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$: O teste é significativo ao nível α e, assim, deve-se rejeitar a hipótese H_0 . Logo, as diferenças verificadas não devem ser atribuídas ao acaso.
- $F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$: O teste não é significativo ao nível α e, assim, não se deve rejeitar a hipótese H_0 . Neste caso, as diferenças verificadas podem ser atribuídas ao acaso.

Na Tabela 4 é apresentado um modelo de análise de variância para um experimento com delineamento em blocos casualizados.

Tabela 4 – Tabela de análise de variância de um experimento com delineamento DBC

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-p	F crítico
Tratamento	SQtrat	(t-1)	$\frac{SQ_{\text{trat}}}{(t-1)}$	$\frac{MQ_{\text{trat}}}{MQ_{\text{res}}}$	-----	$F_{\text{tab}}(g_{\text{trat}}, g_{\text{res}})$
Blocos	SQbloc	(b-1)	$\frac{SQ_{\text{bloc}}}{(b-1)}$	$\frac{MQ_{\text{bloc}}}{MQ_{\text{res}}}$	-----	$F_{\text{tab}}(g_{\text{bloc}}, g_{\text{res}})$
Resíduo	SQres	(t-1)(b-1)	$\frac{SQ_{\text{res}}}{(t-1)(b-1)}$			
Total	SQtotal	(n-1)				

Fonte: Adaptado de Duarte (1996)

em que,

t: número de tratamentos;

b: número de blocos;

n: número total de amostras;

SQ: Soma dos quadrados dos desvios calculados para cada fonte de variação;

gl: grau de liberdade para cada fonte de variação;

MQ: Quadrados médios;

F: Valor estatístico de Fisher;

valor-p: Probabilidade de significância. Consiste em outra forma de tomar decisões a partir do nível de significância. Valor-p menor que o nível de significância indica que se deve rejeitar H_0 .

A utilização do teste F na análise de variância permite apenas identificar a existência de efeitos diferentes sobre as variáveis analisadas. No entanto, não permite identificar quais os melhores ou piores tratamentos. Para isso, são utilizados testes de comparações de médias. Dentre os testes, pode-se destacar: t de Student, Tukey, Duncan, Student-Newman-Keuls, entre outros.

2.10.2 TESTE DE TUKEY

O teste de Tukey é um dos testes mais utilizados para comparações das médias de um experimento. Por ser um teste rigoroso, normalmente, é aplicado ao nível de significância de 5% (BANZATTO & KRONKA, 2006). O teste consiste em definir a menor diferença significativa (Δ), conforme a Equação (9):

$$\Delta = q(k, gl_{res}) \cdot \sqrt{\frac{QM_{res}}{r}}. \quad (9)$$

sendo:

q – é a amplitude total estudentizada, encontrada em tabelas. É determinado em função do número de tratamentos (k) e do número de graus de liberdade do resíduo (gl_{res});

r – número de repetições utilizadas para calcular as médias.

Em seguida, o cálculo das estimativas dos contrastes de duas médias mediante as estimativas médias dos tratamentos deve ser realizado. Os valores obtidos, em módulo, devem ser comparados com a diferença Δ . Rejeita-se a igualdade da média de dois tratamentos (i e j) se:

$$|m_i - m_j| > \Delta. \quad (10)$$

Neste capítulo foi apresentada uma fundamentação teórica contendo informações sobre isoladores elétricos, revestimentos aplicados ao isolamento externo, avaliação de parâmetros físico-químicos e elétricos, ensaios de envelhecimento acelerado, análise harmônica e ferramentas estatísticas a serem utilizadas como auxílio na interpretação dos resultados. No próximo capítulo será realizado um levantamento bibliográfico a respeito dos principais estudos na área do trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as principais contribuições das pesquisas e estudos de casos reportados na literatura que abordam a utilização da RTV-SIR no isolamento externo de equipamentos de alta tensão, além da influência das cargas na composição do polímero. A seguir, são apresentadas de forma cronológica contribuições relevantes para o delineamento deste trabalho.

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 resultados mostraram que a corrente de fuga nos isoladores tende a diminuir com o aumento da quantidade de partículas de ATH para longos períodos de tempo submetidos à névoa salina e descargas de bandas secas. 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 perda de hidrofobicidade que amostras sujeitas apenas a névoa salina.

Deng *et al.* (1995) realizaram um estudo da influência do tamanho das partículas de ATH no tempo de vida de revestimentos a base de RTV-SIR submetidos a ensaio de névoa salina. Os autores observaram que o tamanho das partículas de ATH afeta na rugosidade da superfície e que o revestimento geralmente apresenta maior tempo de vida à medida que o tamanho das partículas diminui, exceto para partículas muito pequenas devido a problemas de dispersão. Os resultados indicaram que o melhor desempenho foi verificado para partículas de ATH com tamanho de 4,5 μm considerando valores de corrente de fuga, contagem de pulsos de corrente e tempo de exposição até a ocorrência de falhas. Além disso, os autores ressaltaram que a amplitude da corrente de fuga determina o volume de silicone na superfície e conseqüentemente uma recuperação mais rápida da hidrofobicidade.

Meyer *et al.* (2002) analisaram a influência do tamanho das partículas e concentração de cargas usadas em compostos de borracha de silicone para o isolamento elétrico, para tanto, foram utilizadas como cargas partículas de ATH e sílica com tamanhos médios de 5 e 10 μm em concentrações de 10, 30 e 50% do peso da mistura

com RTV-SIR. Os resultados indicaram que o aumento das concentrações de carga (ATH ou sílica), proporcionou maior resistência à erosão e ao trilhamento elétrico para ambos os tamanhos de partículas.

Venkatesulu e Thomas (2008) realizaram um estudo da resistência à erosão e ao trilhamento elétrico de nanocargas de hidróxido de magnésio (MDH) e microcargas de ATH, como cargas retardantes de chama na composição da RTV-SIR. Ambas foram utilizadas em baixas concentrações (5% do peso) e os resultados demonstraram que a amostra composta por MDH possuiu melhor desempenho que a ATH em termos de massa erodida. Contudo, normalmente a ATH é utilizada em altas concentrações na composição de revestimentos poliméricos a fim de se obter desempenhos satisfatórios. Assim, seria necessário realizar um estudo comparativo utilizando altas concentrações da ATH na RTV-SIR.

Suwarno e Pratomosiwi (2009) analisaram o desempenho de isoladores cerâmicos revestidos com RTV-SIR sob ensaio de poluição artificial. Foram analisados o comportamento da corrente de fuga para diferentes níveis de tensão, a hidrofobicidade e a microestrutura da superfície. Os autores constataram que a RTV-SIR reduziu a magnitude da corrente de fuga dos isoladores e manteve sua hidrofobicidade quando sujeitos a diversas condições de poluição. No entanto, não foi mencionado o comportamento das amostras após longos períodos de atividade elétrica.

Venkatesulu e Thomas (2010) promoveram um estudo comparativo da resistência à erosão de nanocompósitos de RTV-SIR com baixa concentração de nano alumina (2,5% e 4% em peso) e microcompósitos de ATH com alta concentração (5%, 10%, 15%, 20% e 30% em peso). A partir dos resultados obtidos, os autores afirmaram que o desempenho do compósito com 4% de nano alumina foi equivalente ao microcompósito com 30% de ATH, devido à distribuição das cargas. Além disso, eles reforçam a idéia que nanopartículas possuem maior interação com o polímero, desempenhando papel fundamental no processo de erosão da amostra. Foi comentado ainda pelos autores que a utilização de menores cargas podem proporcionar maior flexibilidade, facilidade de processamento do produto e ao mesmo tempo maior desempenho elétrico.

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 foi mencionado no trabalho informações a respeito da corrente de fuga para análise de redução de gelo, além do comportamento da amostra durante ausência do gelo.

Seyedmehdi *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, apresentaram bom desempenho quando exposto a UV, imersão em água e ensaio de trilhamento elétrico e erosão.

Madidi *et al.* (2013) avaliaram as propriedades dielétricas da RTV-SIR contendo diferentes concentrações de nanocargas de TiO_2 (0%, 2%, 5%, 10% e 20% em peso). O surfactante Triton X-100 foi utilizado para melhorar a dispersão das nanocargas. Análises morfológicas e medições da permissividade relativa foram realizadas. Segundo os autores, o surfactante proporcionou melhor dispersão das nanocargas. A introdução de nanocargas de TiO_2 proporcionou aumento da permissividade do compósito polimérico, com maior permissividade relativa verificada para a concentração de 20% da nanocarga. Eles concluíram que o aumento da concentração da nanocarga na RTV-SIR aumentou a permissividade elétrica. No entanto, não foram apresentadas análises para frequências superiores a 165 Hz para a parte real da permissividade relativa.

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.

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.

Tariq Nazir *et al.* (2015) investigaram a influência da nanosílica, em diferentes concentrações (0%, 1%, 3%, e 5% em peso), nas propriedades hidrofóbicas da RTV-SIR quando exposto a descargas corona em ca. Foram realizadas medições de ângulo de contato estático, utilizando água e diiodometano na superfície das amostras, e análises morfológicas e de distribuição das nanopartículas na RTV-SIR por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de transmissão (TEM). A partir dos resultados obtidos, os autores constataram que a deterioração provocada pela exposição a descargas corona pode ser reduzida devido à dispersão da nanosílica na RTV-SIR. A perda de hidrofobicidade foi menor para amostras contendo 5% de nanosílica e maior para amostras sem a nanocarga. Contudo, não foi avaliada a recuperação da hidrofobicidade após a exposição a descargas corona.

Ghunem *et al.* (2015) investigaram a supressão da erosão provocada por arcos de bandas secas sob tensão contínua na borracha de silicone contendo cargas de ATH e sílica. Ensaios de calorimetria de varredura diferencial e teste de plano inclinado sob tensão contínua foram realizados. Eles concluíram que a sílica e a ATH aumentaram a condutividade térmica das amostras, retardando o desenvolvimento da temperatura necessária para erosão, e reduziram a magnitude da componente de terceira harmônica na corrente de fuga.

Syedmehti *et al.* (2016) avaliaram a influência do método utilizado para preparação dos revestimentos, o tipo de RTV-SIR empregado e a espessura dos revestimentos nas propriedades hidrofóbicas da RTV-SIR aplicada no isolamento em alta tensão. Todas as amostras analisadas continham nanopartículas de flúor em concentrações de 30% em peso. Os autores verificaram que o método proposto para realização da mistura proporcionou melhor dispersão das nanopartículas de flúor e maior hidrofobicidade ao revestimento. Ao comparar dois tipos de RTV-SIR na composição dos revestimentos, os autores constataram alterações nas propriedades hidrofóbicas, e atribuíram que a existência de partículas de sílica de um dos tipos de RTV-SIR afetou a dispersão das nanopartículas de flúor, reduzindo a hidrofobicidade. Os autores ainda constataram que o aumento da espessura do revestimento reduziu a hidrofobicidade da RTV-SIR.

De forma sumarizada, são apresentadas na Tabela 5 as principais contribuições das pesquisas citadas neste capítulo, com relação a utilização de revestimentos RTV-SIR no isolamento externo em alta tensão. Além disso, a contribuição científica deste trabalho é mencionada na tabela.

Tabela 5- Resumo das contribuições das pesquisas e cargas típicas utilizadas na RTV-SIR

Ano	Pesquisadores	Contribuição	Tipo de Carga
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
1995	Deng <i>et al.</i>	Analisaram a influencia do tamanho das partículas de ATH no tempo de vida de revestimentos a base de RTV-SIR submetidos a ensaio de névoa salina.	ATH
2002	Meyer <i>et al.</i>	Estudaram a influência do tamanho das partículas e concentração de cargas usadas em compostos de borracha de silicone para o isolamento elétrico.	ATH SÍLICA
2008	Venkatesulu e Thomas	Estudaram a resistência à erosão e trilhamento de nanocargas de MDH e microcargas de ATH como aditivos na composição da RTV-SIR.	ATH MDH
2009	Suwarno e Pratomosiwi	Avaliaram o desempenho de isoladores cerâmicos revestidos com RTV-SIR submetidos a ensaio de poluição artificial.	-----
2010	Venkatesulu e Thomas	Realizaram um estudo comparativo da resistência à erosão de nanocompósitos de RTV-SIR com baixa concentração de nano alumina e microcompósitos de ATH com alta concentração.	ATH
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	Syedmeahdi <i>et al.</i>	Investigaram a formulação de revestimentos de RTV-SIR super hidrofóbicos contendo cargas de ATH e nanopartículas de flúor.	ATH F
2013	Madidi <i>et al.</i>	Avaliaram as propriedades dielétricas da RTV-SIR contendo diferentes concentrações de nanocargas de TiO ₂ . O surfactante Triton X-100 foi utilizado para melhorar a dispersão das nanocargas.	TiO ₂
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 SÍLICA
2014	Bezerra	Avaliou o emprego de cargas micrométricas e nanométricas no revestimento de isoladores de vidro de alta tensão.	ATH SÍLICA
2015	Tariq Nazir <i>et al.</i>	Investigaram a influência da nanosílica, em diferentes concentrações nas propriedades hidrofóbicas da RTV-SIR quando exposto a descargas corona AC.	SÍLICA
2015	Ghunem <i>et al.</i>	Investigaram a supressão da erosão provocada por arcos de bandas secas sob tensão contínua na borracha de silicone contendo cargas de ATH e sílica.	ATH SÍLICA
2016	Syedmeahdi <i>et al.</i>	Avaliaram a influência do método utilizado para preparação dos revestimentos, o tipo de RTV-SIR empregado e a espessura dos revestimentos nas propriedades hidrofóbicas da RTV-SIR aplicada no isolamento em alta tensão.	F
	Esta dissertação	Estudou o comportamento de uma nova carga na composição de revestimentos poliméricos aplicados em isoladores de vidro.	ATH NOVA CARGA

Fonte: Próprio autor

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica com as principais pesquisas relacionadas à utilização e composição de revestimentos de RTV-SIR, além de suas principais contribuições. No próximo capítulo serão descritos os materiais utilizados nos ensaios, bem como os arranjos e procedimentos adotados.

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta para concretização deste trabalho é apresentada, enfatizando-se os materiais empregados na investigação, na preparação do revestimento e as configurações dos ensaios de névoa salina e hidrofobicidade.

4.1 MATERIAL

4.1.1 BORRACHA DE SILICONE

A borracha de silicone utilizada foi a RTV 615 A com agente de cura B, fabricado pela *Momentive Performance Materials*, como elastômero base. Este material foi selecionado por não conter cargas e possuir as mesmas propriedades que as borrachas de silicone empregadas no isolamento externo. As propriedades do silicone utilizado podem ser visualizadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades da borracha de silicone RTV 615

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

Fonte: *Momentive* (2007)

A RTV 615 A também foi selecionada por apresentar baixa viscosidade, que permite um fácil escoamento através de superfícies complexas como isoladores,

conforme informações contidas na Tabela 6. Além disso, o material proporciona uma isolamento elétrica adequada e possui boa resistência a choques mecânicos.

A RTV selecionada permite a escolha do seu tempo de cura por meio de calor. A Tabela 7 contém os tempos de cura aproximados mediante as temperaturas utilizadas.

Tabela 7 – 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

De forma a aperfeiçoar propriedades do revestimento utilizando borracha de silicone foram utilizados microcargas de alumina tri-hidratada Hydrogard-GP, produzida pela *ALCOA WORLD ALUMINA LLC*, e uma nova carga extraída de uma planta típica da região Nordeste do Brasil. Por razões de progresso da pesquisa e possível patente, o nome da nova carga não será revelado neste trabalho. As especificações técnicas da ATH podem ser visualizadas na Tabela 8. Até o presente momento, as especificações técnicas da nova carga não se encontram determinadas.

Tabela 8 – Especificações da ATH utilizada

Composição Química (%)	Típico	Características Físicas	Típico
Al ₂ O ₃	65,2	Peso Específico (g/cm ³)	2,42
SiO ₂	0,017	Índice de Refração	1,57
Fe ₂ O ₃	0,013	Dureza (Mohs)	2,5
Na ₂ O – Total	0,34	Absorção de Óleo (%)	23
Granulometria	Típico	Outras Características	Típico
+ #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 de vidro temperado - ANSI classe 52-3, tipo suspensão e fabricados pela *Sediver*, foram utilizados na pesquisa. Na Figura 12 pode ser visualizada a fotografia de isoladores de suspensão de vidro.

Figura 12 - Fotografia de Isoladores de suspensão da Sediver



Fonte: Sediver Catalogue (2008)

Na Tabela 9 é possível consultar algumas especificações técnicas a respeito dos isoladores utilizados. As informações foram obtidas mediante consulta ao catálogo do fabricante.

Tabela 9 – Especificações técnicas do isolador de vidro utilizado

Características Mecânicas	Valor (kN)
Resistência Eletromecânica Combinada	70
Resistência ao Impacto	45
Dimensões	Valor (mm)
Diâmetro	255
Espaçamento	146
Distância de Fuga	320
Características Elétricas	Valor (kV)
Tensão Disruptiva em Frequência Industrial a Seco	80
Tensão Disruptiva em Frequência Industrial sob Chuva	50
Tensão Crítica de Impulso Atmosférico – Positivo	125
Tensão Crítica de Impulso Atmosférico – Negativo	130
Menor Tensão de Perfuração na Frequência Industrial	130

Fonte: Sediver Catalogue (2008)

4.2 MÉTODOS

4.2.1 PREPARAÇÃO DOS REVESTIMENTOS

Para obtenção dos revestimentos diferentes proporções das cargas e da borracha de silicone foram utilizadas. O percentual de concentração mássica da nova carga foi escolhido de forma a explorar seu desempenho em altas e baixas concentrações. O percentual de concentração mássica para cada revestimento pode ser visualizado na Tabela 10.

Tabela 10- Percentual de concentração mássica para cada revestimento investigado

Revestimento	Silicone (%)	Alumina (%)	Nova carga (%)
S100/A0/N0	100	-----	-----
S95/A0/N5	95	-----	5
S90/A0/N10	90	-----	10
S80/A0/N20	80	-----	20
S70/A0/N30	70	-----	30
S80/A20/N0	80	20	-----
S75/A20/N5	75	20	5
S70/A20/N10	70	20	10
S60/A20/N20	60	20	20
S50/A20/N30	50	20	30

Fonte: Próprio autor

O procedimento adotado na confecção dos revestimentos consistiu na mistura simultânea das cargas de ATH e do novo material ao silicone. De forma a proporcionar melhor dispersão das cargas, algumas etapas relacionadas ao processo de mistura foram incorporadas do trabalho de Bezerra (2014).

Inicialmente, a ATH e a nova carga foram peneiradas em malha ABNT 200 mesh (abertura 74 μm) a fim de selecionar partículas menores e eliminar impurezas. Em seguida, as cargas e o silicone foram individualmente pesados nas proporções indicadas na Tabela 10 e misturados em um misturador rotativo marca *FISATOM*, modelo 713 D, com rotação em torno de 1.500 rpm, durante 30 minutos. Posteriormente, com o objetivo de evitar o aquecimento elevado da amostra, a mistura

repousou durante 20 minutos, retornando em seguida, ao misturador rotativo por mais 15 minutos. Ao término do período no misturador, foi adicionado o agente de cura à mistura na proporção 10:1 em relação ao peso do silicone, ou seja, para cada 10 g de silicone adicionou-se 1g de agente de cura. Novamente, a mistura foi conduzida ao misturador por mais 5 minutos para que houvesse uma dispersão uniforme do agente de cura. Após isso, a composição estava finalizada.

A superfície do isolador foi devidamente limpa e logo após, com auxílio de um pincel, a mistura de silicone foi aplicada. Uma vez aplicada a composição, o isolador foi mantido em repouso à temperatura ambiente ($\approx 28^{\circ}\text{C}$) por um período mínimo de 10 dias, até que a cura do revestimento fosse alcançada, respeitando as exigências da Tabela 7. Aguardado o tempo necessário para a cura, os isoladores revestidos estavam aptos à realização dos ensaios elétricos. Na Figura 13 encontra-se ilustrado uma amostra de revestimento aplicado ao isolador.

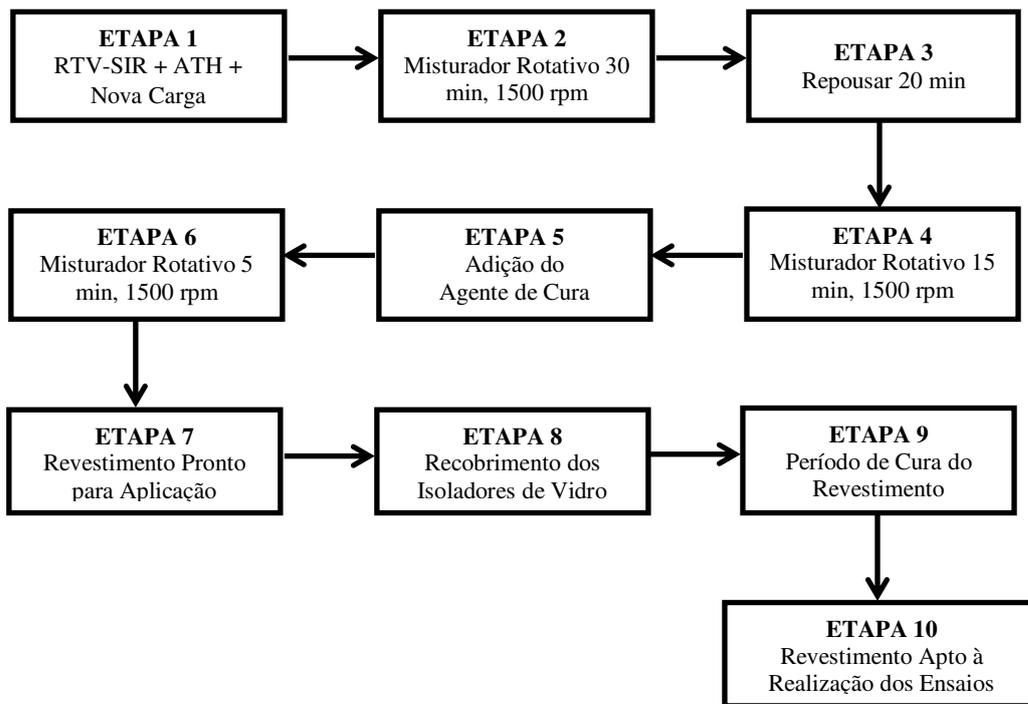
Figura 13 - Isolador revestido



Fonte: Próprio autor

Na Figura 14 é possível visualizar o fluxograma contendo, de forma sucinta, as etapas realizadas desde a produção do revestimento até o produto final. As etapas de 1 a 7 representam o processo de fabricação do revestimento enquanto as demais etapas estão relacionadas ao processo de aplicação e manipulação dos revestimentos.

Figura 14 - Fluxograma da metodologia de obtenção dos compósitos de silicone com cargas de ATH e do novo material



Fonte: Adaptado de Bezerra (2014)

4.2.2 ENSAIOS

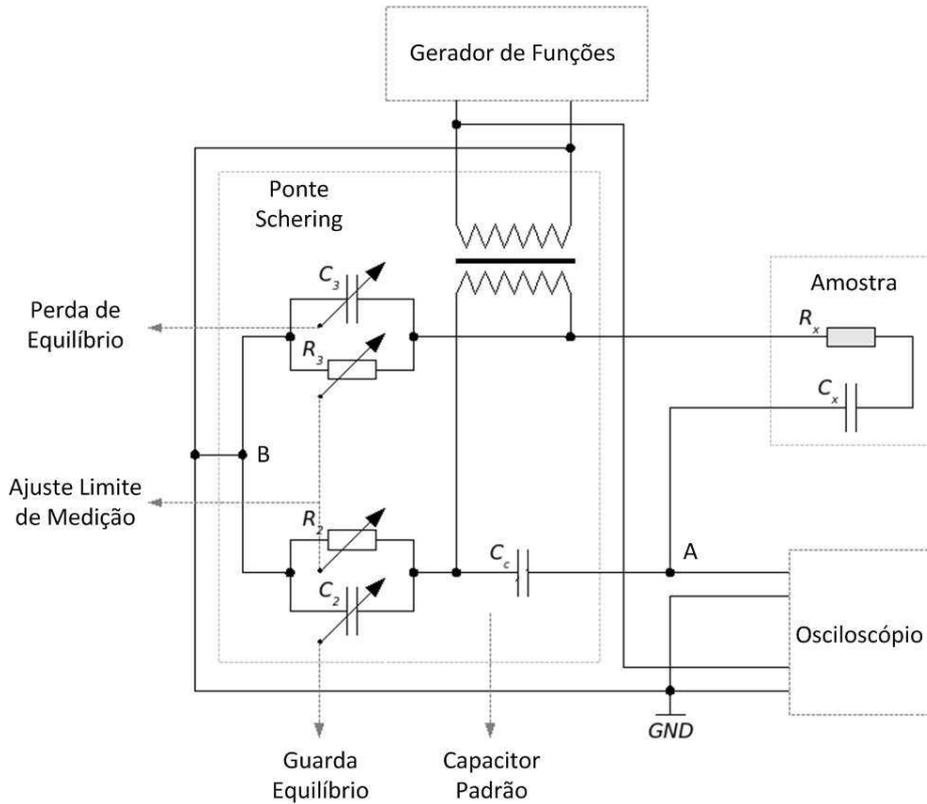
A seguir, serão apresentados os procedimentos e configurações adotados para os ensaios realizados neste trabalho. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande.

4.2.2.1 MEDIÇÃO DA CONSTANTE DIELETRICA E TANGENTE

DE PERDAS DA NOVA CARGA

Para determinar a constante dielétrica da nova carga foi utilizada a ponte Schering modelo TR-9701 TELMES. O estudo foi realizado para cinco frequências diferentes: 0,1 kHz, 1 kHz, 10 kHz, 50 kHz e 100 kHz. O esquema da ponte Schering utilizada pode ser visualizada na Figura 15.

Figura 15 – Esquema da ponte Schering TR-9701TELMES



Fonte: Adaptado de Bánhidi (2007)

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. O sinal foi utilizado como referência e conectado ao osciloscópio digital. Outro 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 $tg \delta$ são dados pelas Equações (11) e (12), respectivamente.

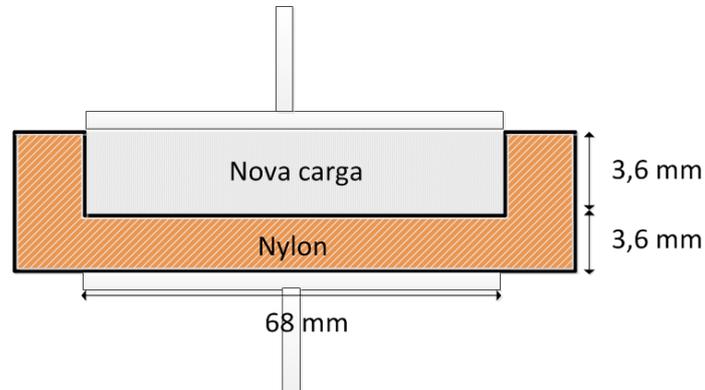
$$C_x = \frac{R_2}{R_3} C_c \quad (11)$$

$$tg \delta = w \cdot C_2 \cdot R_2 \quad (12)$$

Para realizar a medição, a nova carga (na forma de pó) foi colocada em um recipiente cilíndrico, em que a constante dielétrica do material da base (Nylon) foi previamente determinada. A amostra, constituída de dois dielétricos, foi inserida em um

capacitor de placas circulares e paralelas, com diâmetro de 68 mm. Na Figura 16 é possível visualizar o esquema utilizado para determinação da constante dielétrica da nova carga.

Figura 16 – Capacitor de placas paralelas contendo a nova carga



Fonte: Próprio autor

A temperatura do ambiente e a umidade relativa do ar no momento da medição foram, respectivamente, 28,9°C e 61%. Na Figura 17 são observadas fotografias da ponte Schering utilizada na determinação da constante dielétrica da nova carga.

Figura 17 – Medição da constante dielétrica em laboratório (a) Ponte Schering (b) Capacitor de placas paralelas



(a)



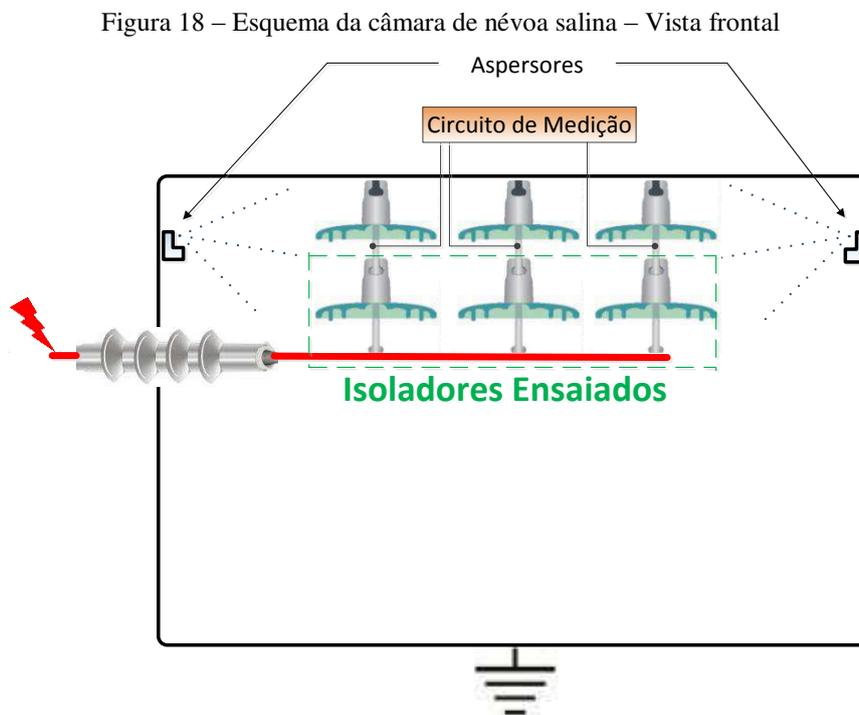
(b)

Fonte: Próprio autor

4.2.2.2 ENSAIO CÍCLICO DE NÉVOA SALINA

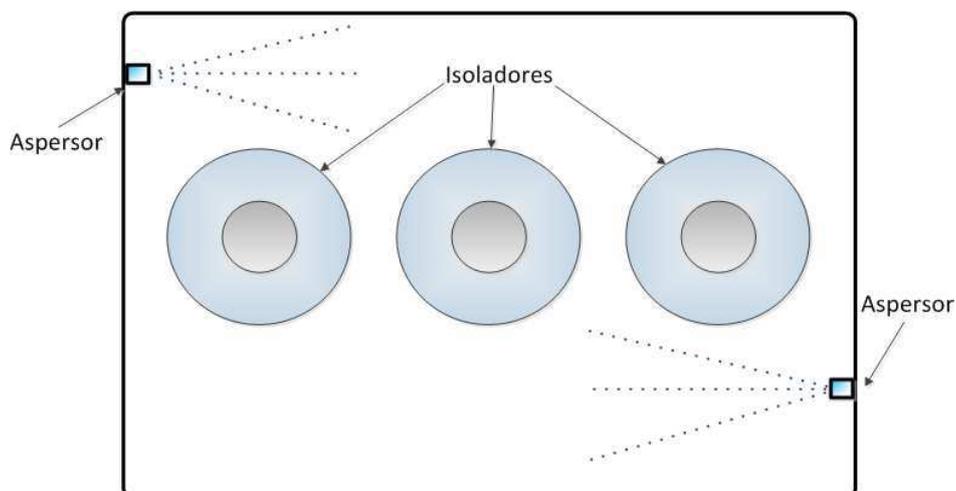
Para realização deste ensaio, inicialmente os isoladores revestidos foram devidamente limpos antes de serem introduzidos na câmara. Em seguida, os isoladores a serem ensaiados foram pendurados no interior da câmara de névoa em isoladores suportes. Os isoladores suportes proporcionaram sustentação mecânica e atuaram como alta impedância, fazendo com que a corrente de fuga fosse direcionada para o circuito de medição.

A câmara de névoa utilizada possui dimensões 1,2 x 1,0 x 1,0 m e comporta até três isoladores para ensaios simultâneos. A névoa foi gerada por meio de aspersores, que estão presentes no interior da câmara, e dispostos de modo a evitar a incidência direta da névoa sobre os isoladores. Na Figura 18 e Figura 19 encontram-se ilustrados o esquema da câmara utilizada. Na Figura 20 são observadas as fotografias da câmara presente no laboratório.



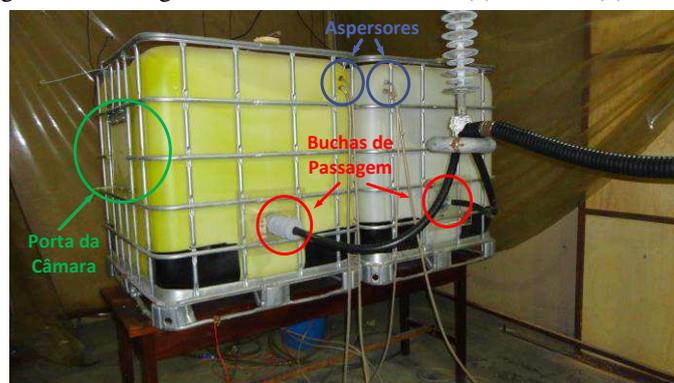
Fonte: Próprio autor

Figura 19 – Esquema da câmara de névoa salina – Vista superior



Fonte: Próprio autor

Figura 20 – Fotografias da câmara de névoa: (a) Exterior (b) Interior



(a)



(b)

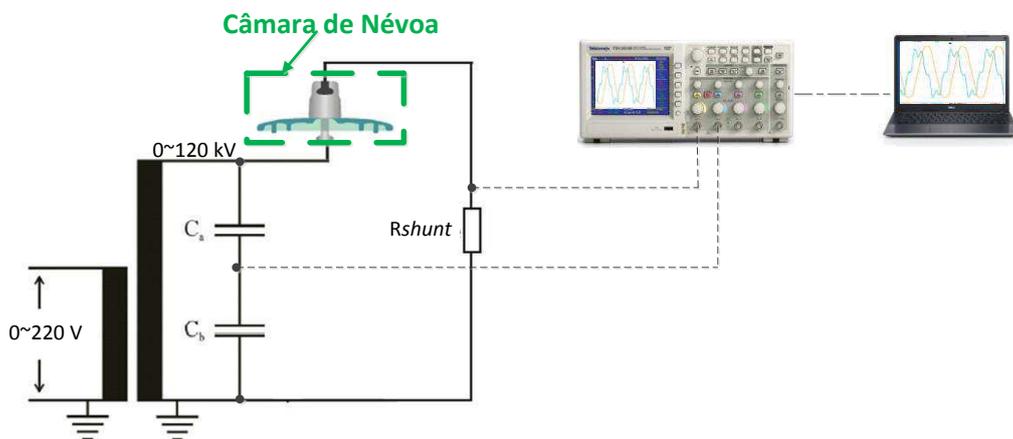
Fonte: Próprio autor

Buscou-se que os parâmetros tensão, condutividade da névoa, fluxo de água e pressão do ar nos aspersores fossem semelhantes aos parâmetros utilizados na IEC 60507 (1991) e nos trabalhos de Kim *et al.* (1992), Deng *et al.* (1996),

Almirall (2013) e Bezerra (2014). No entanto, durante a execução, ocorreram algumas variações em relação à configuração desejada e que por motivos estruturais/laboratoriais não puderam ser implementadas. Assim, a tensão que os isoladores foram submetidos foi $16 \text{ kV}_{\text{pico}}$ de forma a obter um campo elétrico médio de $0,5 \text{ kV/cm}$. Para formação da névoa, o fluxo de água no interior da câmara foi de $1,6 \pm 0,1 \text{ L/min}$ e a pressão do ar $0,25 \pm 0,01 \text{ MPa}$. A condutividade da água utilizada para gerar a névoa foi $1.400 \pm 3\% \mu\text{S/cm}$.

A medição da corrente de fuga durante o ensaio cíclico de névoa salina foi realizada utilizando-se como referência o diagrama esquemático do arranjo experimental apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Arranjo experimental utilizado no ensaio cíclico de névoa salina



Fonte: Próprio autor

O circuito utilizado é composto por uma mesa de controle, um transformador elevador de tensão (0-120 kV), um divisor capacitivo, o objeto de teste (isolador a ser ensaiado) em série com o resistor *shunt* (R_{shunt}) e um osciloscópio digital conectado a um computador. Na medição da tensão aplicada ao objeto de teste foi utilizado um divisor capacitivo. A corrente de fuga total foi medida indiretamente a partir da queda de tensão no resistor *shunt*. Com o objetivo de análises mais aprofundadas, os sinais de tensão e corrente foram digitalizados a partir de um osciloscópio digital e armazenados em um computador. Fotografias do arranjo utilizado podem ser visualizadas na Figura 22.

Figura 22 – Fotografias: (a) Arranjo experimental utilizado no ensaio cíclico de névoa salina. (b) Sistema de aquisição de dados



(a)

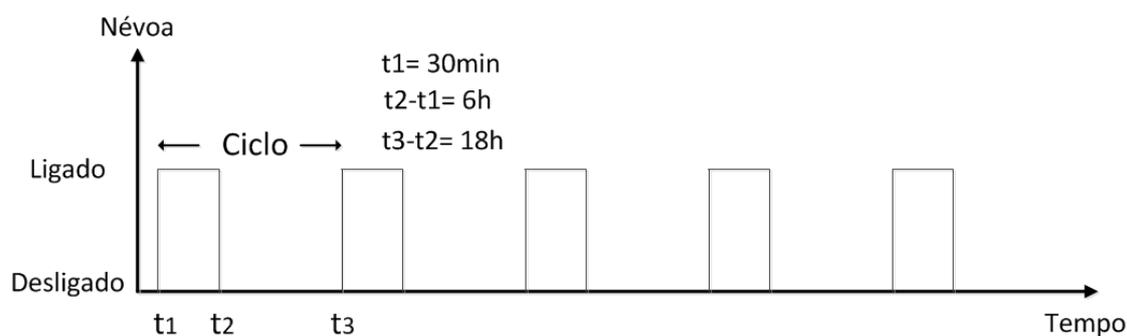


(b)

Fonte: Próprio autor

O ensaio teve duração de 120 horas e foi estruturado em ciclos, tomando como referência as condições descritas em Almirall (2013) e Bezerra (2014). O período do ensaio foi subdividido em cinco ciclos de 24 horas cada um. Em cada ciclo, a névoa salina foi aplicada durante um período de 6 horas seguido de 18 horas sem névoa. Na Figura 23 encontra-se ilustrado a configuração dos ciclos.

Figura 23 – Configuração dos ciclos de aplicação da névoa



Fonte: Próprio autor

As medições das correntes de fuga foram realizadas em três momentos distintos em cada ciclo: antes de aplicar a névoa, trinta minutos após iniciada a aplicação da névoa e imediatamente antes da remoção da aplicação da névoa.

4.2.2.3 HIDROFOBICIDADE

4.2.2.3.1 MÉTODO SPRAY

Baseado nas recomendações do guia STRI (*Swedish Transmission Research Institute*), para produzir a névoa foi utilizado água destilada e uma garrafa de borrifamento de líquidos.

A névoa foi aplicada em quatro regiões distintas do isolador de forma a avaliar a hidrofobicidade na superfície como um todo. Em cada região foram realizados borrifamentos a uma taxa de 1 - 2 vezes por segundo durante aproximadamente 20 segundos. Após a aplicação da névoa, foram realizadas fotografias das superfícies para análises da classificação da hidrofobicidade a partir do guia STRI. A hidrofobicidade foi avaliada em diferentes instantes de tempo, conforme descrito abaixo.

- Antes do início do ensaio de névoa salina, para conhecer o valor inicial da hidrofobicidade dos revestimentos preparados;
- Imediatamente após o término do ensaio de névoa salina, para avaliar a perda de hidrofobicidade provocada pelo ensaio;
- 3; 5; 10; 15; 30 e 60 dias após o término do ensaio de névoa salina, para analisar a velocidade de recuperação da hidrofobicidade.

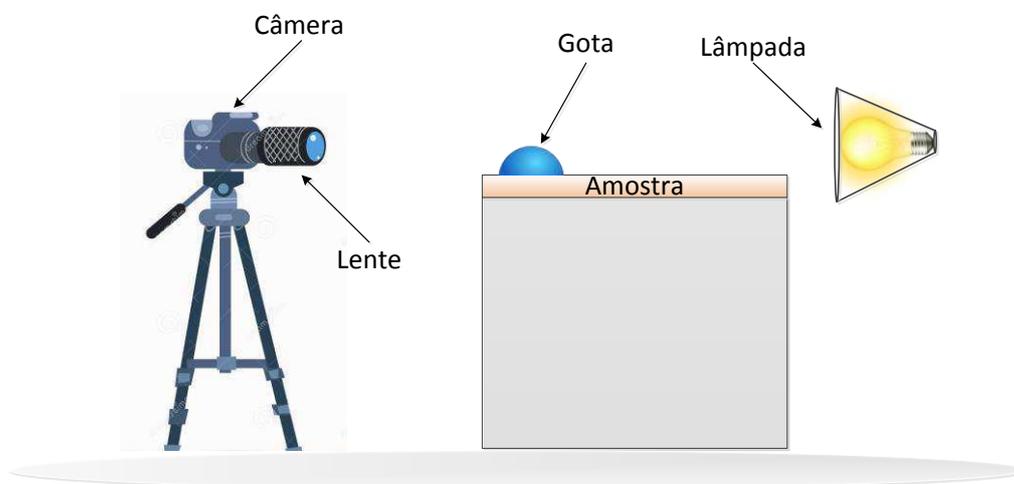
4.2.2.3.2 MÉTODO DO ÂNGULO DE CONTATO

O método do ângulo de contato foi empregado para avaliar o grau de molhabilidade de um líquido em superfícies sólidas e, conseqüentemente, sua hidrofobicidade. O monitoramento foi realizado com a mesma periodicidade aplicada à avaliação da hidrofobicidade, pelo método *spray*.

A medição do ângulo de contato foi baseada nas recomendações da IEC 62073 (2003). Foram utilizadas cinco amostras do mesmo revestimento onde foram aplicadas cinco gotas em áreas adjacentes. As gotas foram obtidas mediante a utilização de pipeta e água destilada. O volume das gotas foi de aproximadamente 15 μ L.

Para obtenção das imagens de ângulo de contato entre as gotas de água e a superfície foi utilizado o arranjo mostrado na Figura 24.

Figura 24- Arranjo utilizado para medição dos ângulos de contato

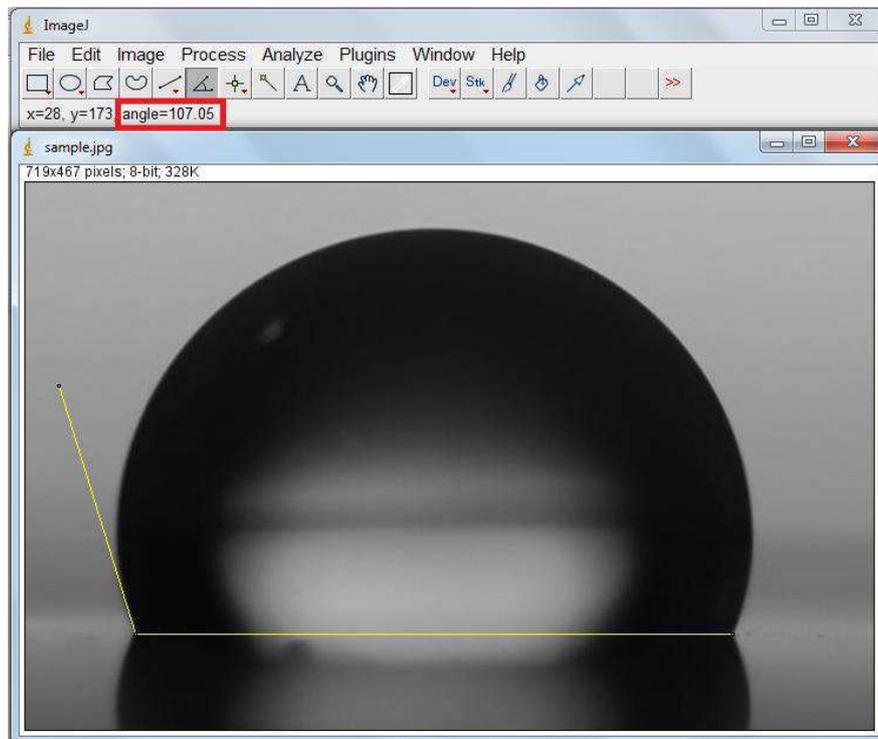


Fonte: Próprio autor

O arranjo é composto basicamente por um sistema óptico, a amostra e um sistema de iluminação. O sistema óptico é composto por uma câmera digital Nikon modelo D3100 e uma lente com distância focal ajustável de 70-300 mm. A câmera foi ajustada de forma que seja possível observar a reflexão da gota sobre a superfície. O sistema de iluminação é constituído por uma lâmpada incandescente de 100 W posicionada por trás da amostra com o objetivo de proporcionar melhor contraste à gota de água depositada sobre a superfície. A intensidade luminosa do ambiente foi menor que a intensidade da lâmpada de forma que a gota de água depositada na superfície não refletisse nenhuma luz difusa a fim de não comprometer a qualidade da medição.

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. Foram realizadas medições dos ângulos de contato dos lados direito e esquerdo das gotas, obtendo-se a média desses ângulos como ângulo de contato estático. Na Figura 25 encontra-se ilustrado a medição do ângulo de contato de uma gota qualquer utilizando o *software Image J*.

Figura 25 – Medição de ângulo de contato utilizando o *software Image J*



Fonte: Próprio autor

Neste capítulo foram descritos os materiais e procedimentos utilizados na fabricação dos revestimentos de RTV-SIR utilizados nesta pesquisa, além do arranjo experimental e sistemas de medição adotados para os ensaios.

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

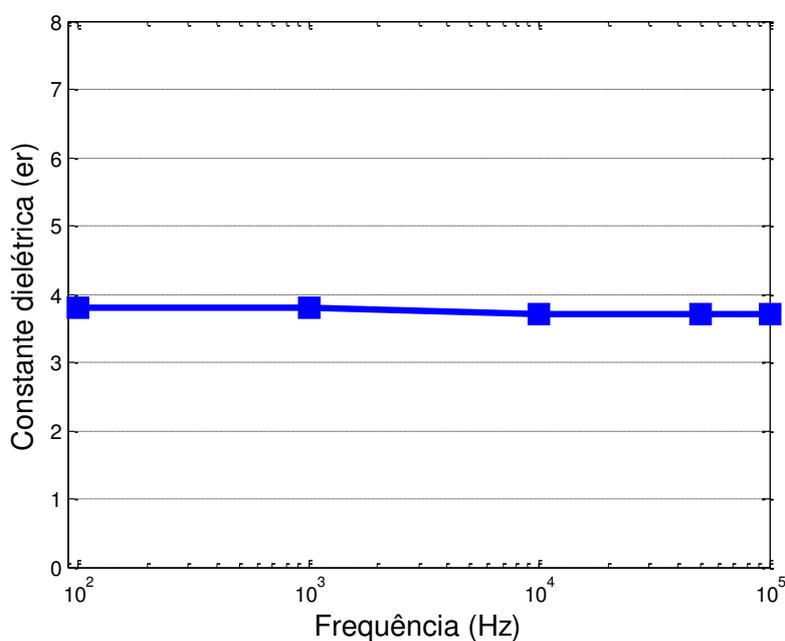
5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos durante a pesquisa. Estudos comparativos dos resultados também serão apresentados e discutidos. Análises estatísticas serão utilizadas como apoio para justificar as afirmações.

5.1 CONSTANTE DIELÉTRICA DA NOVA CARGA

A partir da configuração descrita em 4.2.2.1, inicialmente foi realizada a medição da constante dielétrica do nylon, utilizado como material base do recipiente cilíndrico. Utilizando a ponte Schering, foram encontrados valores de capacitância que resultaram no equilíbrio da ponte para frequências de 0,1 kHz, 1 kHz, 10 kHz, 50 kHz e 100 kHz. A constante dielétrica do nylon para o capacitor de placas paralelas foi determinada recorrendo-se a Equação (3) (seção 2.6), sabendo-se que a amostra possuía espessura de 3,6 mm e diâmetro de 68 mm. A $\text{tg } \delta$ para o nylon apresentou valores em torno de 0,006 na faixa de frequência analisada. Na Figura 26 é possível visualizar os valores das constantes dielétricas obtidas para o Nylon nas frequências mencionadas.

Figura 26 – Valores de constantes dielétricas medidas para o nylon em diferentes frequências

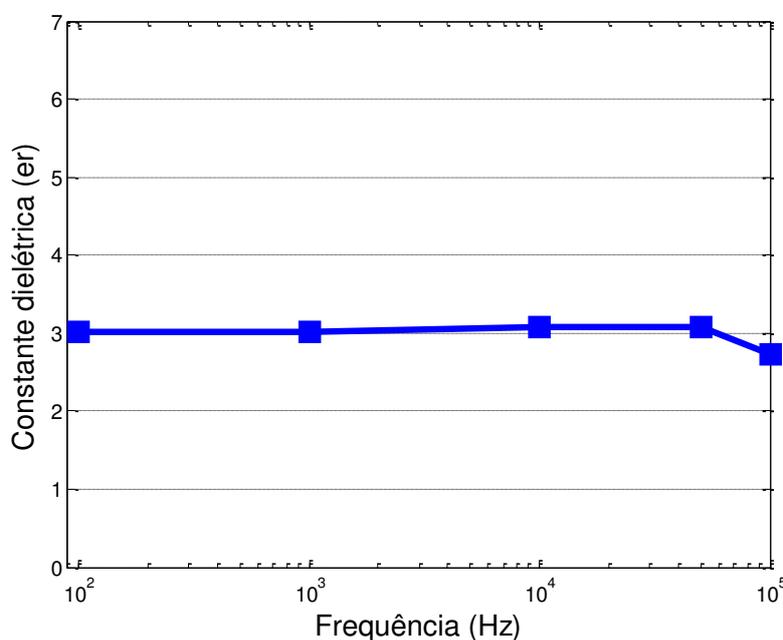


Fonte: Próprio autor

Analisando a Figura 26, constata-se que os valores de constante dielétrica do nylon não apresentaram variações significativas com a variação da frequência, caracterizando o material como fracamente polar na região analisada.

Posteriormente, determinado a constante dielétrica do nylon, foi realizada a medição da constante dielétrica da nova carga para as faixas de frequência citadas. Os dielétricos foram arranjados de forma a resultar em uma associação série de capacitores. A capacitância equivalente que resultou no equilíbrio da ponte, para cada valor de frequência analisada, foi medida e a constante dielétrica determinada a partir da Equação (4) (seção 2.6). A $\text{tg } \delta$ para o conjunto nylon e nova carga apresentou valores em torno de 0,002 na faixa de frequência analisada, inferindo a nova carga como isolante. Na Figura 27 é possível visualizar os valores das constantes dielétricas obtidas para a nova carga nas frequências mencionadas.

Figura 27 – Valores de constantes dielétricas medidas para a nova carga em diferentes frequências



Fonte: Próprio autor

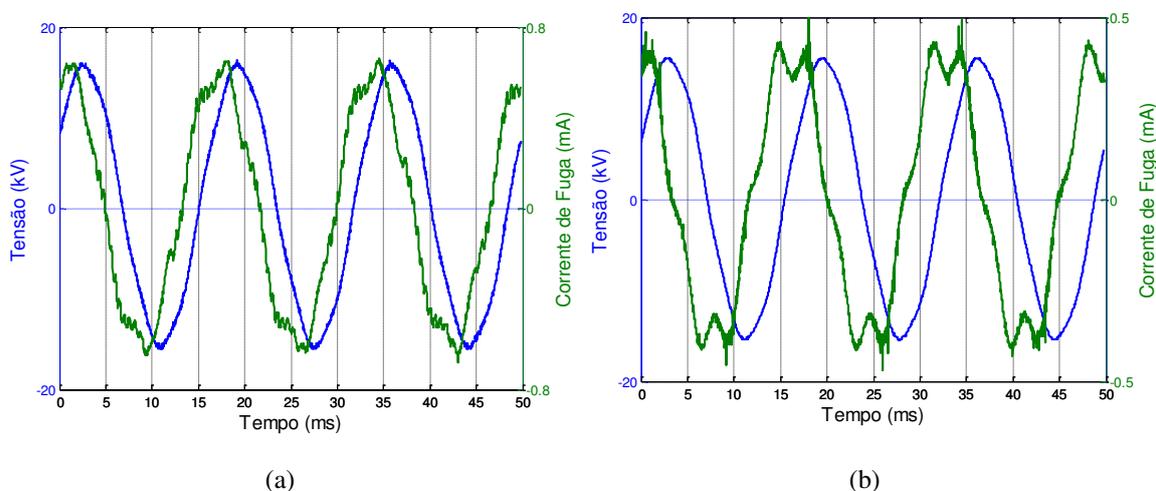
Analisando a Figura 27, é verificado que os valores de constante dielétrica da nova carga não apresentaram variações significativas até a frequência de 50 kHz. Para a frequência de 100 kHz constatou-se uma redução significativa para o valor da constante dielétrica. Assim, observa-se que a constante dielétrica apresenta dependência da frequência, indicando presença de moléculas polares na nova carga, visto que a redução no valor da constante dielétrica foi pequena. Pelo exposto, para frequências entre 50 kHz e 100 kHz as moléculas tendem a não acompanhar as variações do campo.

5.2 ENSAIO CÍCLICO DE NÉVOA SALINA

A realização do ensaio cíclico de névoa salina teve como objetivo promover a degradação das amostras, simulando condições ambientais em que os isoladores podem estar inseridos. O desempenho dos revestimentos aplicados ao isolamento externo foi avaliado a partir da análise dos valores de pico da corrente de fuga e distorção harmônica.

Na Figura 28, a título de ilustração, são mostrados os sinais de tensão aplicada e de corrente de fuga registrados para isoladores sem revestimento e com revestimento S80/A0/N20, após a aplicação da névoa durante o primeiro ciclo do ensaio.

Figura 28 – Sinais de tensão aplicada e corrente de fuga para duas amostras após a aplicação da névoa durante o primeiro ciclo do ensaio (a) Sem revestimento (b) S80/A0/N20



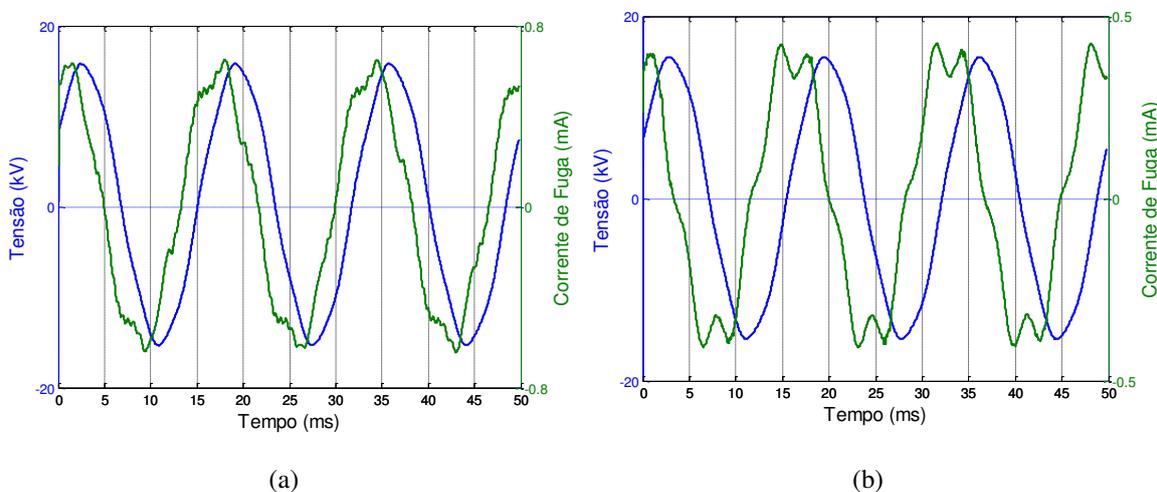
Fonte: Próprio autor

Quando se analisa a Figura 28, evidencia-se que a adição do revestimento polimérico S80/A0/N20 à superfície do isolador, Figura 28 (b), proporciona redução nos valores de corrente de fuga quando comparado ao isolador sem revestimento, Figura 28 (a), após a aplicação da névoa para o primeiro ciclo do ensaio. Além disso, verifica-se que os sinais de tensão não apresentam aparentemente grandes distorções, isto é, o sinal é praticamente senoidal. Nos sinais da corrente de fuga observam-se a presença de ruídos e ocorrência de *spikes* (pulsos rápidos de alta amplitude). Uma das causas da ocorrência dos *spikes* deve-se a ocorrência de descargas do tipo bandas secas na superfície do isolador.

Uma filtragem digital nos sinais de tensão e corrente registrados foi realizada a fim de eliminar os sinais de alta frequência. A filtragem foi realizada mediante um filtro

passa-baixa de média móvel. Foram utilizadas sete amostras para calcular a média da sequência de dados no filtro. Na Figura 29 são mostrados os sinais de tensão aplicada e de corrente de fuga filtrados para isoladores sem revestimento e com revestimento S80/A0/N20, após a aplicação da névoa durante o primeiro ciclo do ensaio.

Figura 29 – Sinais de tensão aplicada e corrente de fuga filtrados para duas amostras após a aplicação da névoa durante o primeiro ciclo do ensaio (a) Sem revestimento (b) S80/A0/N20



Fonte: Próprio autor

5.2.1 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS DO ENSAIO CÍCLICO DE NÉVOA SALINA

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos revestimentos aplicados aos isoladores de vidro tipo suspensão, foram utilizados, como parâmetro de análise, os valores de pico da corrente de fuga. Na Tabela 11 são apresentados os valores medidos da corrente de fuga, para cada amostra, antes da aplicação da névoa, aproximadamente trinta minutos após a aplicação da névoa e antes da remoção da aplicação da névoa, conforme descrito na seção 4.2.2.2.

Tabela 11 – Valores de pico das correntes de fuga medidos em diferentes instantes de tempo para cada ciclo do ensaio

Corrente de fuga medido para cada amostra (mA).												
	Sem revestimento			S100/A0/N0			S95/A0/N5			S90/A0/N10		
	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3
Ciclo 1	0,52	1,30	2,90	0,41	0,42	0,46	0,40	0,42	0,50	0,39	0,40	0,46
Ciclo 2	0,63	2,34	4,15	0,42	0,49	0,53	0,42	0,43	0,52	0,41	0,42	0,47
Ciclo 3	0,49	3,86	5,50	0,43	0,52	0,55	0,42	0,44	0,52	0,44	0,52	0,70
Ciclo 4	0,60	1,14	3,53	0,43	0,50	0,70	0,43	0,44	0,54	0,51	0,58	0,72
Ciclo 5	0,77	3,70	3,43	0,48	0,80	0,89	0,43	0,48	0,62	0,53	0,64	0,79
	S80/A0/N20			S70/A0/N30			S80/A20/N0			S75/A20/N5		
	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3
Ciclo 1	0,41	0,42	0,72	0,44	0,53	0,58	0,42	0,46	0,53	0,40	0,41	0,47
Ciclo 2	0,46	0,74	0,94	0,46	0,70	0,78	0,44	0,50	0,57	0,42	0,42	0,47
Ciclo 3	0,55	0,84	1,26	0,49	0,60	0,83	0,45	0,54	0,64	0,43	0,44	0,52
Ciclo 4	0,61	1,06	1,20	0,52	0,81	1,03	0,47	0,56	0,81	0,43	0,43	0,55
Ciclo 5	0,76	1,13	1,27	0,53	0,94	1,00	0,52	0,80	0,85	0,43	0,43	0,61
	S70/A20/N10			S60/A20/N20			S50/A20/N30					
	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3			
Ciclo 1	0,40	0,41	0,61	0,40	0,47	0,72	0,42	0,47	0,77			
Ciclo 2	0,43	0,55	0,66	0,43	0,71	0,85	0,49	0,70	0,76			
Ciclo 3	0,44	0,57	0,67	0,49	0,71	0,88	0,53	0,75	0,91			
Ciclo 4	0,52	0,61	0,71	0,54	0,81	0,92	0,55	0,74	0,95			
Ciclo 5	0,52	0,70	0,82	0,58	0,83	0,98	0,63	0,87	0,90			

onde:

T-1: Antes de aplicar a névoa;

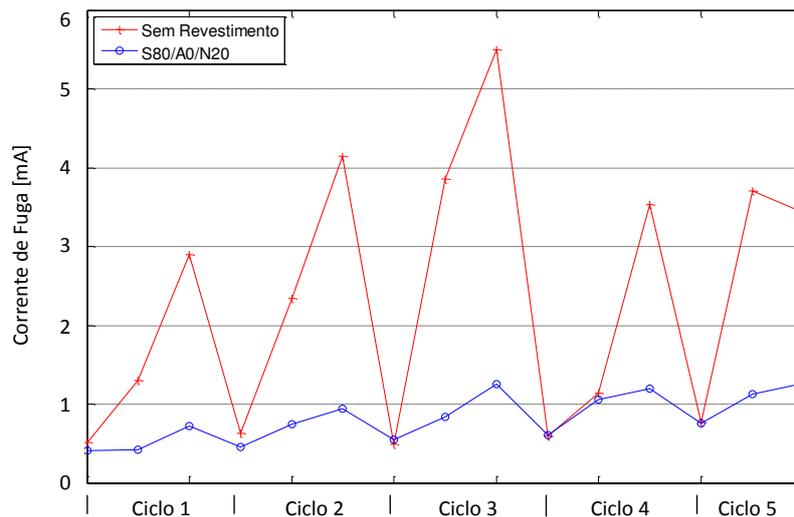
T-2: 30min após aplicar a névoa;

T-3: Imediatamente antes de retirar a névoa.

Fonte: Próprio autor

A partir dos dados da Tabela 11, foi realizada, inicialmente, uma comparação do desempenho da amostra que não possui revestimento com a amostra S80/A0/N20, que apresentou os maiores valores de corrente de fuga em relação ao conjunto das amostras com revestimento. O gráfico mostrado na Figura 30 foi construído a partir dos valores de pico da corrente de fuga obtidos para os diferentes instantes de tempo e ciclos de ensaio mencionados anteriormente.

Figura 30 – Valores de corrente de fuga obtidos em diferentes momentos durante o ensaio cíclico de névoa salina para amostras sem revestimento (vermelho) e com revestimento S80/A0/N20 (azul)



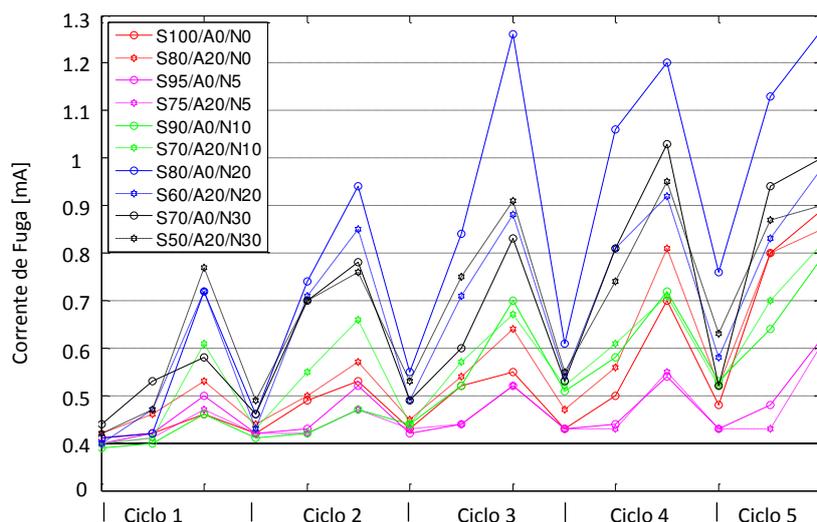
Fonte: Próprio autor

Quando se analisa o comportamento da corrente de fuga da amostra sem revestimento, observa-se uma intensificação nos valores quando da aplicação dos ciclos névoa salina. Isto se deve a alta energia superficial provida pelo vidro, ocasionando maior nível de molhabilidade.

Quando se compara as amostras com e sem revestimento, evidencia-se que, mesmo para a amostra que apresentou os piores desempenhos, o revestimento polimérico reduz substancialmente a corrente de fuga, isto é, proporciona um desempenho superior ao isolamento cerâmico em condições adversas de umidade e poluição. Esse fato já era esperado devido a características como hidrofobicidade serem acrescidas ao isolador, impedindo a formação de películas de água e dificultando a passagem da corrente de fuga, conforme mencionado na literatura.

De forma a comparar todas as amostras que possuem revestimento, foi construído o gráfico mostrado na Figura 31. No gráfico é possível visualizar a evolução dos valores da corrente de fuga ao longo dos ciclos de ensaio para todas as amostras estudadas que possuem revestimento. As medições de corrente de fuga presentes no gráfico foram obtidas em condições análogas à Figura 30. As amostras analisadas são caracterizadas pelo percentual de concentração mássica do silicone (S), da ATH (A) e da nova carga (N), conforme mostrado na Tabela 10 em 4.2.1.

Figura 31 – Valores de corrente de fuga obtidos em diferentes momentos durante o ensaio cíclico de névoa salina para as amostras com revestimento



Fonte: Próprio autor

Na Figura 31, os revestimentos compostos apenas por RTV-SIR (S100/A0/N0) e por RTV-SIR com ATH (S80/A20/N0) são utilizados como referência. Comparando os dois revestimentos entre si, observou-se que até o final do quarto ciclo a amostra contendo apenas RTV-SIR possuiu menores valores de corrente de fuga. Durante o quinto ciclo, verificou-se um aumento significativo nos valores de corrente de fuga para a amostra contendo apenas RTV-SIR no revestimento. Os valores da corrente, em algum momento, superaram os valores obtidos para o revestimento S80/A20/N0. Este fato pode ser atribuído à ausência de cargas que protejam o revestimento de RTV-SIR, permitindo a intensificação de descargas elétricas e, conseqüentemente, provocando sua degradação de forma mais rápida.

Para os revestimentos contendo percentuais de concentração mássica da nova carga superiores a 10% foram verificados maiores valores de corrente de fuga ao longo de todos os ciclos de ensaio em relação às amostras de referência. Os valores mais críticos foram observados para o revestimento S80/A0/N20. Provavelmente, problemas associados a dispersão da nova carga e a técnica de processamento da mistura provocaram a redução da tensão superficial do revestimento, afetando a hidrofobicidade do material e, conseqüentemente, comprometendo o desempenho do revestimento.

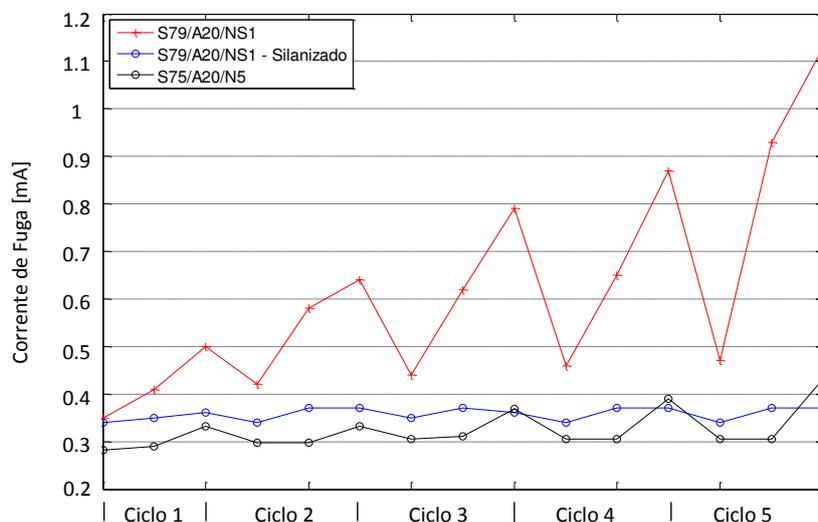
Os revestimentos contendo 10% em percentual de concentração mássica da nova carga (S90/A0/N10 e S70/A20/N10) apresentaram valores de corrente de fuga próximos às amostras de referência. Durante os dois primeiros ciclos do ensaio, o revestimento S90/A0/N10 apresentou os menores valores de corrente de fuga em relação aos demais

revestimentos. Já o revestimento S70/A20/N10 apresentou valores superiores aos revestimentos de referência. Ao longo dos demais ciclos, a corrente de fuga do revestimento S90/A0/N10 apresentou uma evolução crescente, possuindo valores próximos ao revestimento S70/A20/N10. Ainda, durante os dois últimos ciclos foi verificada uma tendência dos dois revestimentos em possuir menores valores de corrente de fuga em relação às amostras de referência.

Os revestimentos S95/A0/N5 e S75/A20/N5 apresentaram os melhores desempenhos com relação aos valores de corrente de fuga durante todo o período de realização do ensaio. Ambos os revestimentos apresentaram valores muito próximos entre si e praticamente não ocorreram evoluções significativas da corrente de fuga ao longo dos ciclos. Possivelmente pode ter ocorrido uma maior adesão das cargas à matriz polimérica, reduzindo a rugosidade na superfície e, conseqüentemente, apresentando melhores resultados.

O desempenho do revestimento S75/A20/N5 foi analisado comparativamente, em termos dos valores de corrente de fuga, com revestimentos que apresentaram melhores desempenhos nos trabalhos de Almirall (2013) e Bezerra (2014). O gráfico mostrado na Figura 32 foi construído a partir dos valores *rms* da corrente de fuga, obtidos para os diferentes instantes de tempo e ciclos de ensaio mencionados anteriormente. Os revestimentos comparados são designados pelo percentual de concentração mássica do silicone (S), da ATH (A), da nanosílica (NS) e da nova carga (N).

Figura 32 – Valores de corrente de fuga obtidos em diferentes momentos durante o ensaio cíclico de névoa salina para o revestimento S75/A20/N5 e revestimentos presentes na literatura



Fonte: Próprio autor

Na Figura 32, verificou-se que os valores de corrente de fuga para o revestimento S75/A20/N5 são inferiores ao revestimento S79/A20/NS1 obtido por Almirall (2013), em que não se utiliza o processo de silanização das cargas. Quando se compara o desenvolvimento da corrente de fuga do revestimento S75/A20/N5 em relação ao revestimento S79/A20/NS1 obtido por Bezerra (2014), em que se utiliza o processo de silanização, evidencia-se um desempenho semelhante entre os revestimentos.

Pelo exposto, é possível concluir que a adição da nova carga foi viável na composição de revestimentos aplicados ao isolamento externo. Os revestimentos contendo baixas concentrações da nova carga tenderam a proporcionar um melhor desempenho em relação à intensificação de correntes de fuga quando submetidos a condições adversas de poluição e umidade.

5.2.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA A CORRENTE DE FUGA

Ao analisar estatisticamente os dados da Tabela 11, verifica-se que existem variações nos valores da corrente de fuga em função dos diferentes ciclos e amostras. Assim, torna-se necessária uma análise estatística de forma a verificar se as variações são sistemáticas ou devido ao acaso. A análise foi realizada apenas para as amostras que possuem revestimento de RTV-SIR, a fim de verificar se a composição dos revestimentos e os ciclos influenciam nos valores de corrente de fuga medidos.

Para aplicar a técnica ANOVA, descrita na seção 2.10, construiu-se a Tabela 12 de dupla entrada (revestimento e ciclos) a partir dos valores de corrente de fuga medidos antes da remoção da aplicação da névoa para cada revestimento em cada ciclo. Esse instante foi escolhido por ser o mais crítico com relação aos valores de corrente de fuga medidos.

Tabela 12 – Tabela de fatores de dupla entrada (revestimento e ciclos) a partir de medições da corrente de fuga obtidas no ensaio cíclico de névoa salina

Revestimentos	Ciclos				
	1	2	3	4	5
S100/A0/N0	0,46	0,53	0,55	0,70	0,89
S95/A0/N5	0,50	0,52	0,52	0,54	0,62
S90/A0/N10	0,46	0,47	0,70	0,72	0,79
S80/A0/N20	0,72	0,94	1,26	1,20	1,27
S70/A0/N30	0,58	0,78	0,83	1,03	1,00
S80/A20/N0	0,53	0,57	0,64	0,81	0,85
S75/A20/N5	0,47	0,47	0,52	0,55	0,61
S70/A20/N10	0,61	0,66	0,67	0,71	0,82
S60/A20/N20	0,72	0,85	0,88	0,92	0,98
S50/A20/N30	0,77	0,76	0,91	0,95	0,90

* Valores de corrente de fuga em mA.

Fonte: Próprio autor

Para tomar decisões sobre as diferenças observadas nos valores de corrente de fuga, foram formuladas as seguintes hipóteses:

- Para os revestimentos
 - ✓ H_{0R} – Não existem diferenças no comportamento dos revestimentos ao medir os valores de corrente de fuga;
 - ✓ H_{1R} – Existem diferenças no comportamento dos revestimentos ao medir os valores de corrente de fuga.
- Para os ciclos
 - ✓ H_{0C} – Os diferentes ciclos apresentam efeitos semelhantes sobre os valores de corrente de fuga;
 - ✓ H_{1C} – Os diferentes ciclos exercem influência sobre os valores de corrente de fuga.

Os resultados da aplicação da ANOVA sobre as variações de corrente de fuga e os ciclos podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13 – ANOVA para valores de corrente de fuga

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculado</i>	<i>valor-p</i>	<i>F crítico (5%)</i>	<i>F crítico (1%)</i>
Revestimento	1,367298	9	0,151922	24,603638	8,14137E-13	2,152607	2,946086
Ciclo	0,551028	4	0,137757	22,309629	2,48231E-09	2,633532	3,890308
Erro	0,222292	36	0,006175				
Total	2,140618	49					

Fonte: Próprio autor

Quando se analisa os dados da Tabela 13, inicialmente, verifica-se que o valor de $F_{\text{calculado}}$ para o revestimento como fonte de variação é superior ao valor de $F_{\text{crítico}}$ ao nível de significância de 1%. Assim, rejeita-se a hipótese H_{0R} e se aceita a hipótese H_{1R} com um grau de confiança de 99%, isto é, a hipótese em que os revestimentos não introduzem diferenças nos valores de corrente de fuga é rejeitada e, conseqüentemente, a hipótese dos revestimentos introduzirem diferenças nos valores de corrente de fuga é aceita.

Ao analisar o ciclo como fonte de variação, a partir dos dados da Tabela 13, verifica-se que, semelhante ao revestimento, o valor de $F_{\text{calculado}}$ é maior que o valor de $F_{\text{crítico}}$ ao nível de significância de 1%. Assim, a hipótese H_{0C} é rejeitada e a hipótese H_{1C} é aceita com um grau de confiança de 99%, isto é, a hipótese em que os ciclos de névoa aplicados no ensaio não introduzem diferenças nos valores de corrente de fuga é rejeitada e, conseqüentemente, a hipótese dos ciclos de névoa introduzir diferenças nos valores de corrente de fuga é aceita.

No intuito de verificar quais revestimentos apresentam diferenças significativas, com relação a correntes de fuga em condições de névoa salina, foi utilizado o teste de Tukey. Na Tabela 14 é mostrado o resultado do teste de Tukey para os revestimentos estudados.

Tabela 14 – Teste de Tukey para os revestimentos estudados

	S80/A0/N20	S50/A20/N30	S60/A20/N20	S70/A0/N30	S70/A20/N10	S80/A20/N0	S100/A0/N0	S90/A0/N10	S95/A0/N5	S75/A20/N5
S80/A0/N20	-	0,208	0,220	0,234	0,384	0,398	0,450	0,452	0,538	0,554
S50/A20/N30	0,208	-	0,012	0,026	0,176	0,190	0,242	0,244	0,330	0,346
S60/A20/N20	0,220	0,012	-	0,014	0,164	0,178	0,230	0,232	0,318	0,334
S70/A0/N30	0,234	0,026	0,014	-	0,150	0,164	0,216	0,218	0,304	0,320
S70/A20/N10	0,384	0,176	0,164	0,150	-	0,014	0,066	0,068	0,154	0,170
S80/A20/N0	0,398	0,190	0,178	0,164	0,014	-	0,052	0,054	0,140	0,156
S100/A0/N0	0,450	0,242	0,230	0,216	0,066	0,052	-	0,002	0,088	0,104
S90/A0/N10	0,452	0,244	0,232	0,218	0,068	0,054	0,002	-	0,086	0,102
S95/A0/N5	0,538	0,330	0,318	0,304	0,154	0,140	0,088	0,086	-	0,016
S75/A20/N5	0,554	0,346	0,334	0,320	0,170	0,156	0,104	0,102	0,016	-

$\Delta = 0,168$

$r = 5$

$\alpha = 5\%$

Fonte: Próprio autor

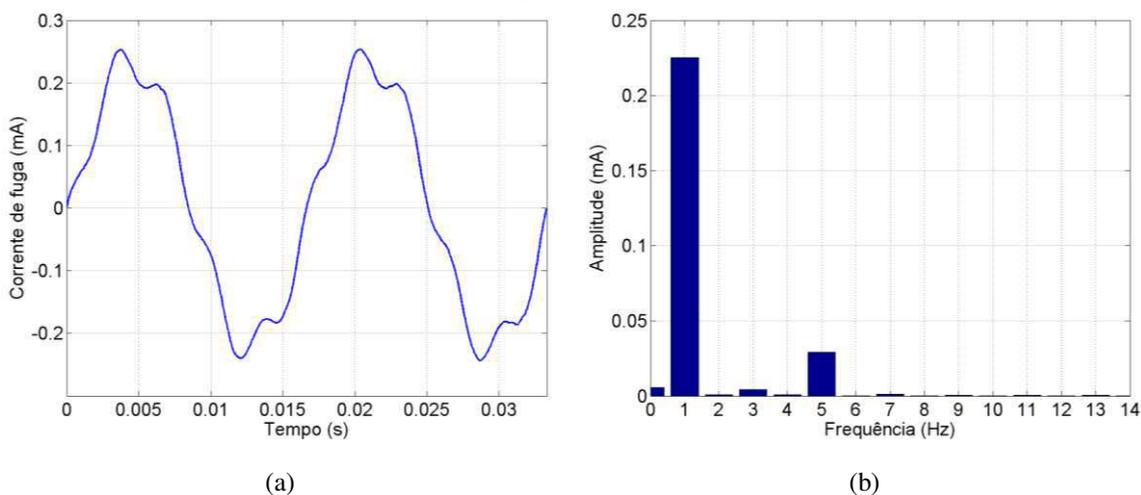
Na Tabela 14 os valores em vermelho indicam que a diferença absoluta de duas médias superou a diferença mínima significativa (Δ), ou seja, duas médias diferem ao nível de significância de 5%. A partir do teste de Tukey, verifica-se que os revestimentos S100/A0/N0, S80/A20/N0, S90/A0/N10, S95/A0/N5 e S75/A20/N5 apresentaram diferenças significativas na média quando comparados aos revestimentos contendo altas concentrações da nova carga (20% e 30%). Isso indica que a utilização de altas concentrações da nova carga, associado a problemas de dispersão e processamento da mistura, podem ter comprometido o desempenho do revestimento em relação a valores de corrente de fuga nos diversos ciclos de ensaio.

5.2.3 AVALIAÇÃO DAS COMPONENTES HARMÔNICAS

Com o objetivo de investigar a existência de uma correlação entre a análise do conteúdo harmônico dos sinais de corrente de fuga e o fenômeno da degradação para os revestimentos estudados, foram avaliados a DHT e a relação entre as componentes de terceiro e quinto harmônicos para os sinais de correntes registrados.

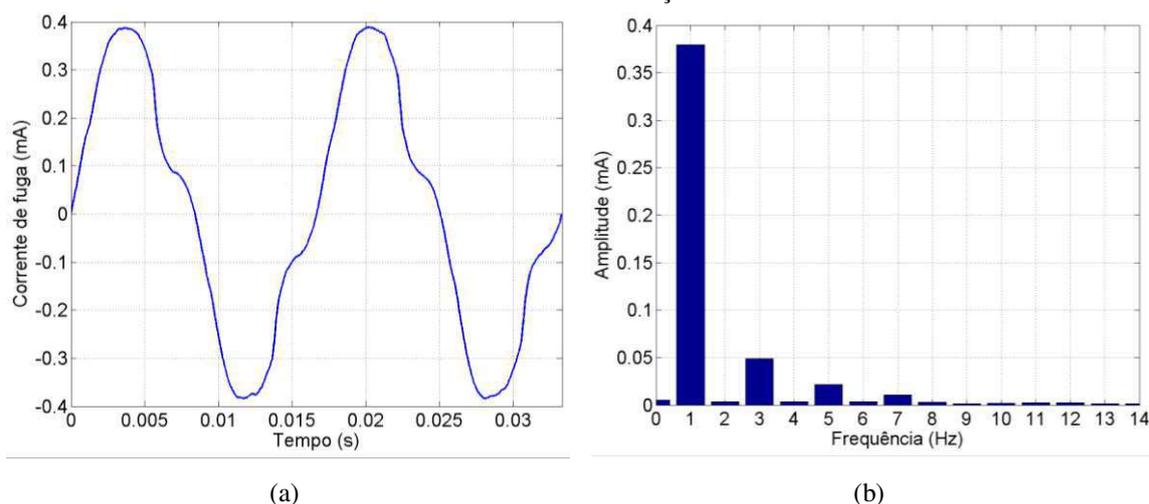
Inicialmente, aplicou-se a Transformada de Fourier para os sinais de corrente de fuga registrados. A título de ilustração, são mostradas na Figura 33 e na Figura 34 as componentes harmônicas para sinais de corrente de fuga medidos para a amostra S90/A0/N10, em condições a seco e sob névoa salina, a fim de investigar o comportamento dos harmônicos para cada condição.

Figura 33 – Forma de onda da corrente (a) e componentes harmônicas (b) para o isolador com revestimento S90/A0/N10 durante o período seco do ensaio cíclico de névoa salina



Fonte: Próprio autor

Figura 34 – Forma de onda da corrente (a) e componentes harmônicas (b) para o isolador com revestimento S90/A0/N10 sob condições de névoa salina

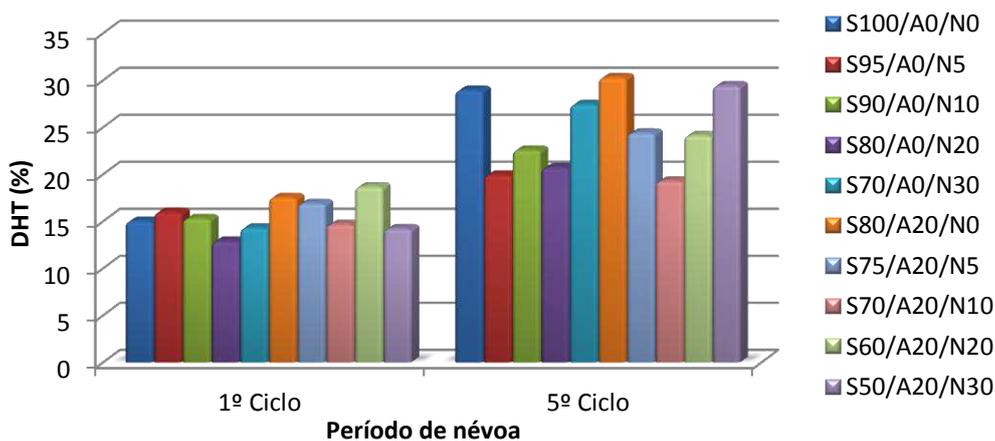


Fonte: Próprio autor

Quando se analisa a Figura 33 e a Figura 34, durante o período seco a componente de 5º harmônico é superior a componente de 3º harmônico. Para condições de névoa, constata-se o crescimento das amplitudes das componentes harmônicas, com destaque para as componentes fundamental, 3º harmônico e 7º harmônico. A componente de 3º harmônico supera a amplitude da componente de 5º harmônico e, assim, ocasiona maiores distorções no sinal medido.

A DHT foi determinada para os isolamentos submetidos apenas a condições de névoa salina, por proporcionar maior severidade ao revestimento. Além disso, ela foi avaliada para o primeiro e o último ciclo, de forma a investigar indicativos de degradação do isolamento durante o início e o término do ensaio. Na Figura 35 são mostrados os valores da DHT para os revestimentos estudados, sob condições de névoa salina, para o primeiro e o quinto ciclo do ensaio.

Figura 35 – DHT para os revestimentos, sob névoa salina, durante o primeiro e o quinto ciclo do ensaio

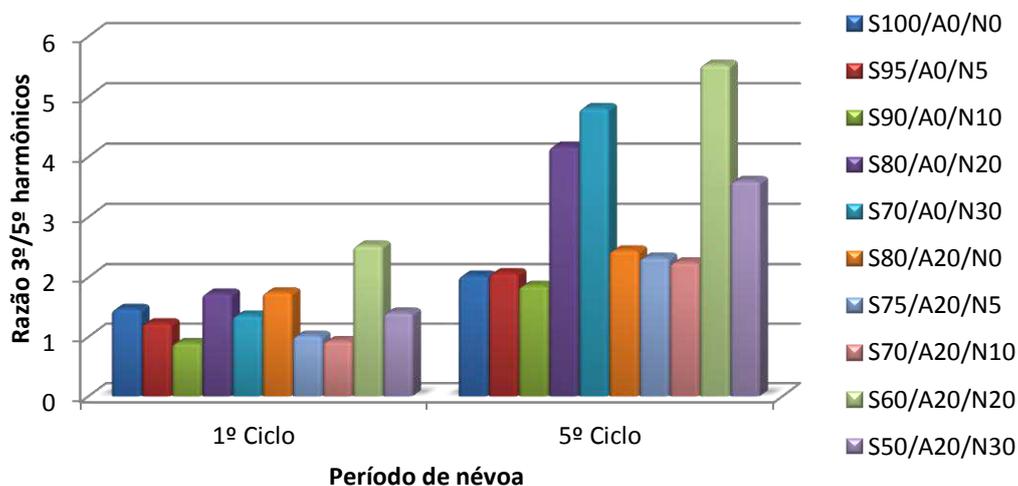


Fonte: Próprio autor

Quando se analisa a Figura 35, verifica-se que durante o primeiro ciclo de ensaio os revestimentos apresentaram valores de DHT entre 14% e 19%, sendo o maior valor verificado para o revestimento S60/A20/N20. Para o quinto ciclo é constatado um aumento para os valores da DHT, com valores entre 18% e 30%. A partir da análise de DHT, é possível inferir que o aumento dos valores indica a ocorrência de degradação das amostras. Contudo, não é possível determinar quais revestimentos apresentaram maiores índices de degradação entre si.

A análise visual das Figura 33 e Figura 34 evidenciou a necessidade de estudar a relação da razão entre as componentes de 3º e 5º harmônicos. A razão entre as componentes harmônicas, referentes aos revestimentos estudados, foi avaliada para o primeiro e o último ciclo de ensaio, sob condições de névoa salina. O gráfico da razão entre as componentes de 3º e 5º harmônicos, em função dos ciclos analisados, pode ser visualizado na Figura 36.

Figura 36 – Razão entre componentes de 3º e 5º harmônicos para os revestimentos, sob névoa salina, durante o primeiro e o quinto ciclo do ensaio



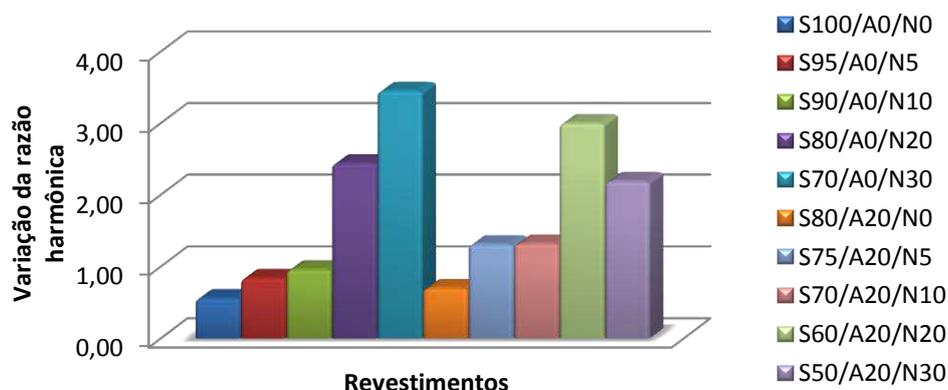
Fonte: Próprio autor

Quando se analisa a Figura 36, verifica-se que para o primeiro ciclo, sob condições de névoa salina, a razão entre as componentes de 3º e 5º harmônicas da corrente de fuga, para os revestimentos estudados, apresentaram valores inferiores a 2, exceto para o revestimento S80/A20/N0. Isto indica que, já durante o primeiro ciclo de ensaio, este revestimento apresentou indícios de degradação, conforme resultados obtidos por Bashir & Ahmad (2010).

Ao investigar o quinto ciclo na Figura 36, sob condições de névoa salina, verifica-se que um aumento da razão entre as componentes de 3° e 5° harmônicas da corrente de fuga, para os revestimentos estudados, apresentando valores entre 1,9 e 5,6.

De forma a avaliar individualmente os revestimentos, analisou-se a variação entre a razão harmônica do primeiro e do quinto ciclo da Figura 36. O gráfico obtido para a variação da razão pode ser visualizado na Figura 37.

Figura 37 – Variação da razão de 3° e 5° harmônicas para o primeiro e o quinto ciclo



Fonte: Próprio autor

Quando se analisa a Figura 37, verificam-se discrepâncias para os revestimentos, com relação a diferença entre a razão do 3° e 5° harmônicos para o primeiro e o quinto ciclo do ensaio. As maiores diferenças foram constatadas para os revestimentos S80/A0/N20, S70/A0/N30, S60/A20/N20 e S50/A20/N30, com valores entre 2,2 e 3,4. Isto confirma o desempenho inferior destes quatro revestimentos em relação aos valores de corrente de fuga medidos, conforme mostrado na Seção 5.2.1.

5.3 AVALIAÇÃO DA HIDROFOBICIDADE

5.3.1 MÉTODO SPRAY

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos revestimentos quanto à capacidade de recuperar a hidrofobicidade após os ensaios de névoa salina, as amostras de revestimentos foram submetidas ao processo de borrifamento (método *spray*) e classificadas obedecendo as recomendações do guia STRI. Os resultados obtidos das medições de hidrofobicidade dos revestimentos estudados, a partir das recomendações descritas no guia STRI, podem ser visualizados na Tabela 15. Os graus de

hidrofobicidade foram classificados nos diferentes instantes de tempo, como descrito na Seção 4.2.2.3.

Tabela 15 – Resultados da classificação da hidrofobicidade para os isoladores revestidos

Classificação da Hidrofobicidade								
Revestimentos	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8
S100/A0/N0	1	4	2	2	2	2	1	1
S95/A0/N5	1	2	2	2	2	1	1	1
S90/A0/N10	1	4	2	2	2	2	2	1
S80/A0/N20	1	3	3	3	3	3	2	1
S70/A0/N30	1	3	3	3	3	3	3	2
S80/A20/N0	1	3	2	2	2	2	1	1
S75/A20/N5	1	2	2	2	2	1	1	1
S70/A20/N10	1	4	2	2	2	2	2	2
S60/A20/N20	1	3	3	3	3	3	3	2
S50/A20/N30	1	3	3	3	3	3	3	2

T-1: Antes do início do ensaio de névoa salina;
T-2: Imediatamente após o término do ensaio de névoa salina;
T-3: 3 dias após o término do ensaio de névoa salina;
T-4: 5 dias após o término do ensaio de névoa salina;

T-5: 10 dias após o término do ensaio de névoa salina;
T-6: 15 dias após o término do ensaio de névoa salina;
T-7: 30 dias após o término do ensaio de névoa salina;
T-8: 60 dias após o término do ensaio de névoa salina.

Fonte: Próprio autor

Quando se analisa os dados contidos na Tabela 15, verifica-se que, antes de iniciar o ensaio de névoa salina, todos os revestimentos apresentaram o maior nível de hidrofobicidade (HC = 1) segundo a classificação descrita no guia STRI (1992). Imediatamente após o término do ensaio, constatou-se que todos os revestimentos apresentaram redução mínima de um nível de hidrofobicidade na escala proposta pelo guia STRI (1992), em conformidade com os resultados obtidos por Su *et al.* (2010), Almirall (2013) e Bezerra (2014).

Os maiores índices de redução da hidrofobicidade, após o ensaio de névoa salina, foram verificados para os revestimentos S100/A0/N0, S90/A0/N10 e S70/A20/N10. Eles apresentaram classificação de hidrofobicidade HC = 4 imediatamente após o término do ensaio de névoa salina. O comportamento do revestimento S100/A0/N0 pode ser justificado devido à ausência de cargas de proteção em sua superfície, tornando o elastômero mais susceptível a degradação e a perda de grupos metil, responsáveis pela hidrofobicidade da RTV-SIR. Para os revestimentos S90/A0/N10 e S70/A20/N10, a causa pode estar associada aos processos de dispersão e tratamento das partículas da nova carga. Além disso, os revestimentos S100/A0/N0, S90/A0/N10 e S70/A20/N10 apresentaram recuperação relativamente rápida após 3 dias

de término do ensaio de névoa salina, passando da classificação HC = 4 para HC = 2. Os revestimentos S100/A0/N0 e S90/A0/N10 retornaram ao maior nível de hidrofobicidade (HC = 1) após 30 dias e 60 dias de término do ensaio de névoa salina, respectivamente.

Os revestimentos que possuíam maiores concentrações da nova carga (20% e 30% em peso), independente da presença de ATH, apresentaram recuperação mais lenta da hidrofobicidade após o ensaio de névoa salina. Para esses revestimentos, os níveis de hidrofobicidade apresentaram classificação HC = 3 após o término do ensaio de névoa salina. A recuperação parcial da hidrofobicidade (HC = 3 para HC = 2) foi observada após 30 dias de término do ensaio para o revestimento S80/A0/N20, e após 60 dias de para os revestimentos S60/A20/N20, S70/A0/N30 e S50/A20/N30. Uma recuperação total (HC = 1) foi observada para o revestimento S80/A0/N20 após 60 dias de término do ensaio. A recuperação mais lenta da hidrofobicidade, conforme estudos realizados por Deng (1996) e Hillborg (2001), está relacionada a formação de barreiras, originadas pelas cargas, que retardam o processo de difusão das cadeias de baixo peso molecular para a superfície do silicone e, conseqüentemente, uma redução no processo de recuperação da hidrofobicidade.

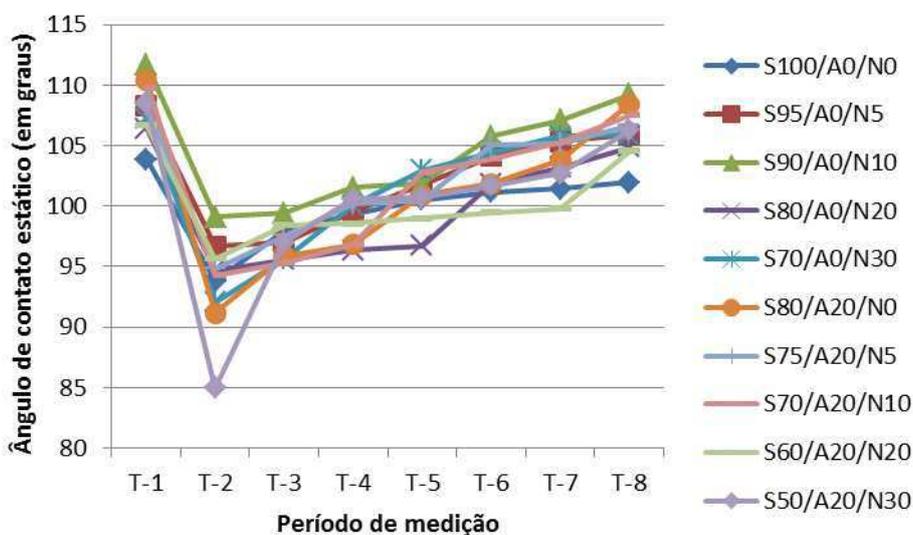
Os melhores desempenhos para perda e recuperação da hidrofobicidade foram verificados para os revestimentos S95/A0/N5 e S75/A20/N5, que possuem baixas concentrações da nova carga. Após o ensaio de névoa salina, eles apresentaram perdas parciais nos níveis de hidrofobicidade, com classificação HC = 2. Ambos apresentaram recuperação total da hidrofobicidade após 15 dias de término do ensaio de névoa salina, retornando a classificação HC = 1.

Quando se compara a recuperação da hidrofobicidade dos revestimentos, por meio do método *spray*, com a diferença da razão do 3º e 5º harmônicos para o primeiro e quinto ciclos de ensaio em condições de névoa salina (Figura 37), evidenciou-se a existência de uma correlação entre as análises. Verificou-se que os revestimentos S80/A0/N20, S70/A0/N30, S60/A20/N20 e S50/A20/N30, que apresentaram lento processo de recuperação da hidrofobicidade, obtiveram maiores variações em relação a razão harmônica do primeiro e quinto ciclos de ensaio. Os demais revestimentos, que apresentaram recuperação moderada ou rápida, apresentaram pequenas variações em relação a razão harmônica. Assim, a razão entre componentes de 3º e 5º harmônicos mostrou ser um indicativo, por grandezas elétricas, da capacidade de recuperação da hidrofobicidade para revestimentos poliméricos a base de RTV-SIR.

5.3.2 MÉTODO DO ÂNGULO DE CONTATO

Para avaliar o grau de molhabilidade das amostras, e conseqüentemente a hidrofobicidade, foram realizadas medições do ângulo de contato estático. Seguindo as orientações descritas na Seção 4.2.2.3.2, foram aplicadas entre quatro e cinco gotas de água destilada, com volume aproximado de 15 μ L, em áreas adjacentes na superfície do isolador. O *software Image J* foi utilizado para realizar as medições dos ângulos de contato em ambos os lados da gota, a partir das imagens obtidas durante o ensaio. A temperatura no ambiente durante a realização das medições estava em torno de 25°C e a umidade relativa do ar era aproximadamente 60%. Na Figura 38 encontra-se ilustrado os resultados da medição dos ângulos de contato para cada revestimento nos diferentes instantes de tempo descrito na Seção 4.2.2.3.2. O erro de medição foi $\pm 4^\circ$.

Figura 38 – Medição dos ângulos de contato dos revestimentos estudados.



T-1: Antes do início do ensaio de névoa salina;
T-2: Imediatamente após o término do ensaio de névoa salina;
T-3: 3 dias após o término do ensaio de névoa salina; .
T-4: 5 dias após o término do ensaio de névoa salina;

T-5: 10 dias após o término do ensaio de névoa salina;
T-6: 15 dias após o término do ensaio de névoa salina;
T-7: 30 dias após o término do ensaio de névoa salina;
T-8: 60 dias após o término do ensaio de névoa salina.

Fonte: Próprio autor

A partir dos resultados das medições de ângulo de contato estático, informados na Figura 38, verifica-se que, antes de iniciar o ensaio de névoa salina, todos os revestimentos apresentavam valores próximos. O menor valor foi verificado para o

revestimento S100/A0/N0 com 103,89°, e o maior para o revestimento S90/A0/N10, com 111,71°.

Imediatamente após o término do ensaio cíclico de névoa salina, constatou-se que todos os revestimentos apresentaram redução nos valores dos ângulos de contato, com valores entre 84,95° (revestimento S50/A20/N30) e 99,12° (revestimento S90/A0/N10). Contudo, uma maior redução nos ângulos de contato deve ter ocorrido imediatamente após a retirada da névoa, considerando que nos trabalhos de Kim *et al.* (1992) e Cherney *et al.* (2014), após o término do ensaio de névoa salina e retirada do estresse elétrico, a recuperação da hidrofobicidade foi significativa nas primeiras 24 horas. Neste trabalho, após a retirada da névoa, o isolador permaneceu energizado durante um período de 18 horas até o término do ciclo de ensaio e, sucessivamente, foi realizada a avaliação da hidrofobicidade. Assim, apesar de estar sujeito ao estresse elétrico durante o período, pode ter havido recuperação parcial da hidrofobicidade.

O revestimento S50/A20/N30 foi o mais afetado na medição realizada imediatamente após o término do ensaio cíclico de névoa salina, apresentando valor ligeiramente inferior a 90°. Esse fato está associado à formação de rugosidades na superfície do isolador, que facilitam a deposição de partículas de poluição e, quando associado a umidade, provoca maior atividade elétrica na superfície do isolador, resultando em maior redução da hidrofobicidade.

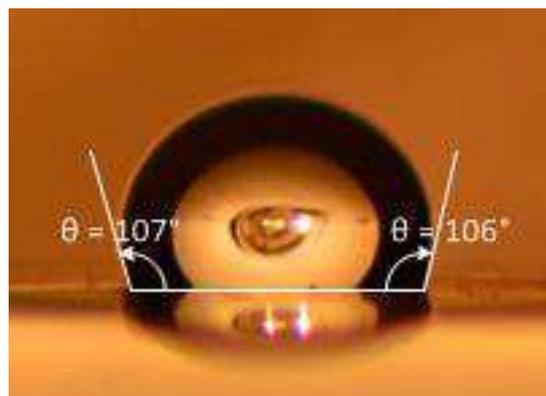
A recuperação mais lenta da hidrofobicidade, a partir dos valores de ângulos de contato medidos, foi para o revestimento S60/A20/N20. Apenas após 60 dias do término do ensaio de névoa salina, o revestimento apresentou valor de ângulo de contato próximo ao revestimento virgem. Possivelmente, a lenta recuperação da hidrofobicidade pode estar associada à limitação do processo de migração das cadeias livres de PDMS para a superfície do revestimento. Além disso, a formação de aglomerados na superfície do isolador afeta a hidrofobicidade do revestimento, conforme descrito anteriormente.

A seguir, a título de ilustração, são mostradas imagens das medições de ângulo de contato para o revestimento S95/A0/N5, antes e imediatamente após a realização do ensaio cíclico de névoa salina, respectivamente. Na Figura 39 (a) e Figura 40 (a) são visualizadas gotas de água inseridas na superfície do revestimento. Na Figura 39 (b) e Figura 40 (b) são realizadas as medições dos ângulos de contatos para uma das gotas.

Figura 39 - Gotas de água em contato com o revestimento S95/A0/N5 antes da realização do ensaio cíclico de névoa salina. (a) Fotografia obtida. (b) Ângulo de contato para uma das gotas



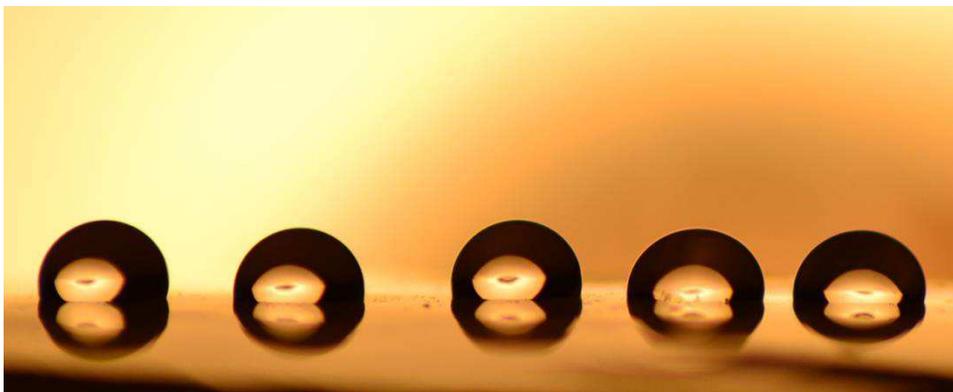
(a)



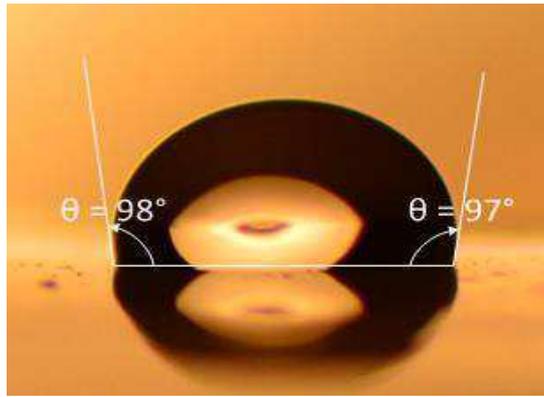
(b)

Fonte: Próprio autor

Figura 40 – Gotas de água em contato com o revestimento S95/A0/N5 imediatamente após a realização do ensaio cíclico de névoa salina. (a) Fotografia obtida. (b) Ângulo de contato para uma das gotas



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor

A partir da Figura 39 e Figura 40 verifica-se a redução dos valores de ângulo de contato do revestimento S95/A0/N5 após o ensaio cíclico de névoa salina e, conseqüentemente, redução da hidrofobicidade. A medição dos ângulos de contato formados entre a gota de água e a superfície pelos lados direito e esquerdo apresentam desvios pequenos em relação a média ($\approx 0.5^\circ$), Figura 39 (b) e Figura 40 (b), podendo ser o ângulo estático aproximado pela média dos ângulos. Conforme abordado na Seção 2.7, os desvios verificados podem ser possivelmente atribuídos à rugosidade, heterogeneidade química, orientação molecular e imprecisões associadas à medição.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E

TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais, conclusões e trabalhos futuros desta dissertação.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, revestimentos a base de RTV-SIR foram preparados contendo diferentes concentrações de ATH associada a uma nova carga, 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 por meio de ensaios cíclicos de névoa salina com aplicação de esforços elétricos. Durante os ensaios, sinais da corrente de fuga foram monitorados e registrados com o objetivo de avaliar o desempenho dos revestimentos.

A nova carga foi caracterizada eletricamente por meio da medição da constante dielétrica e tangente de perdas para frequências de 0,1 kHz, 1 kHz, 10 kHz, 50 kHz e 100 kHz. A constante dielétrica da nova carga foi aproximadamente 3,0 para várias frequências e a tangente de perdas teve sua ordem de grandeza em torno de 10^{-3} . A nova carga apresentou leve dependência da frequência entre 50 kHz e 100 kHz, indicando presença de moléculas polares, visto que a redução no valor da constante dielétrica foi pequena. O baixo valor da tangente de perdas indica características típicas de um bom material isolante.

A avaliação do desempenho dos revestimentos foi realizada por meio de sinais de corrente de fuga, obtidos durante o ensaio cíclico de névoa salina. Avaliação dos valores de pico, determinação da DHT e razão entre 3º e 5º harmônicos foram realizadas a partir dos sinais de corrente de fuga registrados.

Os valores de pico da corrente de fuga foram analisados para três instantes de tempo distintos em cada ciclo: antes de aplicar a névoa, aproximadamente trinta

minutos após iniciada a aplicação da névoa e imediatamente antes da remoção da aplicação da névoa. Constatou-se que:

- Por meio de análise de variância (ANOVA), a composição dos revestimentos e os ciclos de ensaios influenciaram na variação dos valores de corrente de fuga medidos;
- A partir do teste de Tukey, os revestimentos S100/A0/N0, S80/A20/N0, S90/A0/N10, S95/A0/N5 e S75/A20/N5 apresentaram diferenças significativas na média quando comparados aos revestimentos contendo altas concentrações da nova carga (20% e 30%);
- Quando se analisa a evolução da corrente de fuga para os diversos revestimentos, ao longo dos ciclos, uma diferença nítida é evidenciada. Os revestimentos contendo altas concentrações da nova carga (20% e 30%) apresentaram correntes de fuga superiores aos demais revestimentos;
- Os revestimentos S95/A0/N5 e S75/A20/N5 apresentaram os melhores desempenhos.

Na análise do conteúdo harmônico durante os períodos de névoa, para o primeiro e quinto ciclo de ensaio, quando se utiliza a DHT como parâmetro de diagnóstico de envelhecimento, constatou-se:

- O crescimento dos valores da DHT durante o período do ensaio;
- O parâmetro não permite avaliar quais revestimentos apresentaram maior grau de envelhecimento entre si.

Na análise do conteúdo harmônico, durante os períodos de névoa para o primeiro e quinto ciclo de ensaio, quando se utiliza a razão entre as componentes de 3º e 5º harmônicos como parâmetro de diagnóstico de envelhecimento, constatou-se:

- Um crescimento significativo da razão durante o último período de aplicação da névoa salina para os revestimentos contendo altas concentrações da nova carga, isto é, possuem indícios de maior grau de envelhecimento, impactando no desempenho;
- O indicativo corrobora com as análises realizadas para a evolução da corrente de fuga ao longo do ensaio;
- A razão entre as componentes de 3º e 5º harmônicos evidencia mais a evolução da degradação do que a DHT.

Na análise da recuperação da hidrofobicidade foram utilizados dois métodos, o método *spray* e medição dos ângulos de contato.

Quando se analisa a recuperação pelo método do *spray*, constatou-se que:

- Imediatamente após o término do ensaio, os revestimentos apresentaram perdas parciais da hidrofobicidade, sendo a maior perda verificada para o revestimento S100/A0/N0;
- Análises realizadas em diferentes instantes de tempo apontaram que os revestimentos S95/A0/N5 e S75/A20/N5 retornaram, em menor período de tempo, ao grau de hidrofobicidade máximo em relação as demais amostras;
- Revestimentos contendo altas concentrações da nova carga (20% e 30%) apresentaram recuperação mais lenta da hidrofobicidade;

Ao analisar a hidrofobicidade por meio da medição do ângulo de contato estático, constatou-se que:

- Semelhante ao método *spray*, as amostras apresentaram perda parcial da hidrofobicidade, imediatamente após o término do ensaio.
- Poucos dias após o término do ensaio, os revestimentos apresentaram valores de ângulos próximos aos valores iniciais, medidos antes do início do ensaio;
- O método do ângulo de contato mostrou ser mais confiável, considerando resultados mostrados na literatura.

O aumento dos níveis de degradação provoca um aumento no conteúdo harmônico da corrente de fuga e ocasiona alterações nas propriedades do material, dentre elas, um maior tempo para recuperação da hidrofobicidade. Verificou-se, neste trabalho, que a razão entre as componentes de 3º e 5º harmônicos possui uma correlação com a recuperação da hidrofobicidade, analisada por meio do método *spray*. Altos valores para a diferença na razão das componentes harmônicas, em condições de névoa para o primeiro e quinto ciclo, indicaram um lento processo de recuperação da hidrofobicidade.

6.2 CONCLUSÕES

- Os revestimentos contendo a nova carga em sua composição apresentaram resultados promissores, em conformidade com os resultados obtidos nos ensaios. As composições que apresentaram os melhores resultados foram: S95/A0/N5 e

S75/A20/N5, mostrando-se viável para a aplicação como revestimentos poliméricos de isolamentos, em alta tensão;

- A razão entre as componentes de 3° e 5° harmônicos evidenciou mais a evolução da degradação do que a DHT;
- Verificou-se a existência de uma correlação entre a recuperação da hidrofobicidade e a razão entre as componentes de 3° e 5° harmônicos;
- A partir do método *spray*, revestimentos S95/A0/N5 e S75/A20/N5 apresentaram recuperação mais rápida da hidrofobicidade, em relação as demais amostras;
- A partir da medição do ângulo de contato, poucos dias após o término do ensaio, os revestimentos apresentaram valores de ângulos próximos aos valores iniciais, medidos antes do início do ensaio.

6.3 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação ao trabalho realizado, propõe-se:

- Aprimorar o método de processamento e mistura da nova carga à borracha de silicone empregando outras técnicas difundidas na literatura;
- Realizar ensaios de névoa salina com maiores períodos de duração e maiores estresses elétricos visando maior nível de degradação do isolamento;
- Realizar análises morfológicas dos revestimentos por meio de MEV;
- Estudar o comportamento dielétrico de revestimentos contendo a nova carga, aplicados a isoladores, por meio de medições em alta tensão;
- Buscar revestimentos que proporcionem maior resistência ao trilhamento elétrico e erosão na superfície por meio do teste de plano inclinado (IPT);
- Avaliar o efeito da radiação UV no desempenho de revestimentos poliméricos, contendo a nova carga, baseado em normas específicas;
- Investigar o desempenho de revestimentos submetidos a *flashover* sob condições de poluição artificial e névoa limpa;
- Estudar o comportamento de revestimentos contendo a nova carga sob tensões alternada e contínua;
- Aprimorar a classificação da hidrofobicidade pelo método *spray*, a partir do processamento digital de imagens.

REFERÊNCIAS

ALCOA. **Catálogo de Produtos - Hydrogard GP.** Disponível em: 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 Antõnio Echeverría, 2013.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power Systems Harmonics**, 2a. Ed. John Wiley& Sons, Ltd U.S.A. 2003

BÁNHHIDI, 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.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação agrícola.** Jaboticabal: Funep.4 ed.2006.

BASHIR, N.; AHMAD, H. **Odd harmonics and third to fifth harmonic ratios of leakage currents as diagnostic tools to study the ageing of glass insulators.** Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 17, n. 3, p. 819-832, 2010.

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

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

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

CHERNEY, E. A.; GORUR, R. S. **RTV silicone rubber coatings for outdoor insulators.** Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 6, n. 5, p. 605-611, 1999.

CHERNEY, E. A.; HACKAM, R.; KIM, S. H. **Porcelain insulator maintenance with RTV silicone rubber coatings.** Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 6, n. 3, p. 1177-1181, 1991.

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

COSTA, E. G. FERNANDES JR, D. **Guia de Experimento: Laboratório de Materiais Elétrico.** UFCG, 2000.

CHERNEY, E.; MARZINOTTO, M.; GORUR, R.; RAMIREZ, I.; LI, S.; EL-HAG, A.; TZIMAS, A. **End-of-life and replacement strategies for RTV silicone rubber coatings.** Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 21, n. 1, p. 253-261, 2014.

DENG, H.; HACKAM, R. AND CHERNEY, E. A. **Role of the Size of Particles of Alumina Trihydrate Filler on the Life of RTV Silicone Rubber Coating,** IEEE Trans. PD, Vol. 10, pp. 1012-1024,1995.

DENG, H.; HACKAM, R.; CHERNEY, E. A. **Influence of thickness, substrate type, amount of silicone fluid and solvent type on the electrical performance of RTV silicone rubber coatings.** IEEE Transactions on Power Delivery. Enero 1996, vol.11, n.1, p. 431-443, ISSN 0885-8977.

DUARTE, J. C. Princípios sobre Delineamentos em Experimentação Agrícola. Trabalho de Especialização. Universidade Federal de Goiás, 1996.

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

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.

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

GERMANO, A. D. **Análise da Degradação de Isolamentos Poliméricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 2010.

GHUNEM, R. At.; JAYARAM, S. H.; CHERNEY, E. **Suppression of silicone rubber erosion by alumina trihydrate and silica fillers from dry-band arcing under DC**. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 22, n. 1, p. 14-20, 2015.

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

GORUR, R. S.; CHERNEY, E.; DE TOURREIL, C.; DUMORA, D.; HARMON, R.; HERVIG, H.; WIITANEN, D. **Protective coatings for improving contamination performance of outdoor high voltage ceramic insulators**. Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 10, n. 2, p. 924-933, 1995.

GUIDE, S. T. R. I. 92/1. **Hydrophobicity classification guide**, 1992.

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

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

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

ISOLADORES SANTA TEREZINHA. **Isoladores de Suspensão de Vidro: Catálogo do fabricante**. Campinas: [s.n.], 2002.

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.

MADIDI, F.; MOMEN, G.; FARZANEH, M. **Effect of filler concentration on dielectric properties of RTV silicone rubber/TiO₂ nanocomposite**. In: Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE. IEEE, 2013. p. 272-275.

MESA, J. A. **Temas de Ingeniería Eléctrica**. Editorial Felix Varela. La Habana, 2009.

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.; OMRANIPOUR, R.; JAYARAM, S.; CHERNEY, E. **The effect of ATH and silica on tracking and erosion resistance of silicone rubber compounds for outdoor insulation.** In: Electrical Insulation, 2002. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on. IEEE, 2002.
- 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.
- NBR 6936. **Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão.** ABNT, 1992.
- NBR 10621. **Isoladores utilizados em sistemas de alta tensão em corrente alternada - Ensaio de poluição artificial.** ABNT, 2005.
- NEVES, W. L. A. **Apostila Materiais Elétricos.** UFCG, 2001.
- PRESSI, R. A.; RESENER, M.; RAMOS, M. **Avaliação Econômica da Inspeção Preventiva de Isoladores de Linhas de Transmissão Através da Emissão de Corona.** In CIDEL, Argentina, 2014.
- 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.
- 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.
- SEYEDMEHDI, S. A.; ZHANG, H.; ZHU, J. **Influence of production method, silicone type and thickness on silicon rubber superhydrophobic coatings.** Progress in Organic Coatings, v. 90, p. 291-295, 2016.
- SIDERAKIS, K.; AGORIS, D.; GUBANSKI, S. M. **Salt fog evaluation of RTV SIR coatings with different fillers.** Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 23, n. 4, p. 2270-2277, 2008.
- SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais.** McGraw Hill Brasil, 2013.
- SU, H., JIA, Z.; GUAN, Z.; LI, L. **Mechanism of contaminant accumulation and flashover of insulator in heavily polluted coastal area.** Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 17, n. 5, p. 1635-1641, 2010.
- SUWARNO; PRATOMOSIWI, F. **Application of RTV Silicone Rubber Coating for Improving Performance of Ceramic Outdoor Insulator under Polluted Condition.** International Conference on Electrical Engineering and Informatics. 2009.
- TARIQ NAZIR, M.; PHUNG, B. T.; HOFFMAN, M. **Effect of AC corona discharge on hydrophobic properties of silicone rubber nanocomposites.** In: Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 2015 IEEE 11th International Conference on the. IEEE, 2015. p. 412-415.
- TOUSI, A. Aziz; MIRZAIE, M. **Impact of Pollution Location on Time and Frequency Characteristics of Leakage Current of Porcelain Insulator String under Different Humidity and Contamination Severity.** Journal of Operation and Automation in Power Engineering, v. 1, n. 2, 2013.
- VALCARCE, M. B.; BUSALMEN, J. P.; SÁNCHEZ, S. R. (2002) **The influence of the surface condition of the adhesion of Pseudomonas fluorescens (ATCC 17552) to copper and aluminium brass.** International. Biodeterioration and Biodegradation. 50, 61-66.

VENKATESULU, B.; THOMAS, M.J. **Erosion resistance of alumina-filled silicone rubber nanocomposites.** Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 17, n. 2, p. 615-624, 2010.

VENKATESULU, B.; THOMAS, M. J. **Studies on the tracking and erosion resistance of RTV silicone rubber nanocomposite.** In: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008. Annual Report Conference on. IEEE, 2008. p. 204-207.

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.

ZHAO, T.; R. BERNSTORF, A. **Ageing tests of polymeric housing materials for non-ceramic insulators.** Electrical Insulation Magazine, IEEE, 1998.

ZISMAN, W. A. **Influence of constitution on adhesion.** Pages 33-71 in Handbook of Adhesives. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1976.

GLOSSÁRIO

Arcos de bandas secas: Arcos elétricos que ocorrem entre locais úmidos e secos sobre a superfície contaminada de um isolador.

Erosão: Perda localizada e gradual de massa que ocorre pela ação de descargas superficiais.

Flashover: Descarga disruptiva que ocorre através do ar ou em torno da superfície de um dielétrico sólido, ocasionado por aplicação de tensão em que o caminho de ruptura torna-se suficientemente ionizado para manter um arco elétrico.

Silanização: Tratamento químico com compostos de silício visando promover a união química entre cargas orgânica e inorgânica.

Trilhamento elétrico: Degradação progressiva da superfície de um material isolante sólido devido a ocorrência de descargas locais, resultando na formação de um caminho condutivo.

Vulcanização polimérica: Alteração da estrutura química da borracha através de um processo de reticulação, em que cadeias poliméricas lineares produzem polímeros tridimensionais com alta massa molar, tornando a estrutura do polímero mais rígida e conferindo propriedades elásticas ao material.