



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas e Controle de Energia

ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE UMIDADE EM PARA-RAIOS POLIMÉRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

Autora: Daiana Antonio da Silva

Orientador: Prof. Dr. José Pissolato Filho

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Energia Elétrica.**

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Pissolato Filho — DSCE/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta — DSEE/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira — DEE/UFCG

Campinas – SP
Maio de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Si38a Silva, Daiana Antonio da
Análise da penetração de umidade em para-raios
poliméricos de distribuição / Daiana Antonio da Silva. --
Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: José Pissolato Filho.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Para-raios. 2. Descargas elétricas. 3. Corrente
elétrica. 4. Compósitos poliméricos. I. Pissolato Filho,
José. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Analysis of moisture ingress into polymeric surge arresters used in
distribution energy systems

Palavras-chave em Inglês: Surge arresters, Electrical discharges, Electrical current,
Polymer composites

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Tarso Vilela Ferreira, Geraldo Peres Caixeta

Data da defesa: 25-05-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE Mestrado

Candidata: Daiana Antonio da Silva

Data da Defesa: 25 de maio de 2012

Título da Tese: "Análise da Penetração de Umidade em Para-raios Poliméricos de Distribuição"

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Presidente): _____

Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira: _____

Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta: _____

Aos meus pais, Manoel e Maria Madalena,
à minha irmã Silvia e ao meu irmão Marcio,
ao meu cunhado Claudemir e minha cunhada Evelyn,
aos meus sobrinhos Tiago, Mariana, Gustavo e Ana Julia
e ao Elson.

Agradecimentos

À Deus por guiar meus passos e iluminar o meu caminho nessa jornada.

Aos meus pais, Manoel e Maria Madalena, pelo amor, dedicação, confiança e exemplo concedidos à mim durante toda minha vida.

À minha irmã Silvia e ao meu irmão Marcio, pelo apoio incondicional e incentivo mesmo nas horas mais difíceis.

Aos meus sobrinhos Tiago, Mariana, Gustavo e Ana Julia que mesmo longe abrandam o meu coração e me enchem de alegria.

Ao Elson, pelo companheirismo, amizade e carinho sem os quais certamente meus dias teriam sido extremamente difíceis.

Ao professor José Pissolato pela oportunidade concedida, confiança no meu trabalho, orientação e amizade.

Ao Jorge Franco e Rodolfo pelas conversas e discussões.

Aos amigos do laboratório de Alta Tensão da Unicamp (André Jinno, Eduardo, Francisco Brito, Humberto, José Bonfitto e Marcus).

Ao Kari Lahti pelo esclarecimento ao longo da pesquisa.

À equipe do projeto de P&D 1103 da Aneel (Sanderson, Marcel, Eduardo Gastaldi) e à Energisa pelo suporte técnico e financeiro.

Ao meu amigo Juliano pelo convívio e por sempre me ouvir.

Aos meus professores do colegial Ilza, Iranildo e Maribel e à todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

Ao programa de pós-graduação da UNICAMP, pela estrutura e apoio para que essa dissertação fosse desenvolvida.

À CNPQ e a Capes pelo apoio financeiro.

Resumo

Sistemas de energia elétrica estão constantemente sujeitos à sobretensões classificadas como internas, decorrentes de operações de manobras e chaveamento no próprio sistema; ou sobretensões decorrentes de agentes externos, por exemplo, descargas atmosféricas. Em ambas as situações, para-raios de óxido de zinco (ZnO) tem sido uma solução eficaz, tanto para os transitórios lentos e oscilatórios quanto para os transitórios rápidos e impulsivos. A utilização de para-raios de óxido de zinco com invólucro polimérico nesses casos é relativamente recente, recorrendo a meados dos anos 80. As informações sobre o desempenho elétrico desses dispositivos ao longo de anos de uso ou quando submetidos a condições críticas de operação são escassas e pouco difundidas na literatura técnica disponível. Dessa forma, uma análise criteriosa é proposta para avaliar o desempenho elétrico de para-raios com invólucro de silicone utilizados nos sistemas de distribuição de energia elétrica, em função da degradação físico-química dos mesmos. São realizados, então, 3 meses de ensaio de imersão/envelhecimento das amostras em água com cloreto de sódio à temperatura de 90 °C, visando representar 20 anos de aplicação do dispositivo em campo. A avaliação do desempenho elétrico é realizada através de medições periódicas da corrente de fuga e da tensão residual, enquanto a avaliação físico-química é obtida através da qualificação do invólucro de silicone utilizado nos para-raios por meio da classificação do grau de hidrofobicidade.

Palavras-chave – Para-raios, Descargas Elétricas, Corrente Elétrica, Compósitos Poliméricos.

Abstract

Electric power systems are constantly subjected to internal overvoltages, i.e. resulting from switching and mechanical operations in the system, or then overvoltages resulting from external causes, e.g. atmospheric surges. In both situations, metal-oxide surge arresters have been an efficacious solution for fast and impulsive electromagnetic transients as well as for slow and oscillatory transients. The use of polymeric metal oxide surge arresters, against atmospheric surges as well as for switching operations, is a relatively recent, dating back to the 1980s. However, the information on the electrical performance of these devices throughout the years of use, or when submitted to critical conditions of operation, is scarce and poorly discussed in the available technical literature. Thus, a thorough analysis is proposed to evaluate the electrical performance of surge arresters with silicone housing, commonly applied in the distribution network, as a function of their physical-chemical degradation. In order to represent 20 years of the field device, 3 months of immersion test/aging in water with sodium chloride at a temperature of 90 degrees will be performed. The evaluation will be through periodic measurements of the leakage current and residual voltage. Another objective is to describe the silicone housing used in surge arresters for classifying the degree of hydrophobicity.

Key-words – Surge Arresters, Electrical Discharges, Electrical Current, Polymeric Composites.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Principais causas de falhas em para-raios (figura adaptada [3]).	2
Figura 2.1 - Para-raios de Sperry [25].	8
Figura 2.2 - Centelhador tipo chifre (figura adaptada [27]).	10
Figura 2.3 - Centelhador tipo chifre com haste antipássaro (figura adaptada [27]).	10
Figura 2.4 - Para-raios eletrolítico/químico (figura adaptada [28]).	12
Figura 2.5 - Para-raios de Carboneto de silício (Figura adaptada [28]).	14
Figura 2.6 - Para-Raios de ZnO com Invólucro de Porcelana.	15
Figura 2.7 - Para-raios do tipo pré-moldado (figura adaptada [29]).	18
Figura 2.8 - Para-raio diretamente injetado (figura adaptada [29]).	19
Figura 2.9 - Circuito equivalente para o varistor de ZnO (figura adaptada [30]).	20
Figura 2.10 - Modelo do circuito equivalente do para-raios de ZnO (figura adaptada [18]).	21
Figura 2.11 - Regiões de condução de corrente do para-raios de ZnO (figura adaptada [30]).	22
Figura 2.12 - Estrutura química do EPDM (figura adaptada [33]).	26
Figura 2.13 - Estrutura química do polidimetilsiloxano (figura adaptada [33]).	27
Figura 3.1 - Vista frontal do tanque usado no ensaio de imersão.	35
Figura 3.2 - Resistência de sobreborda com termostato.	38
Figura 3.3 - Resistência de sobreborda.	38
Figura 3.4 - Esquema elétrico de medição da corrente de Fuga.	41
Figura 3.5 - Esquema de medição da tensão residual.	43
Figura 4.1 - Condutividade da solução durante o ensaio de imersão.	45
Figura 4.2 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante A.	47

Figura 4.3 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante A - 12º ciclo (amostras 1, 2, 3, 4 e 5).	49
Figura 4.4 - Amostra 2 na nona medição da corrente de fuga.	50
Figura 4.5 - Falha da amostra 2 pertencente ao fabricante A.	51
Figura 4.6 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante B.	53
Figura 4.7 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante B – 5º ciclo (amostra 6), 6º ciclo (amostra 10), 8º ciclo (amostra 8) e 12º ciclo (amostras 7 e 9).	54
Figura 4.8 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante C.	57
Figura 4.9 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante C – 12º ciclo (amostras 11, 12, 13, 14 e 15).	59
Figura 4.10 - Detalhes dos mecanismos de degradação da amostra 15 do fabricante C.	60
Figura 4.11 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante D.	61
Figura 4.12 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante D – 1º ciclo (amostras 19 e 20) e 2º ciclo (amostras 16, 17 e 18).	63
Figura 4.13 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante E.	65
Figura 4.14 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante E – 12º ciclo (amostras 21, 22, 23, 24 e 25).	66
Figura 4.15 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão na amostra retirada de campo do fabricante A.	67
Figura 4.16 - Comportamento da corrente de fuga na amostra retirada de campo do fabricante A – 12º ciclo.	68
Figura 4.17 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão na amostra retirada de campo do fabricante B.	69

Figura 4.18 - Corrente de fuga da amostra 27 do fabricante B após 1º ciclo de imersão.....	70
Figura 4.19 - Comportamento da corrente de fuga na amostra retirada de campo do fabricante B – 9º ciclo.....	71
Figura 4.20 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão na amostra retirada de campo do fabricante C.	72
Figura 4.21 - Comportamento da corrente de fuga na amostra retirada de campo do fabricante C – 12º ciclo.....	73
Figura 4.22 - Percentual de falha por fabricante ao longo do ensaio de imersão..	74
Figura 4.23 - Perfil de ocorrência de falhas ao longo do ensaio de imersão.	74
Figura 4.24 - Relação entre a corrente de fuga medida no 1º e no 12º ciclo do ensaio de imersão/envelhecimento.	75
Figura 4.25 - Impulso atmosférico aplicados às amostras ao longo do ensaio de imersão.....	76
Figura 4.26 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante A.....	77
Figura 4.27 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante B.....	78
Figura 4.28 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante C.....	79
Figura 4.29 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante D.....	80
Figura 4.30 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante E.....	80
Figura 4.31 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Amostras retiradas de campo.....	81
Figura 5.1 - Classes de hidrofobicidade segundo o Guia STRI.....	87
Figura 5.2 - Hidrofobicidade perdida – amostras do fabricante A.....	90
Figura 5.3 - Hidrofobicidade perdida – amostras do fabricante B.....	90
Figura 5.4 - Hidrofobicidade perdida – amostras do fabricante C.	91

Figura 5.5 - Hidrofobicidade perdida – amostras do fabricante E.....	92
Figura 5.6 - Hidrofobicidade perdida – amostra 26 do fabricante A e amostra 28 do fabricante C.....	92
Figura 5.7 - Hidrofobicidade recuperada – amostras do fabricante A.	94
Figura 5.8 - Hidrofobicidade recuperada – amostras do fabricante B.	95
Figura 5.9 - Hidrofobicidade recuperada – amostras do fabricante C.	95
Figura 5.10 - Hidrofobicidade recuperada – amostras do fabricante E.	96
Figura 5.11 - Hidrofobicidade recuperada – amostra 26 do fabricante A e amostra 28 do fabricante C.	96
Figura 5.12 – Hidrofobicidade pós ensaio de imersão.	98
Figura A.1 - Fabricante A.	111
Figura A.2 - Fabricante B.	111
Figura A.3 - Fabricante C.	111
Figura A.4 - Fabricante D.	112
Figura A.5 - Fabricante E.	112
Figura A.6 - Amostras usadas - Fabricantes A, B e C.....	112
Figura B.1 - Amostra 2 - Fabricante A.....	113
Figura B.2 - Amostra 8 - Fabricante B.....	114
Figura B.3 - Amostra 13 - Fabricante C.....	114
Figura B.4 - Amostra 18 - Fabricante D.....	115
Figura B.5 - Amostra 23 - Fabricante E.....	115

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Para-raios de distribuição com invólucro de silicone usados no ensaio.	34
Tabela 4.1 - Síntese do comportamento da tensão residual.	82
Tabela 5.1 - Para-raios submetidos à análise de hidrofobicidade pós imersão.....	88
Tabela 5.2 - Hidrofobicidade perdida (Hp) – pós imersão.	93
Tabela 5.3 – Hidrofobicidade Recuperada (Hr) – pós imersão	97

Sumário

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
1.5 TRABALHO PUBLICADO	6
CAPÍTULO 2. PARA-RAIOS DE DISTRIBUIÇÃO	7
2.1 ASPECTOS GERAIS	7
2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS PARA-RAIOS	8
2.2.1 Centelhadores com dielétrico de ar	9
2.2.2 Para-raios eletrolítico/químico	11
2.2.3 Para-raios tipo expulsão.....	12
2.2.4 Para-raios de óxido de filme.....	13
2.2.5 Para-raios de carboneto de silício (SiC)	13
2.2.6 Para-raios de óxido de Zinco (ZnO) com invólucro de porcelana	14
2.2.7 Para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) com invólucro polimérico	15
2.3 DETALHES CONSTRUTIVOS DOS PARA-RAIOS COM INVÓLUCRO POLIMÉRICO	17
2.3.1 Para-raios tipo tubo.....	17
2.3.2 Para-raios do tipo pré-moldado	17
2.3.3 Para-raios do tipo diretamente injetados	18

2.4	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS PARA-RAIOS ZNO	20
2.4.1	Região de campo elétrico baixo	22
2.4.2	Região de campo elétrico médio	23
2.4.3	Região de campo elétrico elevado	24
2.5	INVÓLUCRO POLIMÉRICO	24
2.5.1	Propriedades dos compostos de Borracha de EPDM.....	25
2.5.2	Propriedades dos compostos de Borracha de silicone	27
2.6	MECANISMOS DE PENETRAÇÃO DE UMIDADE EM PARA-RAIOS POLIMÉRICOS	29
CAPÍTULO 3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA E PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE IMERSÃO ..		33
3.1	ASPECTOS GERAIS	33
3.2	PARA-RAIOS SUBMETIDOS AO ENSAIO	34
3.3	TANQUE PARA IMERSÃO	34
3.4	RESISTÊNCIAS DE AQUECIMENTO	36
3.5	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	39
3.5.1	Medição da corrente de fuga.....	41
3.5.2	Medição da tensão residual.....	42
CAPÍTULO 4. ANÁLISE DO DESEMPENHO ELÉTRICO DOS PARA-RAIOS		45
4.1	ASPECTOS GERAIS	45
4.2	COMPORTAMENTO DA CORRENTE DE FUGA	46
4.2.1	Fabricante A.....	46
4.2.2	Fabricante B.....	52
4.2.3	Fabricante C	57
4.2.4	Fabricante D	61
4.2.5	Fabricante E.....	64
4.2.6	Fabricante A – Amostra usada.....	67
4.2.7	Fabricante B – Amostra usada.....	69

4.2.8	Fabricante C – Amostra usada.....	72
4.2.9	Análise dos resultados	73
4.3	COMPORTAMENTO DA TENSÃO RESIDUAL.....	76
4.3.1	Fabricante A.....	76
4.3.2	Fabricante B.....	77
4.3.3	Fabricante C	78
4.3.4	Fabricante D	79
4.3.5	Fabricante E.....	80
4.3.6	Amostras usadas	81
4.3.7	Análise dos resultados	81
CAPÍTULO 5. ANÁLISE DA HIDROFOBICIDADE DOS PARA-RAIOS		85
5.1	ASPECTOS GERAIS	85
5.2	HIDROFOBICIDADE - PÓS ENSAIO DE IMERSÃO/ENVELHECIMENTO	88
5.2.1	Hidrofobicidade perdida (Hp).....	89
5.2.2	Hidrofobicidade recuperada (Hr)	93
5.2.3	Análise dos resultados	98
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES.....		101
CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		105
ANEXO A – PARA-RAIOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE IMERSÃO/ENVELHECIMENTO....		111
ANEXO B – DETALHES CONSTRUTIVOS		113

Capítulo 1. Introdução

1.1 Motivação

Os para-raios são equipamentos amplamente utilizados nos sistemas elétricos, seja como proteção à descargas elétricas incidentes sobre a rede ou às sobretensões provenientes de manobras do sistema. Sua expectativa de vida útil, mesmo sob circunstâncias adversas, varia entre 20 a 25 anos [1].

Para-raios de óxido de zinco (ZnO) sem centelhador, em condições normais de operação do sistema, possuem uma corrente de fuga que circula constantemente pelo equipamento, da ordem de micro amperes. Sob condições normais, esses para-raios devem se comportar como isoladores ou como condutores de baixa condutância. No entanto, diante de uma solicitação, devem ser capazes de mudar seu estado imediatamente, tornando-se excelentes condutores, escoando a corrente de descarga e absorvendo as sobretensões do sistema.

Os para-raios instalados nas redes de distribuição e transmissão ao redor do mundo, independente de modelo, tipo construtivo e material usado, ficam sujeitos continuamente a uma gama de diferentes estresses elétricos e ambientais. Nas áreas tropicais como o Brasil, esses estresses são formados principalmente pelos níveis normalmente elevados de umidade, temperatura e índice isoceráunico, sendo a penetração de umidade a grande responsável por falhas nos para-raios de ZnO com invólucro de porcelana [2, 3], conforme observado na Figura 1.1.

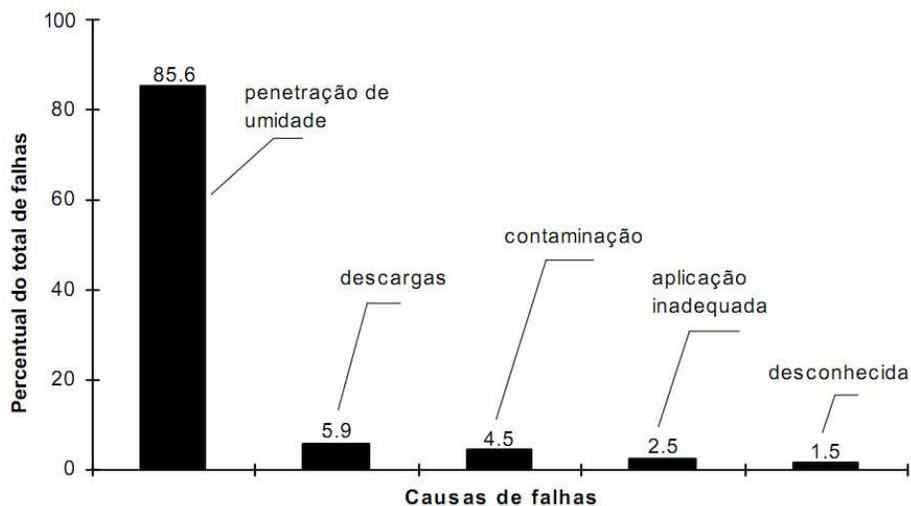


Figura 1.1 - Principais causas de falhas em para-raios (figura adaptada [3]).

Caso haja penetração de umidade nos para-raios a corrente de fuga que circula pelo dispositivo aumenta consideravelmente, gerando aquecimento e facilitando a degradação dos varistores ou ainda, no caso de para-raios com invólucro polimérico acelera a destruição da interface entre os elementos ativos e a parte interna do invólucro.

Como a utilização de invólucros poliméricos representa uma tecnologia consideravelmente nova, com menos de 30 anos, além da necessidade cada vez maior de proporcionar confiabilidade e segurança ao sistema, faz-se necessário um melhor entendimento do comportamento elétrico desses dispositivos, avaliando os agentes de degradação associados aos efeitos da umidade sobre os diferentes projetos construtivos dos para-raios poliméricos utilizados na rede elétrica de distribuição.

1.2 Objetivos

No Brasil, as concessionárias de energia e os grandes consumidores têm usado para-raios poliméricos desde o início dos anos 90 [4].

A aquisição desses dispositivos de proteção contra sobretensões atingiu patamares tão elevados que os mesmos representam hoje a maioria dos

para-raios instalados nos sistemas de distribuição e vem ganhando cada vez mais espaço na proteção de linhas de transmissão e subestações, com os para-raios de invólucros poliméricos, cujo material predominante é o silicone, e os constituídos de borracha de etileno propileno dieno (EPDM).

Sendo assim, o objetivo principal desse trabalho é avaliar a eficiência dos selos de vedação, ou seja, a estanqueidade dos para-raios de distribuição com invólucro de silicone através de um ensaio de imersão em água à temperatura de 90 °C com concentração de 1 kg/m³ de cloreto de sódio. Essa solução eletrolítica permite uma maior condutividade elétrica em caso de penetração de umidade nos para-raios e auxilia no processo de envelhecimento das amostras.

O monitoramento do desempenho elétrico dos para-raios submetidos ao ensaio será efetuado por meio de medições semanais da corrente de fuga e tensão residual para descarga atmosférica.

O trabalho busca ainda qualificar o silicone usado nas amostras por meio de análise comparativa da hidrofobicidade após o ensaio de imersão, de acordo com o Guia de Classificação de Hidrofobicidade [5].

1.3 Revisão Bibliográfica

Os primeiros para-raios usados em sistemas de energia tiveram aplicação entre 1896 e 1908. Esses dispositivos eram compostos inicialmente por um centelhador simples instalado entre a fase e o aterramento de equipamentos elétricos importantes ao sistema e em algumas terminações de linhas. No entanto, a atuação deste tipo de para-raios era fortemente influenciada pela pressão atmosférica e pela umidade relativa do ar [6].

A partir desse primeiro modelo, os para-raios passaram por inúmeras transformações e períodos de utilização conforme explicitado em [6]:

- A utilização do primeiro elemento não linear feito através de uma célula de alumínio, de 1908 a 1930;

- Os para-raios de óxido de filme, compostos pelo gap em série com células contendo peróxido de chumbo, de 1920 até aproximadamente 1955;
- Os blocos de varistores não lineares feitos de carbeto de silício que representou um novo marco na fabricação de para-raios, a partir de 1930, sendo utilizados até hoje. Essa tecnologia encontra-se atualmente em fase de desativação;
- E a partir de 1976, os para-raios de carbeto de silício encontraram concorrência com os primeiros para-raios de óxido de zinco lançados no mercado. Esse novo equipamento, inicialmente era composto por centelhador em série aos elementos não lineares, com o invólucro de porcelana, sendo mais tarde substituídos pelos para-raios de óxido de zinco sem centelhador.

Pela primeira vez desde o surgimento dos para-raios, sua aplicação em sistema de potência com o uso de centelhadores não se fazia mais necessário. A determinação da corrente de fuga que circulava pelo dispositivo e a sua estabilidade térmica tornavam-se, então, parâmetros de extrema importância para avaliar o desempenho desses equipamentos.

Em [3], testes de laboratório e análise de campo em para-raios de distribuição levantaram o perfil das falhas desses dispositivos, avaliando seu comportamento quando submetidos à penetração de umidade, contaminação e solicitações ligadas às descargas elétricas.

Com o desenvolvimento tecnológico cada vez mais acentuado, surgiu em meados dos anos 80 o para-raios de óxido de zinco com invólucro polimérico [7, 8], o qual ocupa hoje grande destaque no cenário mundial, principalmente no que diz respeito ao sistema elétrico de distribuição. A utilização de polímeros no invólucro de para-raios é abordada em [9], através da comparação entre a corrente de fuga e o envelhecimento dos invólucros de silicone e porcelana, quando estão instalados no campo e em condições simuladas.

Em [10] o autor aborda a importância de se evitar a penetração de umidade em isoladores com invólucros poliméricos, apontando essa como a causa principal de mau funcionamento desses dispositivos. Resultado semelhante ao descrito em [21] para os para-raios com invólucro de porcelana.

Segundo Grassie & Scott, citados em [11], a natureza orgânica dos polímeros implica em um envelhecimento e degradação mais rápido do que aquela evidenciada pelo material cerâmico do qual era constituída a porcelana, entretanto, quando nos referimos ao silicone essa afirmação torna-se falsa, pois apesar de fazer parte do grupo dos polímeros, este pertence à classe de polímeros inorgânicos conforme evidenciado em [12]. Buscando-se caracterizar os polímeros e obter informações sobre os agentes responsáveis pelo seu envelhecimento, em [13] é apresentada algumas técnicas de análise visual, elétrica e de material dos para-raios.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos mundialmente buscando qualificar e quantificar as falhas nos para-raios com invólucro polimérico seja através de ensaios relacionados à penetração de umidade conforme apresentado em [14], [15], [16] e [17] ou buscando representar o comportamento desses dispositivos através da simulação em laboratório para diferentes condições ambientais conforme [18] e [19].

Atualmente em [20] é apresentado ensaios específicos para os para-raios com invólucro polimérico, no entanto, faz-se necessário o desenvolvimento de novos estudos, englobando entre outros, os principais responsáveis por sua degradação conforme abordado detalhadamente em [15].

No Brasil apesar da utilização de para-raios de ZnO com invólucro polimérico ter seu início na década de 90, conforme apresentado na referência [4], não se tem conhecimento de pesquisas que analisem à fundo a estanqueidade dos dispositivos disponíveis no mercado, ou ainda, o comportamento desses quando sujeitos à envelhecimento acelerado por meio de ensaio de imersão. Dessa forma, as principais referências utilizadas no decorrer desse trabalho [15] e

[21] não são referências nacionais, com exceção do exposto em [22] com relação ao monitoramento da corrente de fuga e diagnóstico térmico de para-raios de ZnO.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

O capítulo 1 fornece uma visão geral sobre a utilização dos para-raios em sistemas elétricos, os principais fatores que levaram a escolha do tema e o objetivo desse trabalho, englobando ainda uma sucinta revisão bibliográfica e apresentando um trabalho publicado durante a pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a evolução dos para-raios, destacando os tipos construtivos dos dispositivos de ZnO com invólucro polimérico, o princípio de funcionamento, principais materiais utilizados na construção dos invólucros poliméricos e os principais mecanismos de penetração de umidade nos para-raios.

O capítulo 3 traz a descrição do sistema de imersão, equipamentos e procedimentos adotados para a realização do ensaio de imersão/envelhecimento, assim como os procedimentos para realização das medições elétricas.

O capítulo 4 caracteriza-se pela apresentação das análises elétricas: corrente de fuga e tensão residual ao longo de todo o ensaio e seus resultados.

O capítulo 5 aborda as análises qualitativas do silicone, representada pelo ensaio de hidrofobicidade realizado após o ensaio de imersão com envelhecimento das amostras.

O capítulo 6 apresenta as conclusões pertinentes ao trabalho.

1.5 Trabalho publicado

De Franco, J. L.; Pissolato, J.; Silva, D. A.; Batistela, N. J.; *Análise do comportamento dos pára-raios de óxido de zinco (ZnO) sem centelhadores frente às sobretensões temporárias em função da quantidade de energia absorvida*. XXI SNPTEE, Florianópolis – SC, 2011.

Capítulo 2. Para-raios de Distribuição

2.1 Aspectos gerais

As redes elétricas estão sujeitas a surtos de tensão que podem ser de origem interna ao sistema, provenientes de operações de manobra ou decorrentes de faltas; ou de origem externa, provocados por descargas atmosféricas. O efeito das sobretensões geradas sobre os terminais dos equipamentos depende consideravelmente de suas características construtivas e dos mecanismos de proteção do sistema.

No caso das descargas elétricas, a incidência de raios pode ocorrer diretamente sobre a rede, em cabos condutores, cabo guarda, torres, ou indiretamente, por meio de acoplamento magnético. A incidência do raio de forma direta pode ocasionar a descarga nos isoladores da rede provocando eventuais desligamentos do sistema elétrico. Quanto maior for a taxa de crescimento da frente de onda mais provável será a ocorrência de desligamentos devido às descargas nos isoladores [23].

Buscando proteger os principais equipamentos do sistema do efeito das sobretensões opta-se pela instalação de para-raios como dispositivo de proteção. Os para-raios limitam essas sobretensões nos terminais dos equipamentos à níveis aceitáveis, assegurando que as características de suportabilidade de isolamento desses equipamentos não sejam excedidos.

2.2 Evolução histórica dos para-raios

O conceito que deu início a evolução construtiva dos para-raios, seja ele de baixa, média ou alta tensão, ocorreu através da descoberta de Benjamin Franklin, em 1752. O para-raios de Franklin, como ficou conhecido, é constituído por três partes principais: mastro com captador, hastes de aterramento e cabo de ligação preso a isoladores.

Com o passar dos anos e o desenvolvimento dos meios de comunicação, surgiu a necessidade de proteger tais sistemas contra a incidência direta de raios. Dessa forma, as companhias de telégrafos foram as primeiras a utilizarem os para-raios para proteção de linhas [24]. No entanto, as linhas de telégrafo não eram energizadas durante todo o tempo e para que a proteção fosse estendida às linhas de transmissão de energia elétrica, modificações deveriam ser efetuadas nos para-raios, principalmente em relação à utilização de centelhadores simples, sem a capacidade de interromper a corrente de arco subsequente. Para que essa corrente fosse interrompida, a tensão do sistema deveria ser cortada, ou então, uma resistência inserida no momento do arco. Buscando uma solução para tal problema, Sperry patenteou em 1887 o para-raios apresentado na Figura 2.1.

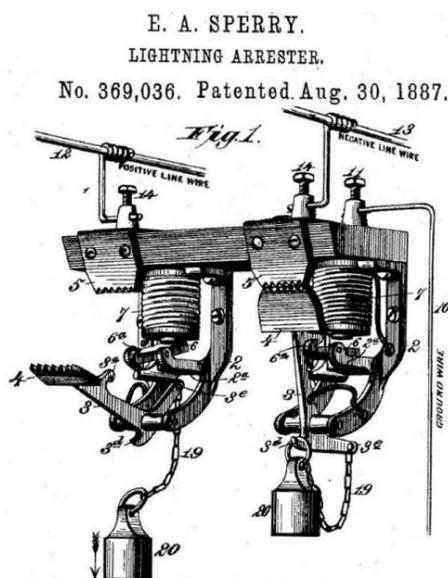


Figura 2.1 - Para-raios de Sperry [25].

Na ocorrência de uma descarga atmosférica, o centelhador atuava e por ele passava uma corrente subsequente, um pulso era então reconhecido pela bobina fazendo com que o peso indicado na Figura 2.1 abaixasse, permitindo assim a abertura dos contatos. Com a abertura dos contatos, aumentava-se o comprimento do arco e conseqüentemente a resistência, assim quando a tensão passasse por zero, o arco era interrompido [25].

O inconveniente desse dispositivo é que se fazia necessário uma manutenção dos contatos a cada atuação, fechando-os toda vez que o equipamento era acionado.

2.2.1 CENTELHADORES COM DIELÉTRICO DE AR

Os primeiros para-raios disponíveis comercialmente foram desenvolvidos pela empresa Stanley Electric, em Massachusetts [26]. Esses para-raios tiveram aplicação entre 1896 e 1908, sendo compostos inicialmente por um centelhador simples instalado entre a fase e o terra de equipamentos elétricos importantes ao sistema, em geral transformadores e em alguns finais de rede.

A interrupção do arco quando da atuação do dispositivo ocorria devido o aumento da resistência. O campo magnético empurrava o arco para as extremidades das hastes de descarga fazendo com que a corrente subsequente fosse interrompida automaticamente. No entanto, a atuação deste tipo de proteção, conhecido como centelhador/descarregador tipo chifre, era fortemente influenciada pela pressão atmosférica e pela umidade relativa do ar [6]. Outra desvantagem do dispositivo apresentado na Figura 2.2, relacionava-se às eventuais quedas de pássaros sobre o centelhador, ocasionando um curto-circuito entre seus terminais, levando ao desligamento do sistema e à morte da ave.

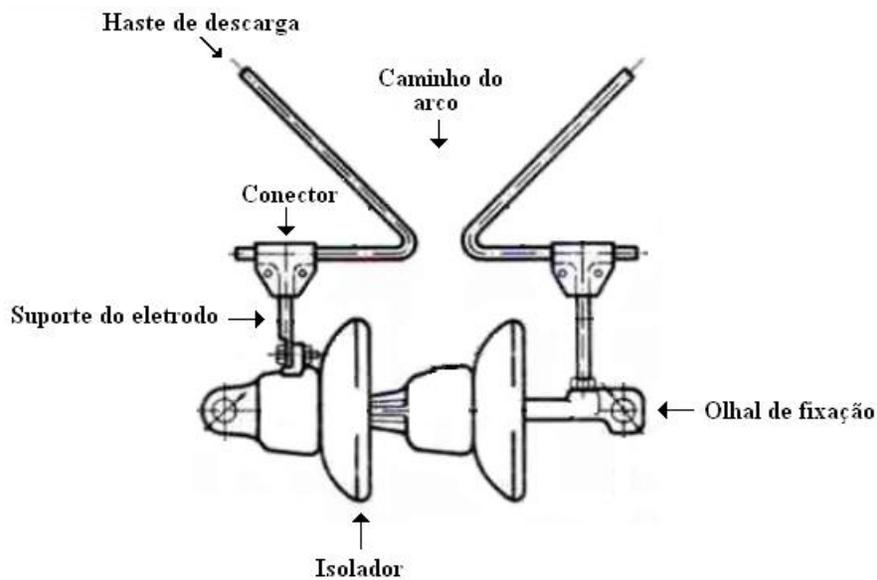


Figura 2.2 - Centelhador tipo chifre (figura adaptada [27]).

Buscando-se evitar desligamentos não planejados do sistema, o projeto construtivo do centelhador tipo chifre evoluiu para o modelo apresentado na Figura 2.3, onde uma haste antipássaro foi inserida entre as hastes de descarga.

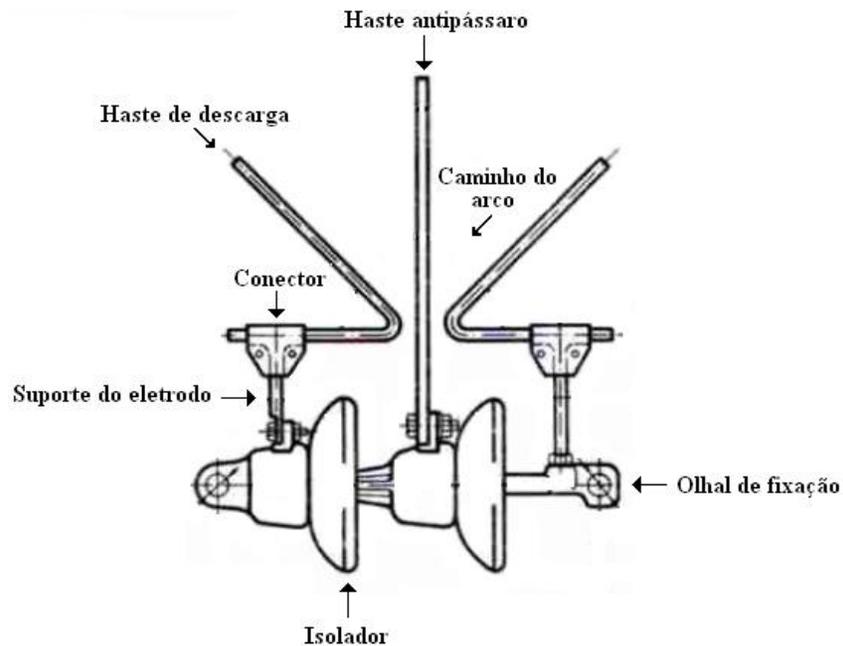


Figura 2.3 - Centelhador tipo chifre com haste antipássaro (figura adaptada [27])

A inserção da haste antipássaro mitigou o problema relacionado à queda das aves sobre o dispositivo, no entanto, os problemas relacionados ao fraco projeto construtivo continuaram [4].

2.2.2 PARA-RAIOS ELETROLÍTICO/QUÍMICO

Buscando-se uma melhoria no desempenho dos sistemas elétricos, principalmente frente às tensões mais elevadas, foi introduzido entre 1908 e 1930 o conceito de para-raios eletrolítico/químico [6]. Esse modelo foi o primeiro a utilizar um elemento de resistência não linear que limitava a passagem da corrente e permitia a interrupção do arco.

O para-raios consistia de um centelhador em série a um tanque contendo uma célula composta por duas placas de alumínio invertidas, em formato de cones separados entre si por um eletrólito líquido e coberto por uma fina película de hidróxido de alumínio. À medida que a tensão aumentava, a rigidez dielétrica do ar era rompida no centelhador, perfurando a película de hidróxido de alumínio e criando um caminho de menor resistência para a corrente através do eletrólito. Quando o valor de tensão era reduzido, a película se refazia, aumentando o valor da resistência e impedindo a passagem da corrente, interrompendo assim o arco [25].

O inconveniente do dispositivo, apresentado na Figura 2.4, situava-se no fato de que diariamente o centelhador deveria ser curto-circuitado para que surgisse entre os terminais do para-raios a tensão fase terra do sistema, pois caso não houvesse nenhuma atuação do para-raios, o filme formado pelo eletrólito se dissolveria gradualmente sem a presença da corrente circulando entre os seus terminais.

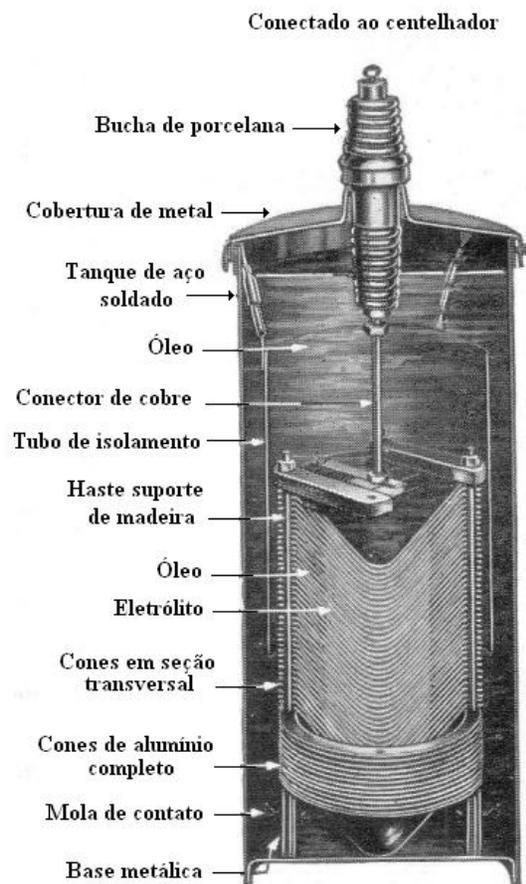


Figura 2.4 - Para-raios eletrolítico/químico (figura adaptada [28])

2.2.3 PARA-RAIOS TIPO EXPULSÃO

Em virtude dos problemas encontrados nos para-raios com centelhadores a ar, um novo projeto construtivo foi introduzido no setor elétrico a partir da patente de John Robert McFarlin, de 1918 [25]. O para-raios tipo expulsão, como ficou conhecido, era constituído por centelhadores montados em série dentro de um tubo isolante. Quando ocorria uma descarga, um tipo de resistor feito de carbeto de silício, de baixo valor ôhmico, aquecia o ar dentro do tubo aumentando assim o comprimento do arco expelindo-o para fora e fazendo com a corrente subsequente fosse interrompida quando a tensão passasse pelo zero.

2.2.4 PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE FILME

As grandes dimensões e a necessidade de constante manutenção dos para-raios formado pelas células de alumínio (para-raios eletrolíticos/químicos) levaram, em 1920, a evolução destes dispositivos de proteção de alta tensão aos para-raios formados por centelhadores em série com células contendo peróxido de chumbo [6]. As placas finais das células eram revestidas por uma camada isolante e quando essa isolação era rompida por uma descarga, a resistência tornava-se baixa e a corrente circulava pelo dispositivo. Esses dispositivos permaneceram no mercado até por volta de 1930 nas aplicações em transmissão e até 1955 nas aplicações em distribuição.

2.2.5 PARA-RAIOS DE CARBONETO DE SILÍCIO (SIC)

A partir do conhecimento adquirido com as diversas concepções de para-raios ao longo do tempo, novos materiais foram sendo testados na fabricação dos resistores não lineares. O primeiro para-raios de carboneto de silício foi patenteado por John Robert Mcfarlin, em 1926 [25]. Esse dispositivo era formado por centelhadores não ativos que isolavam o para-raios do sistema nas condições normais de operação e quando em atuação ajudava na extinção da corrente subsequente.

Entretanto, esse tipo construtivo, apesar de apresentar melhorias relacionadas ao tamanho e volume quando comparado aos para-raios anteriores, ainda requeria avanços para que as descargas ocorridas no centelhador, devido à pré-ionização do ar, fossem extintas ou ao menos reduzidas.

A partir de 1954, os para-raios de carbeto de silício passaram a apresentar centelhadores ativos, que ficavam dispostos de modo que o campo magnético produzido por uma bobina ou outro meio, era movidos de seu ponto de início até o centelhador onde a extinção do arco ocorria. A ação do campo magnético aumentava a capacidade de interrupção do centelhador por causa do alongamento e resfriamento do arco, reduzindo o aquecimento e erosão entre os pontos onde a descarga ocorria e minimizando as chances de reignição do arco

[6]. Apesar das melhorias alcançadas pelos para-raios de carbeto de silício ao longo de aproximadamente 50 anos, a impossibilidade de ampliar o desempenho das propriedades não lineares dos resistores, buscando a redução ou eliminação das correntes subsequentes, limitou a evolução tecnológica do dispositivo, mostrado na Figura 2.5.

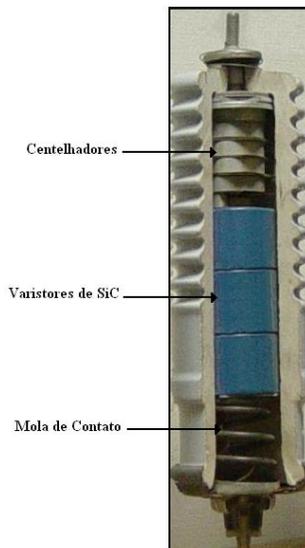


Figura 2.5 - Para-raios de Carboneto de silício (Figura adaptada [28]).

2.2.6 PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO (ZNO) COM INVÓLUCRO DE PORCELANA

A tecnologia base para a construção dos para-raios de óxido de zinco foi patenteada em 1968, entretanto, a produção desses elementos (varistores) capazes de suportar a tensão do sistema teve início apenas em 1976 [28].

Conforme comentado anteriormente, esse novo equipamento inicialmente era composto pelo centelhador em série aos elementos não lineares, com o invólucro de porcelana, sendo mais tarde substituídos pelos para-raios de óxido de zinco sem centelhador, como mostra a Figura 2.6.

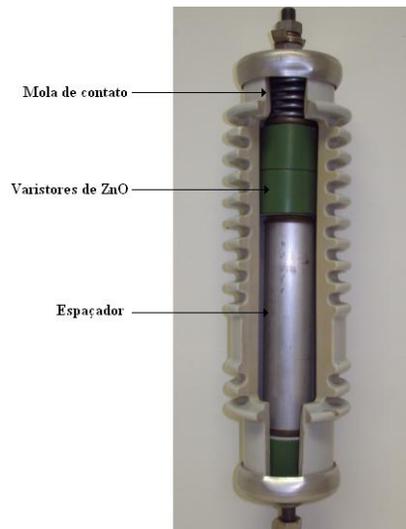


Figura 2.6 - Para-Raios de ZnO com Invólucro de Porcelana

A ausência dos centelhadores nos para-raios de ZnO só foi possível devido a enorme não linearidade dos varistores, referente as características de tensão x corrente, e as melhorias relacionadas ao aumento da capacidade de absorção e estabilidade térmica dos blocos.

Apesar das inúmeras melhorias alcançadas pelos para-raios de ZnO, quando comparados aos para-raios desenvolvidos anteriormente, o fator segurança era algo que ainda exigia mudanças imediatas. A utilização do invólucro de porcelana impossibilitava a fabricação de para-raios sem espaço interno de ar, o que exigia que para sua aplicação em alta tensão os mesmos fossem dotados de dispositivos de alívio de pressão. No entanto, na ocorrência de falhas, o aumento da pressão interna do para-raios submetia o invólucro de porcelana a um possível estilhaçamento caso o dispositivo de alívio de pressão não atuasse ou caso o mesmo não existisse.

2.2.7 PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO (ZNO) COM INVÓLUCRO POLIMÉRICO

Outro marco no desenvolvimento e desempenho dos para-raios ocorreu com a patente de Donald e Raudabaugh, de 1984, na qual o invólucro dos para-raios, até então feitos de porcelana, foi substituído pelo invólucro polimérico. No

entanto, o primeiro para-raios de ZnO com invólucro polimérico produzido comercialmente foi fabricado apenas em 1987, pela Ohio Brass [28].

Há diferentes tipos de polímeros usados como matéria base na fabricação dos invólucros de para-raios:

- Etileno acetato de vinila (EVA);
- Etileno propileno dieno (EPDM);
- Etileno propileno (EPM);
- Borracha etileno propileno (EPR);
- Borracha de silicone (SR).

Estes materiais não são usados em sua forma química pura, diferentes aditivos se fazem presente em sua composição, sendo suas características apresentadas no capítulo 3. Segundo DE NIGRIS et al., citado em [4], são várias as vantagens dos para-raios com invólucros poliméricos quando comparados aos para-raios com invólucros de porcelana:

- Redução das perdas de energia devido à menor corrente de fuga através do invólucro polimérico;
- Distância de escoamento maior considerando o mesmo comprimento do dispositivo;
- Menor peso, o que proporciona menores esforços mecânicos sobre as estruturas e, conseqüente, maior versatilidade nos arranjos de montagem;
- Geralmente não necessitam de dispositivos de alívio de pressão, com exceção do para-raios polimérico tipo tubo;
- Apresentam melhor dissipação de calor;
- Maior facilidade de transporte por não apresentarem problemas de trincas ou lascas nas saias;
- Maior nível de segurança em caso de falhas.

Essas vantagens em relação aos para-raios de porcelana têm facilitado a inserção desse novo dispositivo no sistema elétrico, principalmente nas redes de distribuição.

2.3 Detalhes construtivos dos para-raios com invólucro polimérico

Os para-raios com invólucro polimérico apresentam três concepções diferentes de projeto, abrangendo tanto projetos construtivos com volume interno de ar quanto aqueles em que sua concepção construtiva é desprovida da presença interna de ar.

2.3.1 PARA-RAIOS TIPO TUBO

Esse tipo construtivo assemelha-se aos para-raios de ZnO com invólucro de porcelana, apresentando certo volume interno de ar. O invólucro polimérico é diretamente injetado sobre o tubo de plástico reforçado com fibra de vidro que envolve os blocos de varistores e que proporciona a resistência mecânica do equipamento. A presença de ar interno, entre o tubo e a parte ativa faz com que esse tipo de para-raios seja dotado de um dispositivo de alívio de pressão.

2.3.2 PARA-RAIOS DO TIPO PRÉ-MOLDADO

Nesse tipo construtivo, representado na Figura 2.7, os varistores de óxido de zinco geralmente são envoltos em um tubo de fibra de vidro impregnado com resina epóxi, e o invólucro polimérico é posteriormente aplicado sobre o tubo através de um processo de moldagem. A região de interface entre a parte interna do invólucro e a fibra de vidro é preenchida com silicone, evitando a presença interna de ar.

Assim como nos para-raios poliméricos com certo volume de ar interno, o para-raios do tipo pré-moldado apresenta o tubo de fibra de vidro como principal

responsável pela resistência mecânica do dispositivo. O projeto desse tipo de para-raios é relativamente simples, permitindo assim uma fabricação de baixo custo, mas os processos de fechamento do dispositivo e preenchimento da interface devem ser criteriosamente definidos de forma a assegurar boa qualidade do sistema de vedação.

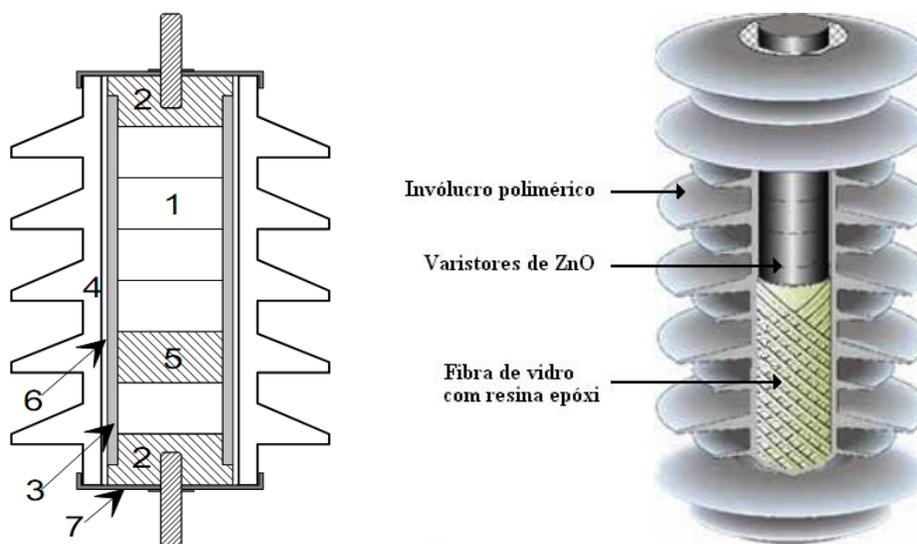


Figura 2.7 - Para-raios do tipo pré-moldado (figura adaptada [29]).

Onde:

1. Resistores não lineares;
2. Terminações metálicas;
3. Suporte mecânico;
4. Invólucro polimérico;
5. Espaçadores;
6. Interface entre o invólucro polimérico e o suporte mecânico;
7. Flanges metálicas.

2.3.3 PARA-RAIOS DO TIPO DIRETAMENTE INJETADOS

Nesse tipo construtivo os blocos de varistores não são envoltos por um tubo de fibra de vidro como acontece nos para-raios do tipo pré-moldado. A montagem dos blocos de varistores é feita com alta compressão, o que fornece

certa resistência mecânica ao dispositivo, entretanto, a suportabilidade à tração é fornecida pelas hastes de plásticos envoltas em fibra de vidro que são pré-tensionadas axialmente, ligando internamente os dois terminais metálicos localizados nas extremidades dos para-raios, conforme verificado na Figura 2.8.

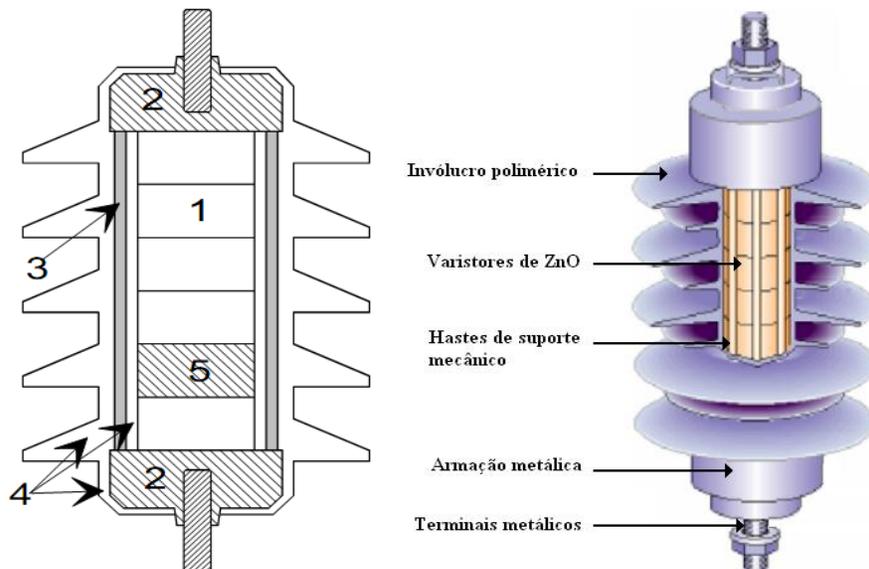


Figura 2.8 - Para-raio diretamente injetado (figura adaptada [29]).

Onde:

1. Resistores não lineares;
2. Terminações metálicas;
3. Suporte mecânico;
4. Invólucro polimérico;
5. Espaçadores;
6. Interface entre o invólucro polimérico e o suporte mecânico.

O invólucro polimérico é diretamente injetado sobre os blocos de varistores, impossibilitando a formação interna de ar. Como o polímero fica em contato direto com os elementos ativos do para-raios, a troca de calor com o meio externo ocorre de forma mais fácil quando comparado aos outros tipos construtivos [29]. Devido ainda às suas características mecânicas, esse tipo é

amplamente usado em sistemas de alta tensão, enquanto que os para-raios pré-moldados são mais utilizados em sistemas de média tensão.

2.4 Princípio de funcionamento dos para-raios ZnO

O princípio de funcionamento dos para-raios de ZnO deve-se basicamente à característica tensão x corrente dos elementos não lineares (varistores). O varistor segundo Matsuoka, citado em [30], pode ser definido como uma cerâmica cuja carga principal é o ZnO (óxido de zinco) acrescentado de uma série de outros aditivos, como Bi_2O_3 (óxido de bismuto), CoO (óxido de cobalto), Cr_2O_3 (óxido de cromo), MnO (óxido de manganês) e Sb_2O_3 (trióxido de antimônio), os quais são prensados e levados a sinterização. Os grãos de óxido de zinco que formam o varistor apresentam uma baixa resistividade e são cercados por uma camada granular de óxido altamente resistiva, normalmente rica em óxido de bismuto. Esses varistores podem ser representados através de um circuito equivalente mostrado na Figura 2.9, dependentes da indutância (L) do disco, que por sua vez é definida pela geometria da passagem da corrente de fuga, da resistência dos grãos de ZnO (R_g), da resistência não linear (R_p) criada pela barreira granular e da capacitância (C), fortemente dependente da constante dielétrica da barreira granular que varia de acordo com o fabricante.

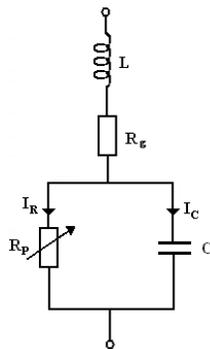


Figura 2.9 - Circuito equivalente para o varistor de ZnO (figura adaptada [30]).

Atualmente os para-raios de óxido de zinco podem ser representados por inúmeros circuitos equivalentes. De acordo com Bak, Mikkelsen & Tolsstrup, citados em [15], um modelo geral de representação do circuito equivalente desse equipamento de proteção é apresentado na Figura 2.10.

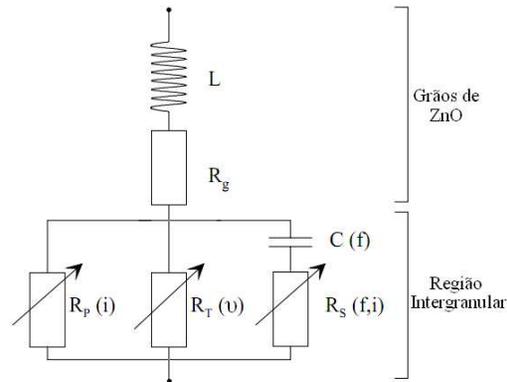


Figura 2.10 - Modelo do circuito equivalente do para-raios de ZnO (figura adaptada [18]).

Onde:

L : Indutância no elemento e cabos de conexão;

R_g : Resistência dos grãos de ZnO;

$R_p(i)$: Resistência não linear, refletindo as características DC de tensão x corrente;

$R_T(u)$: Resistência não linear, representando a dependência com a temperatura;

$R_S(f,i)$: Resistência não linear, representando a dependência com a frequência e corrente;

C : Capacitância do para-raios.

O fato do para-raios de ZnO não ser constituído por centelhadores faz com que o mesmo fique sujeito constantemente à tensão fase-terra do sistema, de modo que circule através dele uma corrente de fuga, que em condições normais de operação, para os para-raios de 11 kV/10 kA, possui valor entre 600 e 800 μ A. Essa corrente de fuga, apresenta três regiões distintas de condução, que depende da tensão aplicada entre os terminais do para-raios: uma região de campo elétrico

baixo (Região 1), campo elétrico médio (Região 2) e campo elétrico elevado (Região 3). Essas regiões podem ser observadas através da Figura 2.11.

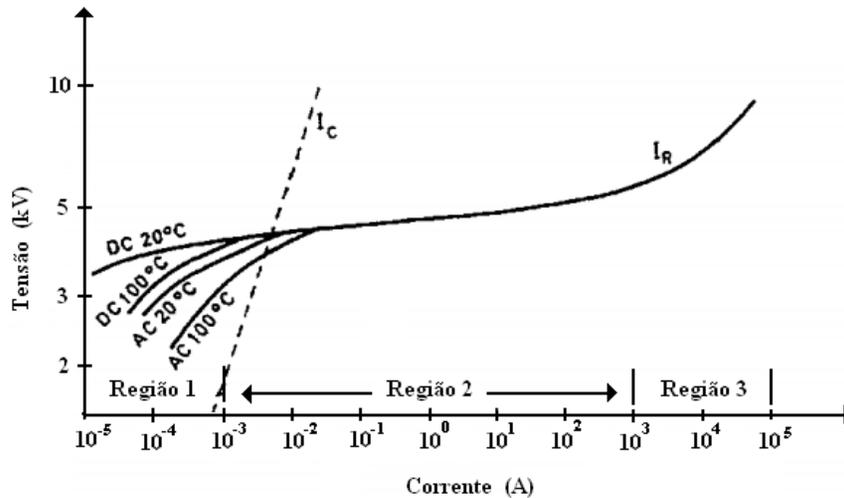


Figura 2.11 - Regiões de condução de corrente do para-raios de ZnO (figura adaptada [30]).

2.4.1 REGIÃO DE CAMPO ELÉTRICO BAIXO

Quando os para-raios são submetidos à uma tensão abaixo da máxima tensão de operação contínua (MCOV), observa-se uma relação praticamente linear entre tensão x corrente para os elementos de ZnO, com uma impedância extremamente elevada, da ordem de mega ohms. A capacitância intrínseca do bloco de varistor é constante nessa região.

De acordo com o exposto em [30], os mecanismos de condução nesta região são determinados pelas barreiras de energia na camada granular. Essas barreiras impedem a movimentação livre dos elétrons de um grão ao outro, no entanto, a aplicação de um campo elétrico reduz o efeito dessa barreira e os elétrons passam a se movimentar termoionicamente. Essa movimentação é conhecida como Emissão Schottky, sendo caracterizada por um decréscimo na barreira de potencial entre grãos devido ao campo elétrico aplicado, permitindo o movimento de elétrons através da barreira. Dessa forma quanto maior a tensão aplicada, mais fácil se torna a movimentação dos elétrons entre grãos. Essa característica destaca sobretudo a dependência da corrente com a temperatura.

A MCOV dos para-raios deve ser definida na primeira região, pois a corrente de fuga que circula através do dispositivo quando a tensão aplicada encontra-se dentro desse limite é uma corrente predominantemente capacitiva, o que implica em valores baixíssimos para a componente resistiva. Sendo a componente resistiva da corrente de fuga, responsável pela dissipação de energia nos para-raios, quanto menor for o seu valor, menor também serão as perdas ôhmicas no dispositivo. Nesta região, as propriedades elétricas principais são determinadas pela capacitância, pela temperatura e pelas perdas CA e CC, na região dos limites dos grãos [5].

De acordo com [23], considerando-se a mesma intensidade de campo elétrico aplicado ao para-raios, a componente resistiva da corrente de fuga para a tensão CA é maior do que a componente resistiva quando se aplica tensão CC.

2.4.2 REGIÃO DE CAMPO ELÉTRICO MÉDIO

A corrente de fuga que circula pelo para-raios é composta de uma componente capacitiva e outra resistiva. À medida que a tensão vai aumentando, a corrente de fuga apresenta um aumento da componente resistiva, que pode ser explicado pela significativa redução da resistividade das camadas entre grãos, fazendo com que a impedância que outrora era da ordem mega ohms, se reduza significativamente. Essa redução cria um caminho para que a corrente de descarga ou sobrecarga seja escoada mais facilmente.

O campo elétrico responsável por esse aumento da corrente de fuga denomina-se campo elétrico de corte ou ruptura. A tensão associada a esse campo é a tensão de referência, que de acordo com a definição apresentada em [20], é o valor eficaz da tensão aplicada ao para-raios até que circule por ele a corrente de referência, que em geral é de 1 mA nos para-raios de distribuição.

Essa região de condução é caracterizada por uma relação extremamente não linear entre tensão e corrente, e, como a atuação do para-raios para solicitações de sobretensão ocorre nessa região, tem-se que o nível de proteção dos para-raios é definido dentro dos limites da segunda região.

Segundo [30], quando o campo na camada granular do varistor atinge 100 kV/mm, os elétrons transpõem as barreiras dos grãos e a resistência é então reduzida significativamente. Isso implica em dizer que uma pequena variação de tensão a partir desse ponto representará grandes alterações no valor da corrente.

Esta região é a que define o nível de proteção dos para-raios para atuação tanto para as frentes de ondas rápidas (8/20 μ s), provenientes de descargas atmosféricas, quanto para as frentes de ondas lentas (30/60 μ s), decorrentes de surtos de manobra.

A característica de proteção dos para-raios é definida principalmente de acordo com o valor do coeficiente de não linearidade (α) dos blocos de varistores. Esse coeficiente está diretamente relacionado com a rampa da curva tensão x corrente e quanto maior o seu valor, maior será o nível de proteção do para-raios.

2.4.3 REGIÃO DE CAMPO ELÉTRICO ELEVADO

Nessa região a resistência das camadas intergranulares é da ordem de poucos ohms e a queda de tensão através dela devido ao efeito túnel é pequena, predominando, portanto, a queda de tensão sobre a resistência dos grãos de ZnO, caracterizando assim um comportamento ôhmico do varistor [30].

O desempenho da curva tensão x corrente nessa região é quase linear e praticamente não apresenta dependência com a temperatura, sendo caracterizada pelos valores elevados da corrente de fuga.

O valor da tensão residual por sua vez, que é determinado pelo produto da corrente de fuga pela impedância dos elementos de ZnO, apresenta uma dependência com o tempo de frente do impulso de corrente, quanto mais rápida a frente de onda, maior será a amplitude da tensão residual.

2.5 Invólucro polimérico

Durante a primeira metade do século 20 apenas poucos dispositivos de proteção (isoladores) foram fabricados com invólucros do tipo polimérico, a maioria adotava a porcelana como isolante. Esses invólucros poliméricos eram

feitos de um material acrílico que rapidamente tornou-se obsoleto devido seu alto custo e inadequado desempenho para utilização em sistemas de alta tensão [31].

Apenas a partir da década de 60 o uso da alumina tri-hidratada (ATH) nos compostos poliméricos proporcionou um aumento da resistência à erosão, fazendo com que isoladores poliméricos fossem então fabricados em meados da década de 70 [15]. Apesar disso, a utilização de invólucro polimérico em para-raios ocorreu apenas a partir de 1986.

Conforme explicitado em [32], as principais vantagens do uso de material polimérico em relação à porcelana são:

- Melhor desempenho em ambientes com índices elevados de poluição;
- Redução do peso;
- Não estilhaçamento do invólucro, o que aumenta significativamente o fator de segurança dos equipamentos protegidos pelos para-raios e das pessoas próximas a esses dispositivos.

Os polímeros ou elastômeros comumente utilizados como materiais base na construção dos invólucros de para-raios são do tipo orgânico (EVA, EPM e EPDM) ou inorgânico (Silicone).

Entre os compostos poliméricos usados em isolamento elétrico, dois materiais destacam-se na fabricação do invólucro de para-raios: o composto de borracha de EPDM (borracha de polimetileno) e o composto de borracha de silicone (polidimetilsiloxano).

As famílias de materiais são normalmente apresentadas de forma genérica, através de seu polímero base, entretanto, é essencial incorporar vários aditivos buscando alcançar as desejadas características elétricas, químicas e mecânicas.

2.5.1 PROPRIEDADES DOS COMPOSTOS DE BORRACHA DE EPDM

Uma vantagem que os compostos de EPDM costumam ter sobre os compostos de silicone é alta resistência a esforços mecânicos, principalmente quando novos, pois após o envelhecimento estas propriedades se alteram. Apesar

disso, as propriedades mecânicas de elastômeros para revestimento de para-raios não são um fator determinante, principalmente quando se trata de para-raios de distribuição.

A molécula de EPDM possui a cadeia principal constituída somente de átomos de carbono, todos de ligação simples tipo C–C, ou seja, trata-se de um composto orgânico. Os grupos laterais, presos à cadeia principal da molécula de EPDM, são metilas (–CH₃) ou hidrogênios (H). Estes grupos laterais estão aleatoriamente distribuídos ao longo de toda a molécula sem qualquer ordem ou sequência lógica.

Na Figura 2.12 encontra-se a estrutura química do EPDM.

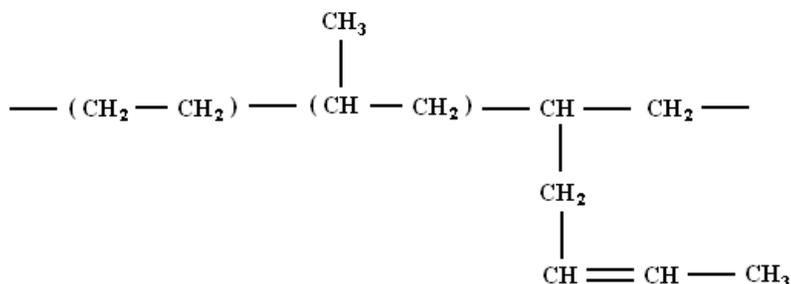


Figura 2.12 - Estrutura química do EPDM (figura adaptada [33]).

As principais vantagens da utilização do EPDM, segundo [34], encontra-se no fato deste apresentar excelente resistência ao aquecimento, exposição ao ozônio e luz solar.

O EPDM é um composto hidrofílico, ou seja, não apresenta características de repelir a água em estado líquido. Para os polímeros utilizados nos invólucros dos para-raios é desejável que esses materiais sejam hidrofóbicos, uma vez que a penetração de umidade nos para-raios representa uma parcela alta das falhas desses dispositivos no sistema.

Para melhorar essa característica, alguns aditivos podem ser inseridos aos compostos de EPDM, tornando-os hidrofóbicos temporariamente. Por tratar-se de uma hidrofobicidade conferida por uma molécula exógena, com o passar do tempo, este aditivo se perde e os compostos de EPDM voltam a ser hidrofílicos.

Além disso, o EPDM também não possui uma boa adesão em metais, o que faz com que o sistema de vedação dos para-raios que utilizam o EPDM como invólucro sejam mais susceptíveis a penetração de umidade.

2.5.2 PROPRIEDADES DOS COMPOSTOS DE BORRACHA DE SILICONE

O silicone é o nome usual do grupo de moléculas conhecidas cientificamente como siloxanos e seus derivados, no caso dos polímeros, polidimetilsiloxano e seus derivados. A estrutura química do polidimetilsiloxano pode ser observada na Figura 2.13.

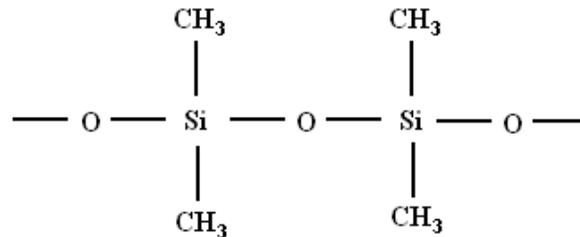


Figura 2.13 - Estrutura química do polidimetilsiloxano (figura adaptada [33]).

Os compostos de silicone têm sido os mais utilizados ao longo dos últimos anos na fabricação dos invólucros de para-raios, pois de uma forma geral são mais estáveis termicamente, podendo ser usados continuamente sob um amplo espectro de temperatura, mais resistentes à radiação ultravioleta, mais inerte a ataques químicos, não são propagadores de chamas e quando usados em ambientes com elevado grau de poluição, apresentam melhores desempenhos que os outros polímeros [35].

As borrachas de silicone em geral são dielétricos mais eficientes que outras borrachas, não degradam facilmente e quando há a degradação o silicone gera óxido de silício (SiO₂), que não é um composto condutivo, impossibilitando a formação de trilhamento elétrico. O fenômeno de trilhamento é comum aos compostos de EPDM e outros polímeros orgânicos.

Esta diferença de comportamento dos compostos de silicone em relação aos compostos de outros elastômeros está diretamente relacionada à natureza química inorgânica da molécula de silicone. A molécula de silicone

possui átomos de silício e de oxigênio perfeitamente intercalados ao longo de toda a cadeia principal da molécula (...Si–O–Si–O...), caracterizando-o como material inorgânico. De fato, o silicone só não é considerado um material totalmente inorgânico porque ligado a cada átomo de silício há duas moléculas de metila (–CH₃), que são estruturas tipicamente orgânicas. Todos os átomos de silício estão perfeitamente intercalados aos átomos de oxigênio e todos os átomos de silício possuem duas metilas ligadas a eles, ou seja, a estrutura da molécula de silicone se repete de forma organizada e não aleatória.

A diferença de energia entre ligações dos compostos implica em uma maior resistência ao envelhecimento por ação da temperatura, de raios ultravioletas e de intempéries quando comparada a borracha de silicone ao EPDM e outros materiais orgânicos, ou seja, é preciso uma energia maior para desfazer uma ligação do tipo Si-O do que para desfazer uma ligação do tipo C-C.

Uma importante característica do silicone está relacionada com a capacidade do material em repelir a água em estado líquido, apresentando elevada hidrofobicidade. Nos compostos de silicone, a própria molécula de silicone é hidrofóbica, portanto, a hidrofobicidade de compostos de silicone somente é perdida se ocorrer a degradação da própria molécula. A hidrofobicidade do material dificulta a deposição de poluentes e ajuda no processo de lavagem natural por ação das chuvas ou ainda artificial, produzida por lavagens de equipe de manutenção em regiões com elevado índice de contaminação.

Pode-se ainda caracterizar a hidrofobicidade do silicone através da arquitetura molecular de suas ligações. As metilas laterais localizadas aos pares em cada átomo de silício possuem um caráter químico altamente apolar e estão presentes na superfície das moléculas de silicone como um grande revestimento bem organizado, construindo assim uma espécie de superfície apolar ao longo de todo o composto. A molécula de água por sua vez tem forte característica polar, o que faz com que a água em estado líquido seja repelida na superfície dos para-raios com invólucro de silicone [35].

O silicone apresenta ainda a capacidade de transferir hidrofobicidade às partículas que eventualmente sejam depositadas em sua superfície. Isto ocorre porque pequenas moléculas de silicone dispersas no composto da matriz polimérica migram espontaneamente do composto para as partículas depositadas em sua superfície, revestindo-as e tornando-as hidrofóbicas. Além disso, apresentam a capacidade de recuperar a hidrofobicidade depois de cessado o esforço elétrico ou intempérie que ocasionou sua perda.

A estabilidade química dos compostos de silicone também configura um diferencial deste tipo de material. As borrachas de silicone possuem potencial oxidativo muito inferior àqueles experimentados pelos compostos orgânicos, por isso, em atmosferas oxidantes, na presença de ozônio e mesmo frente a fortes agressões químicas, os compostos de silicone são mais resistentes e duráveis que os demais polímeros.

Estas diferentes propriedades levaram os para-raios fabricados com invólucros de silicone a serem amplamente utilizados nas redes elétricas externas em todo o mundo, principalmente em ambientes onde as solicitações climáticas e ambientais são mais rigorosas.

2.6 Mecanismos de penetração de umidade em para-raios poliméricos

A penetração de umidade em para-raios com invólucro polimérico pode ocorrer basicamente através dos seguintes processos [15, 34]:

- Por meio do efeito capilaridade devido descontinuidades no material, como micro poros, micro furos ou má qualidade do sistema de vedação;
- Pelo efeito solubilização-difusão;
- Ou ainda, formado internamente em decorrência de reações químicas originadas por descargas parciais em para-raios com espaço interno de ar.

A integridade do sistema de vedação dos para-raios com invólucro cerâmico ou polimérico influencia diretamente na vida útil desses dispositivos, uma vez que falhas no fechamento constituem-se em pontos de entrada de umidade formando um caminho de maior facilidade à corrente de fuga, o que com o tempo pode levar a falha do dispositivo.

As descargas parciais nos para-raios são geradas devido à distribuição não uniforme do campo elétrico ao longo do dispositivo. Isso pode ocorrer em função, por exemplo, da deposição de poluição na superfície do invólucro. Se esse dispositivo apresentar espaço interno de ar, a diferença de potencial origina pequenas descargas que podem ocorrer no varistor se esse apresentar uma fabricação não homogênea, ou podem ocorrer na interface, entre o invólucro e a parte interna do para-raios devido os diferentes materiais e à presença de ar internamente ao dispositivo.

A porosidade do polímero permite a penetração de umidade no para-raios através dos espaços intermoleculares por meio da difusão de vapor d'água. O processo de difusão é constituído de três etapas [36]:

1. Sorção e solubilização da água na superfície do invólucro polimérico;
2. Difusão do vapor d'água através do invólucro;
3. Dessorção do vapor d'água na face interna do invólucro polimérico.

A etapa de sorção e dessorção da água dependem principalmente de sua solubilidade em contato com o polímero, ou seja, depende das forças intermoleculares resultantes da polarização das moléculas e refere-se a quantidade de moléculas de água que se movimentam através do polímero.

O processo de difusão por sua vez, pode ser descrito através da primeira e segunda lei de Fick, abordado em [15, 34], e relaciona-se à facilidade de movimentação dessas moléculas.

A primeira lei de Fick descreve o processo de difusão através de uma membrana polimérica no estado estacionário.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \times \frac{1}{A} = -D \times \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.6.1)$$

Onde:

$\frac{\partial Q}{\partial t}$: Taxa de escoamento da água;

A : Área permeada;

D : Coeficiente de solubilidade;

$\frac{\partial C}{\partial x}$: Gradiente de concentração ao longo da membrana polimérica.

No entanto, o comportamento do invólucro polimérico dos para-raios é mutável com o tempo, ou seja, suas características químicas podem ser alteradas devido às inúmeras solicitações que estão sujeitos. Sendo assim o processo de difusão nos para-raios é melhor evidenciado utilizando-se a segunda lei de Fick.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.6.2)$$

Como o vapor d'água pode interagir com o polímero, reduzindo as forças intermoleculares, aumentando o volume livre na cadeia polimérica e, portanto, aumentando a taxa de permeação o coeficiente de difusibilidade, torna-se dependente da concentração do permeante, por exemplo, água na superfície do polímero e da pressão atmosférica [34].

Assim como a composição e estrutura química do polímero são fatores importantes para a permeabilidade, a estrutura molecular do permeante (tamanho, forma e polaridade) também tem grande influência na taxa de permeação. Moléculas pequenas, como as de água, se difundem mais rapidamente que as grandes.

O coeficiente de permeabilidade, difusibilidade e solubilidade apresentam dependência com a temperatura e podem ser expressos pelo modelo de Arrhenius.

$$\text{Para o coeficiente de permeabilidade: } P = P_0 \exp \left[-\frac{E_P}{RT} \right] \quad (2.6.3)$$

$$\text{Para o coeficiente de difusibilidade: } D = D_0 \exp \left[-\frac{E_D}{RT} \right] \quad (2.6.4)$$

$$\text{Para o coeficiente de solubilidade: } S = S_0 \exp \left[-\frac{\Delta H_P}{RT} \right] \quad (2.6.5)$$

Onde:

P, D, S : Coeficientes de permeabilidade, difusibilidade e solubilidade;

P_0, D_0, S_0 : Constantes;

E_p, E_D : Energia de ativação de permeabilização e difusibilidade;

ΔH_p : Variação de entalpia da solubilidade;

R : Constante dos gases;

T : Temperatura absoluta.

Capítulo 3. Descrição do Sistema e Procedimentos do Ensaio de Imersão

3.1 Aspectos Gerais

No Brasil, a maior parte das redes de distribuição urbana apresentam tensão nominal de 13,8 kV. Historicamente para a proteção desse tipo de rede, pode-se optar pela utilização de para-raios com tensão nominal de 10 kV ou 12 kV. Na última década, a utilização desses dispositivos com invólucro polimérico, principalmente àqueles cuja matéria prima principal do invólucro é o silicone, atingiu um patamar elevado e faz com que novos estudos sejam desenvolvidos no sentido de melhorar a eficiência de tais equipamentos.

A análise da estanqueidade dos para-raios de distribuição com invólucro de silicone e seu comportamento elétrico quando sujeitos à penetração de umidade são tópicos avaliados nessa dissertação. Através de 3 meses de ensaio de imersão em água com cloreto de sódio à temperatura de 90 °C, e do monitorando semanal da corrente de fuga nas amostras, quando aplicada a máxima tensão contínua de operação e através da tensão residual para descarga atmosférica, procura-se avaliar a variação do comportamento elétrico dos equipamentos, considerando seu envelhecimento.

Dessa forma, o presente capítulo traz um descritivo detalhado do sistema utilizado para realização do ensaio de imersão e da medição das correntes de fuga e tensão residual, assim como os procedimentos adotados.

3.2 Para-raios submetidos ao ensaio

Foram submetidas à análise 28 para-raios de ZnO com invólucro de silicone usados em redes de distribuição no Brasil, sendo 25 amostras novas e 3 amostras usadas, retiradas de campo. Os para-raios pertencem a 5 fabricantes diferentes, sendo que 3 deles são fabricantes nacionais e 2 importados. Cada fabricante teve 5 amostras novas submetidas ao ensaio, e os fabricantes nacionais tiveram, ainda, 1 amostra adicional retirada de campo e levada à imersão juntamente com as demais.

As características das amostras submetidas ao ensaio encontram-se sintetizadas na Tabela 3.1 e documentadas no Anexo A.

Tabela 3.1 - Para-raios de distribuição com invólucro de silicone usados no ensaio.

Origem	Fabricante	Amostras	U_c [kV]	MCOV	$U_{Residual}$ [kV]
Novas	A	1 a 5	10	8,4	33
	B	6 a 10	10	8,4	33,9
	C	11 a 15	10	8,4	33
	D	16 a 20	12	10,2	39,6
	E	21 a 25	10	8,4	34,1
Usadas	A	26	10	8,4	33
	B	27	10	8,4	33,9
	C	28	12	10,2	39

3.3 Tanque para Imersão

Durante a realização do ensaio de imersão utilizou-se um tanque retangular construído em fibra de vidro com 1000 mm de comprimento, 700 mm de largura e 600 mm de altura, conforme Figura 3.1.

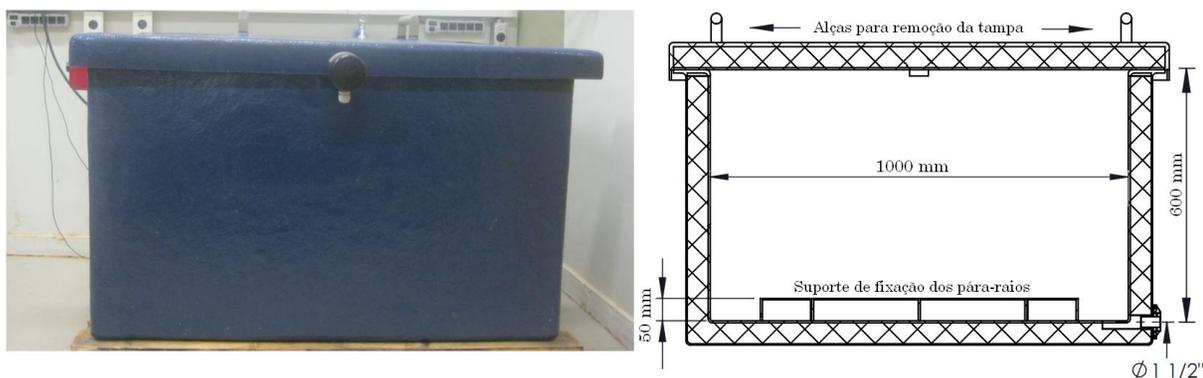


Figura 3.1 - Vista frontal do tanque usado no ensaio de imersão.

A fibra de vidro é produzida a partir da aglomeração de filamentos flexíveis de vidro com resina e posterior aplicação da substância catalisadora de polimerização. Uma das vantagens da utilização da fibra de vidro é a facilidade de usinagem, o que permite a produção de peças dos mais variados tamanhos e formatos. Entre as principais vantagens da utilização da fibra de vidro destaca-se suas excelentes propriedades mecânicas, baixa condutividade térmica, resistência à agentes químicos, eficiência em isolamento elétrico e estabilidade dimensional com baixo coeficiente de expansão. O tanque é ainda constituído por uma tampa tipo apoio e, durante o ensaio, as amostras são fixadas em um suporte interno ao tanque, também construído em fibra de vidro.

As paredes internas do tanque são revestidas com resina estervinílica que funciona como uma barreira química resistente à corrosão. O reforço da camada estrutural do tanque é obtido por meio das resinas ortho-tereftálicas, as quais apresentam elevada resistência mecânica.

Buscando minimizar as reações exotérmicas com o ambiente, o tanque possui um isolamento térmico feito em lã de rocha com 50 mm de espessura. A lã de rocha é um material isolante térmico, incombustível e imputrescível. Este material se diferencia de outros isolantes, pois é altamente resistente ao fogo, com um ponto de fusão superior aos 1.100 °C, podendo trabalhar em regime contínuo à temperatura de até 750 °C. Além disso, apresenta baixa condutividade térmica em

larga faixa de temperatura (-270 à +750 °C) e é quimicamente inerte, podendo ser utilizada em contato com todos os materiais, pois não causa ou sofre corrosão.

3.4 Resistências de aquecimento

As resistências de aquecimento foram definidas com base nas dimensões do tanque da Figura 3.1 e com base na equação (3.2) de transferência de calor.

Levando-se em consideração o comprimento de pino a pino de um para-raios polimérico de distribuição de 10 kV/10 kA (aproximadamente 200 mm) e a altura do suporte para sua afixação (50 mm), tem-se que aproximadamente 300 mm da altura total do tanque ficaram imersos. Adotando ainda uma margem de segurança de 200 mm, o volume de água que deverá ser aquecido pode ser determinado por:

$$V = A_{\text{Base}} \times H = 1000 \times 700 \times 500 = 0,35 \text{ m}^3 = 350 \text{ L} \quad (3.1)$$

Considerando-se apenas o calor específico da água e desconsiderando a influência do cloreto de sódio e dos para-raios no cálculo, para a temperatura inicial de 25 °C e temperatura final de 90 °C, a quantidade de calor necessária é dada por:

$$\Delta Q = m \times C \times \Delta T \quad (3.2)$$

Onde:

ΔQ : Quantidade de calor em J;

m: Massa da substância em kg;

C: Calor específico da água em kJ;

ΔT : Diferença entre a temperatura de ensaio e a temperatura ambiente.

Mas:

$$m = V \times D \quad (3.3)$$

Onde:

V: Volume que será aquecido em m³;

D: Massa específica da água em kg/m³.

$$m = 0,35 \times 1000 = 350 \text{ kg} \quad (3.4)$$

Assim:

$$\Delta Q = 350 \times 4,1868 \times 10^3 \times (90 - 25) = 95,3 \text{ MJ} \quad (3.5)$$

Considerando-se aceitável o tempo de aquecimento da água de 4 horas, a potência mínima necessária para aquecimento é determinada, através da seguinte equação:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{95,3 \times 10^6}{60 \times 240} \cong 6,62 \text{ kW} \quad (3.6)$$

Como o ambiente em que as resistências serão utilizadas é caracterizado por ser um ambiente agressivo (corrosivo e com temperatura da água próxima ao ponto de ebulição) o material utilizado para a fabricação das resistências é o politetrafluoretileno conhecido pelo nome comercial teflon. A principal vantagem da utilização do teflon encontra-se no fato deste ser praticamente inerte, ou seja, não reage com outras substâncias químicas exceto em situações muito especiais. Outra qualidade importantíssima está relacionada à impermeabilidade do teflon, mantendo suas características mesmo em ambientes úmidos.

O tanque é revestido com 50 mm de isolamento térmico em lã de rocha, dessa forma as perdas por condução nas paredes internas do tanque foram desprezadas e optou-se pela utilização de 4 resistências do tipo sobreborda de 1800 W/220 V, sendo que duas delas possuem termopar e duas não possuem. As Figura 3.2 e Figura 3.3 apresentam as resistências com e sem termostato, utilizadas para aquecimento da solução.

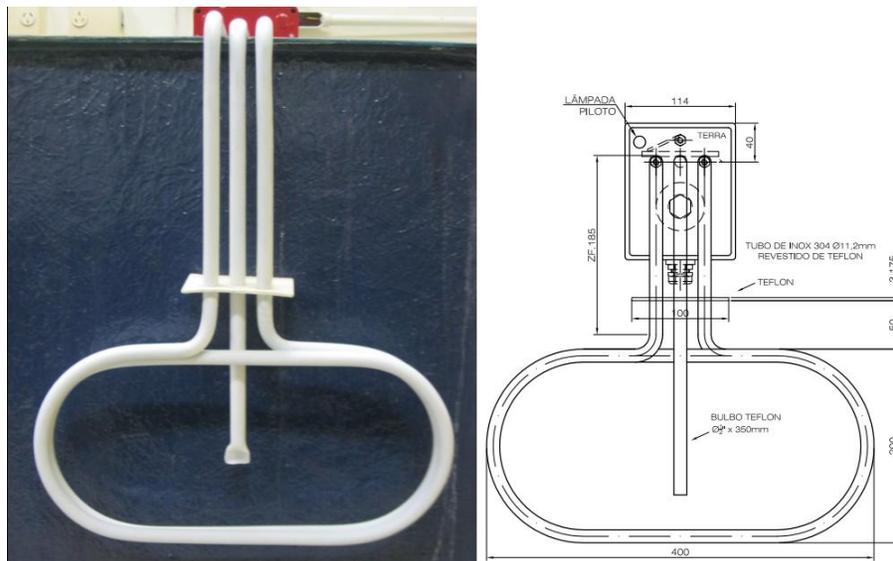


Figura 3.2 - Resistência de sobreborda com termostato.

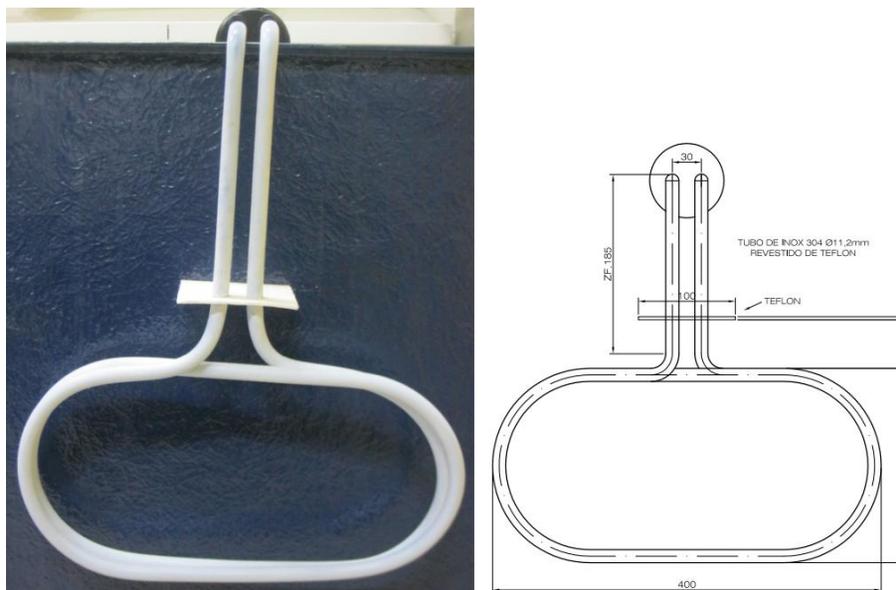


Figura 3.3 - Resistência de sobreborda.

O acionamento das resistências é realizado através de uma chave liga-desliga de um estágio, ou seja, todas as resistências são ligadas/desligadas ao mesmo tempo. O termostato foi conectado à um contator que desliga/liga o tanque quando a temperatura da água varia em ± 5 °C da temperatura ajustada.

3.5 Procedimentos de ensaio

A duração do ensaio de imersão foi definida com base na equação de Arrhenius. A lei de Arrhenius tem proporcionado confiança na expectativa de vida dos blocos de óxido de metal e servido como base para o teste de envelhecimento descrito em [20].

Como a equação de Arrhenius estima a vida útil dos blocos de varistores considerando apenas um agente de degradação (temperatura) e no ensaio de imersão haverá pelo menos três agentes responsáveis pelo envelhecimento e degradação dos para-raios (umidade, temperatura e sal), considera-se o tempo de ensaio obtido através dessa formulação como um ensaio conservativo, no que diz respeito à representatividade da vida útil dos para-raios como um todo.

Para que o ensaio de envelhecimento represente a vida útil dos para-raios instalados no sistema os seguintes fatores devem ser levados em consideração:

- A temperatura máxima de trabalho dos para-raios de óxido de metal instalados em redes ao ar livre é de 40 °C [20];
- Temperatura limite de ensaio de 115 °C, pois temperaturas acima desse valor pode mudar a física do envelhecimento do dispositivo, tornando a lei de Arrhenius não aplicável [20].

Dessa forma a razão do envelhecimento entre o para-raios no campo e o envelhecimento que as amostras são sujeitas em laboratório pode ser razoavelmente estimada pelo fator de aceleração:

$$AFT = 2,5^{\left(\frac{\Delta T}{10}\right)} \quad (3.7)$$

Onde:

ΔT : é a diferença entre a temperatura de ensaio e a temperatura máxima de trabalho dos para-raios de óxido de metal instalados em redes ao ar livre;

Com base no exposto e fixando a temperatura de ensaio em 90 °C:

$$20 \text{ anos} = 7200 \text{ dias} = 172800 \text{ horas} \quad (3.8)$$

$$\text{AFT} = 2,5^{\left(\frac{90-40}{10}\right)} = 97,65625 \quad (3.9)$$

Dividindo a equação (3.8) pela (3.9), segue:

$$\text{Tempo de ensaio} = \frac{172800}{97,65625} = 1769,5 \text{ horas} \cong 75 \text{ dias} \quad (3.10)$$

Dessa forma o ensaio deve ter pelo menos 75 dias de imersão. Considerando-se ciclos de uma semana onde as amostras ficam imersas durante 6 dias e um dia é usado para a medição elétrica e inspeção visual, o ensaio de imersão deve ter no mínimo 85 dias. O ensaio de imersão foi definido então com 90 dias, apenas para simplificar a finalização dos 12 ciclos.

Determinado o tempo de ensaio as amostras foram anilhadas de 1 a 28, sendo que os para-raios retirados de campo foram lavados para evitar a contaminação das demais amostras dentro do tanque.

Antes de serem imersos todos os para-raios tiveram sua corrente de fuga e tensão residual medidas, conforme são descritos nos subitens 3.5.1 e 3.5.2 respectivamente.

Como a imersão das amostras em água quente, ajuda a expansão do ar nas interfaces e eleva a temperatura interna dos para-raios [10], e ainda, sabe-se que o pico da componente resistiva da corrente de fuga é fortemente influenciado pela temperatura do para-raios [20], antes da realização das medições deve-se assegurar que os para-raios estejam frios e secos.

Dessa forma, no dia anterior as medições, o tanque era desligado e a água drenada. Os para-raios permaneciam fora d'água para que pudessem ser resfriados em temperatura ambiente e secos naturalmente durante cerca de 18 horas, e, somente então, eram submetidos a uma inspeção visual, fotografados e levados à medição da corrente de fuga e, posteriormente, medição da tensão residual.

A condutividade da solução era medida semanalmente antes do tanque ser desligado, nas condições de ensaio, ou seja, temperatura de 90 °C e concentração de sal de 1 kg/m³.

Após realização das medições elétricas o tanque era limpo, buscando garantir as mesmas condições ao longo de todo o ensaio de imersão. As amostras eram encaixadas no suporte e o tanque novamente cheio, adicionava-se o cloreto de sódio à água e regulava-se o termostato para a temperatura de 90 °C. O tanque era fechado e as amostras permaneciam nessas condições até o final do ciclo.

3.5.1 MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA

A corrente de fuga é medida aplicando-se a MCOV do para-raios. O esquema elétrico para realizar a medição da corrente de fuga no laboratório é apresentado na Figura 3.4.

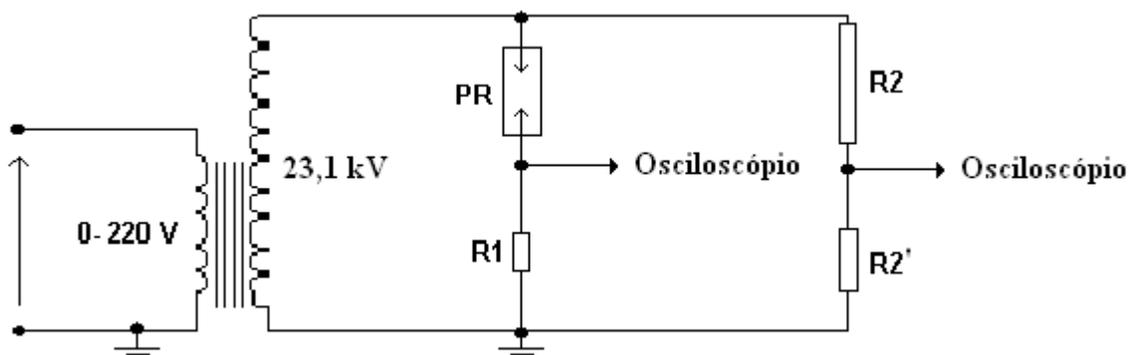


Figura 3.4 - Esquema elétrico de medição da corrente de Fuga.

Temos que:

O primário do transformador é alimentado através de um variador de tensão monofásico de 10 kVA/220 V.

R1: Shunt de 1040 Ω para medição da corrente de fuga;

R2 e R2': Divisor de tensão com relação de 44510/1.

A forma de onda da corrente de fuga, juntamente com a forma de onda da tensão aplicada aos para-raios, foi registrada após cerca de 5 segundos de aplicação da máxima tensão contínua de operação.

No decorrer do ensaio, observou-se que algumas amostras não estabilizavam seu valor de corrente de fuga. As amostras que apresentavam esse comportamento eram submetidas ao seguinte procedimento:

- Inicialmente a corrente de fuga e a tensão aplicada aos para-raios eram medidas após 5 segundos de aplicação da MCOV. Em seguida desligava-se a tensão de alimentação e ajustava-se o osciloscópio para aquisição apenas da corrente de fuga. Registrava-se então a corrente que circulava pela amostra no momento em que a MCOV era novamente aplicada aos terminais do para-raios, e, a partir de então, de 20 em 20 segundos ao longo de um minuto.

3.5.2 MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL

De acordo com a definição exposta em [20], tensão residual é aquela que aparece entre os terminais do para-raios quando passa por ele a corrente de descarga. Esse ensaio divide-se de acordo com a norma em três etapas: impulso íngreme, impulso atmosférico e impulso de manobra. No entanto, a medição da tensão residual foi realizada apenas para impulso atmosférico, com aplicação da forma de onda normalizada 8/20 μ s e amplitude de corrente de 10 kA.

O ajuste da forma de onda da corrente de impulso atmosférico foi realizado através de um para-raios de calibração para cada fabricante, verificando-se a tensão de carregamento dos capacitores necessária para a aplicação da forma de onda da corrente representativa de uma descarga atmosférica.

O sistema usado para a medição apresenta-se na Figura 3.5.

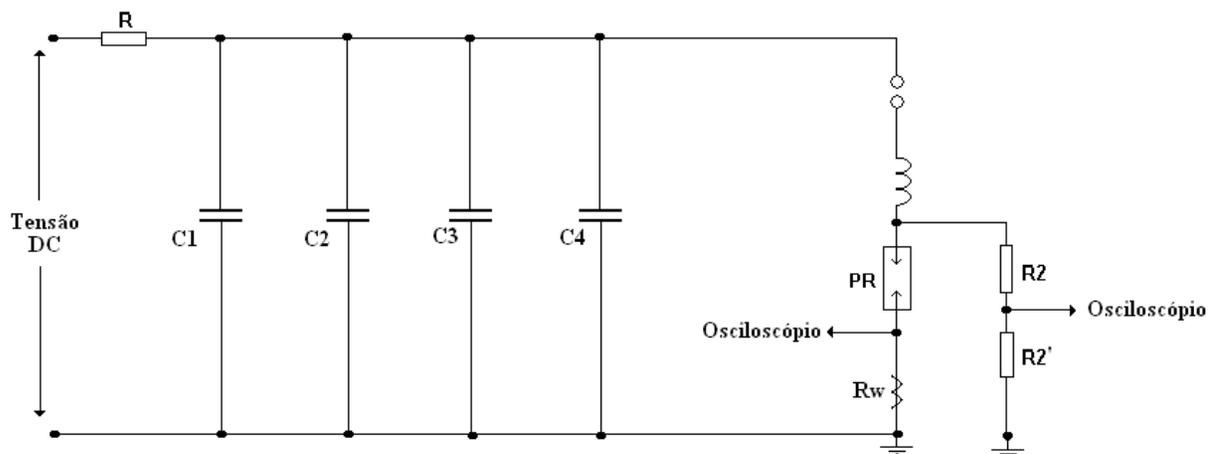


Figura 3.5 - Esquema de medição da tensão residual.

Temos que:

R: Resistor de 8 K Ω que limita a constante de carregamento do banco de capacitores;

C1, C2, C3, C4: Capacitores de carga de 100 kV/1 μ F cada um;

Rw: Bobina de Rogowski usada para medição da corrente no para-raios;

R2 e R2': Divisor de tensão com escala de 17255,5/1.

Capítulo 4. Análise do Desempenho Elétrico dos Para-raios

4.1 Aspectos gerais

O presente capítulo aborda os resultados elétricos obtidos através da medição da corrente de fuga e da tensão residual para descargas atmosféricas, nos para-raios de distribuição com invólucro de silicone. Essas medições foram realizadas ao decorrer do ensaio de imersão/envelhecimento como forma de averiguar o comportamento de 5 fabricantes usados no Brasil quando sujeitos a penetração de umidade.

Como a solução (água com cloreto de sódio) utilizada para imersão dos para-raios foi preparada utilizando-se água diretamente da rede de abastecimento, realizou-se a medição semanal da condutividade dessa solução nas condições de ensaio para averiguar o seu padrão durante os 3 meses de ensaio.

A Figura 4.1 apresenta o perfil da condutividade da solução. Conforme observa-se a variação nos valores medidos

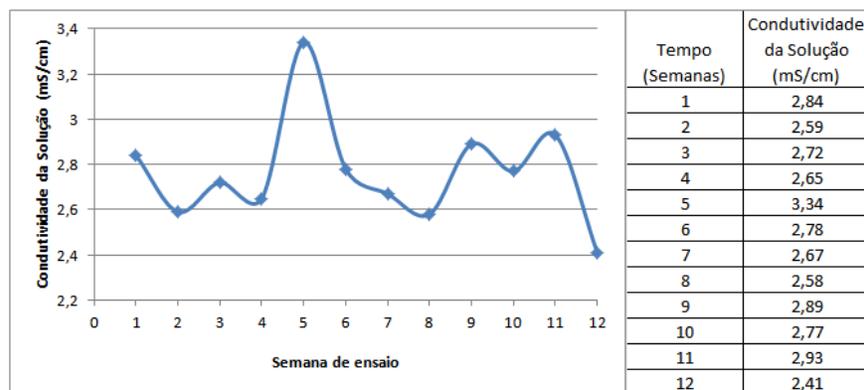


Figura 4.1 - Condutividade da solução durante o ensaio de imersão.

4.2 Comportamento da corrente de fuga

A corrente de fuga dos para-raios foi registrada uma vez por semana, ao longo dos 3 meses de ensaio de imersão/envelhecimento, aplicando-se a máxima tensão contínua de operação aos para-raios e registrando esse sinal após 5 segundos de aplicação.

A corrente de fuga que circulava pelos para-raios durante as medições tornou-se instável a partir do momento em que variações bruscas em sua amplitude ocorreram. Essas variações são verificadas para praticamente todos os fabricantes, sendo que em algumas amostras o aumento da amplitude da corrente de fuga fez com que o para-raios falhasse eletricamente por meio da avalanche térmica.

Sendo assim, após a aquisição da forma de onda da corrente de fuga com 5 segundos de aplicação da MCOV o sistema era desligado e ajustava-se o osciloscópio para aquisição da forma de onda da corrente de fuga ao longo de um minuto de aplicação da tensão. Essa aquisição acontecia no momento em que o sistema era religado, ou seja, considerando $t = 0$ s, e em intervalos de 20 segundos durante 1 minuto, completando assim quatro medições. Caso o para-raios não falhasse ao longo de um minuto de aplicação da tensão a amostra seguia para a medição da tensão residual.

4.2.1 FABRICANTE A

A Figura 4.2 apresenta o comportamento da corrente de fuga das amostras do fabricante A, expresso em valores de pico ao longo do ensaio de imersão/envelhecimento medido com 5 segundos de aplicação da tensão.

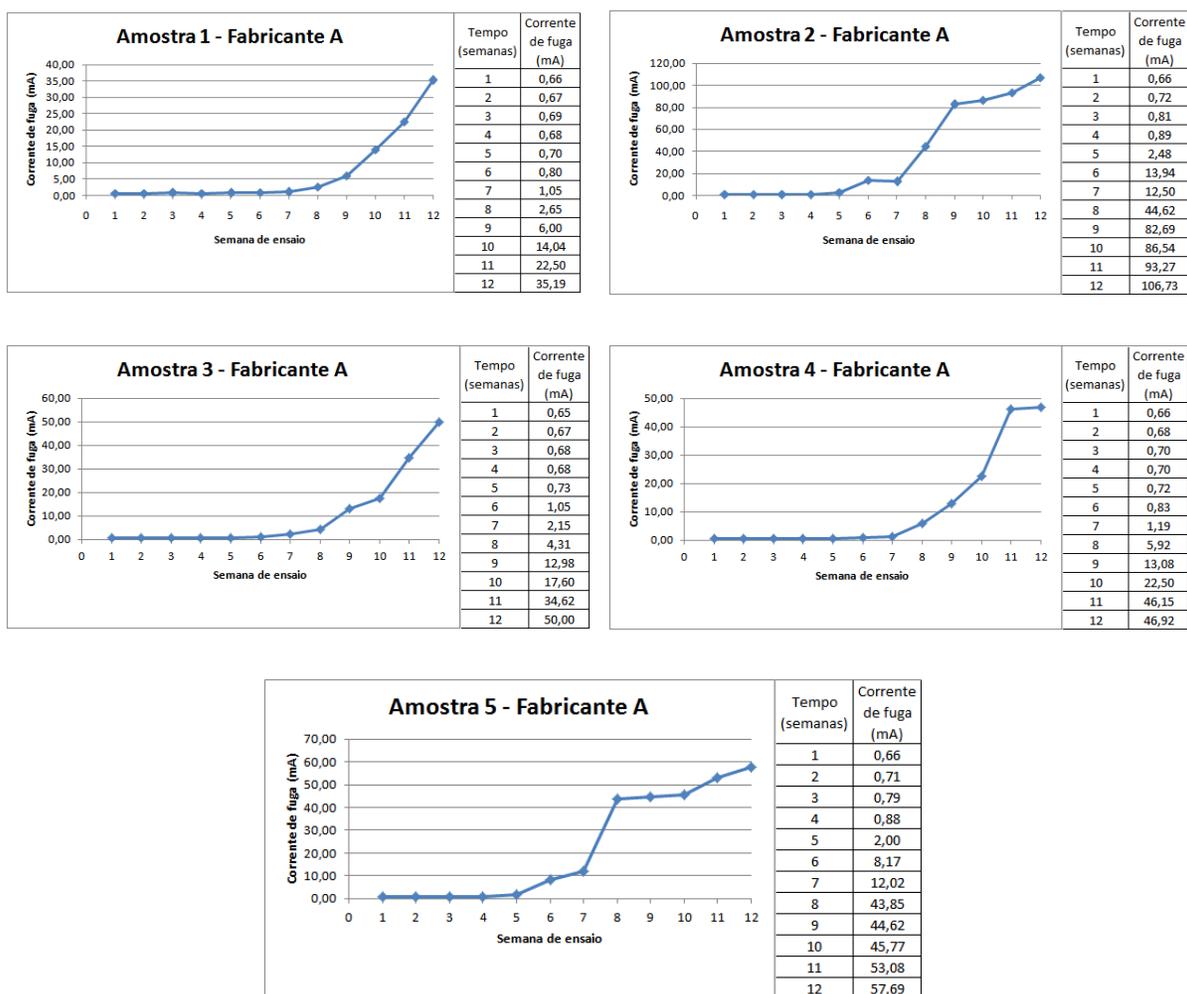
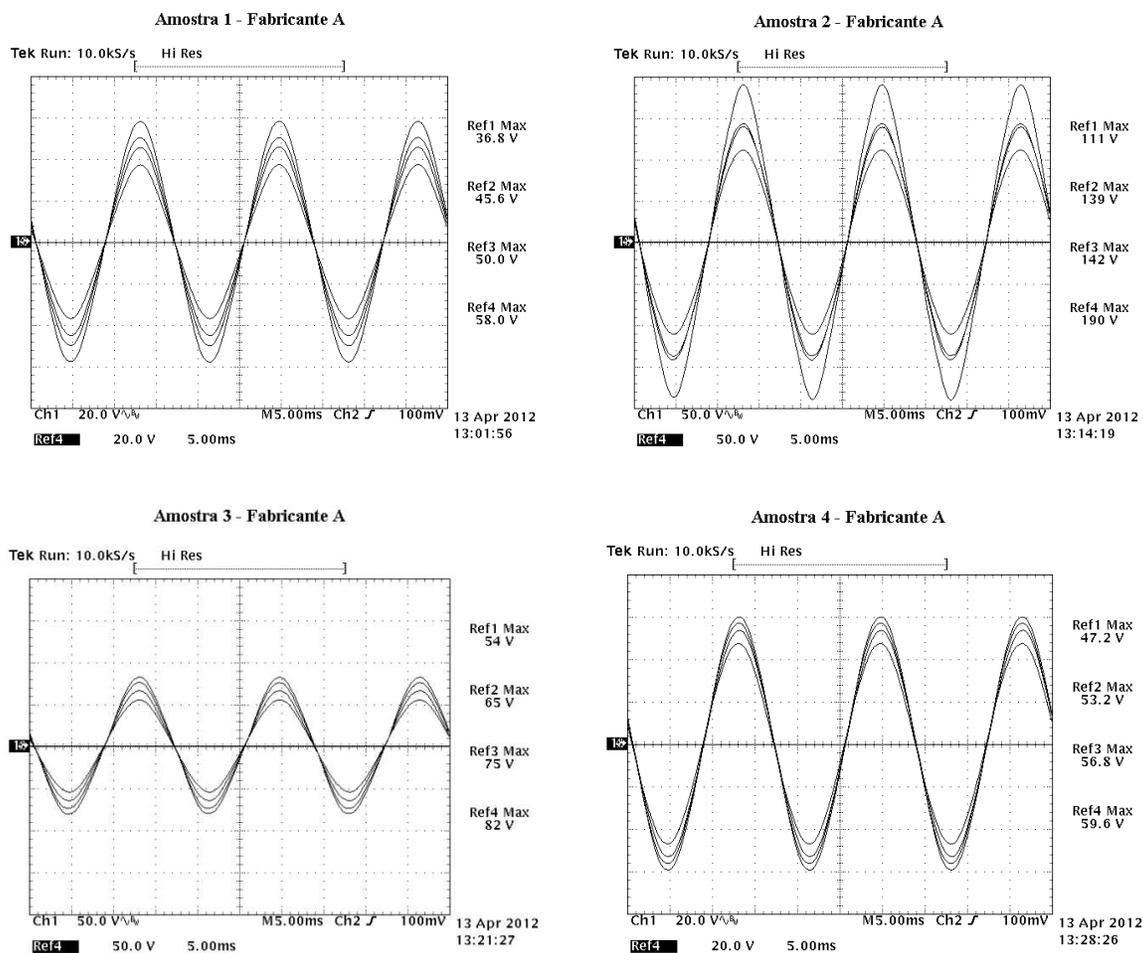


Figura 4.2 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante A.

Verifica-se que durante o primeiro mês de imersão os valores da corrente de fuga apresentam variação abaixo de 5% o que fica dentro da faixa de erro de medição, excetuando-se as amostras 2 e 5 que variaram entre 7 e 9% respectivamente. A partir da 5ª semana, as amostras 2 e 5 passaram a apresentar variações maiores nos valores de corrente de fuga, que foram aumentando progressivamente ao longo de todo o ensaio. A amostra 2 apresentou valores extremamente elevados para a corrente de fuga e entrou em avalanche térmica na 12ª semana de imersão.

A amostra 3, por sua vez, começou a apresentar alterações significativas na amplitude da corrente a partir da 6ª semana de imersão. Os para-raios 1 e 4 foram as amostras do fabricante A que suportaram mais tempo sem apresentar variação brusca na amplitude da corrente de fuga, somente a partir da 7ª semana de imersão houve maior variação desses valores.

A Figura 4.3 apresenta o comportamento da corrente de fuga no 12º ciclo do ensaio de imersão. Os valores indicados correspondem à queda de tensão sobre o shunt de medição de 1040 Ω, sendo a referência 1, apresentada nos gráficos, obtida no instante da energização, enquanto as demais medidas foram adquiridas com 20, 40 e 60 s de aplicação da MCOV.



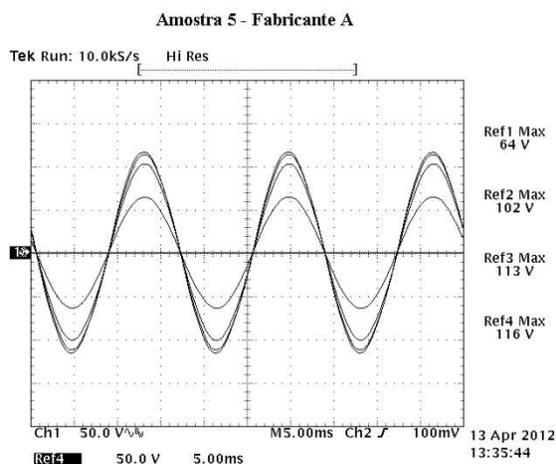


Figura 4.3 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante A - 12º ciclo (amostras 1, 2, 3, 4 e 5).

As correntes de fuga para todas as amostras do fabricante A apresentaram na última medição um comportamento instável com aumento constante na amplitude da corrente de fuga. No entanto, de acordo com a metodologia adotada apenas a amostra 2 desse fabricante falhou ao longo do ensaio de imersão.

A amostra 1 apresentou corrente de fuga com amplitude de 55,7 mA obtida com um minuto de aplicação da MCOV durante o 12º ciclo.

A amostra 2 a partir da 9ª semana de imersão apresentou formação de bolhas ao longo de praticamente todo o invólucro conforme mostra a Figura 4.4, entretanto, a falha elétrica decorrente da avalanche térmica só ocorreu efetivamente logo após a aquisição do último sinal de corrente de fuga, no 12º ciclo do ensaio de imersão com 182,7 mA.



Figura 4.4 - Amostra 2 na nona medição da corrente de fuga.

A amplitude da corrente de fuga na amostra 3 foi de 78,8 mA e forma de onda senoidal, obtido com um minuto de aplicação da tensão.

A amostra 4 apresentou amplitude final da corrente de fuga medida no 12º ciclo de ensaio, ou seja, ao término de 3 meses de imersão igual a 57,3 mA.

O para-raios 5, assim como o para-raios 2, apresentou indicativos de penetração de umidade a partir da 5ª semana de imersão, finalizando o ensaio com corrente de fuga no valor de 111,5 mA. O aquecimento nessa amostra foi perceptível sem o uso de qualquer tipo de aparelho, mas mesmo com valores extremamente elevados de corrente de fuga e temperatura acima do usual a amostra não entrou em avalanche térmica.

A forma de onda da corrente de fuga oferece um forte indicativo de seu caminho ao longo dos para-raios. Como os varistores apresentam características extremamente não lineares, quanto mais deformadas forem as correntes de fuga obtida no ensaio, maior será a degradação do varistor, indicando que o caminho dessa corrente é através dos blocos.

Para os valores de corrente de fuga elevada e com forma senoidal estima-se que a degradação seja na interface. As formas de onda apresentadas na Figura 4.3 associada à formação de bolha da amostra 2, indicada na Figura 4.4, oferece fortes indícios de que o mecanismo de penetração de umidade nesse

fabricante foi decorrente de falha de adesão na interface entre o invólucro e a parte ativa dos para-raios.

A Figura 4.5 apresenta a amostra 2 pertencente ao fabricante A no momento da falha, ou seja, no 12º ciclo. A corrente de fuga nessa amostra apresentou valores elevados, aquecendo-a excessivamente e fazendo com que a mesma entrasse em avalanche térmica. Observa-se ainda a formação de um micro furo na lateral inferior do para-raios, por onde, através de análise visual, notou-se a saída de água do interior do dispositivo.



Figura 4.5 - Falha da amostra 2 pertencente ao fabricante A.

Os para-raios pertencentes ao fabricante A submetidos ao ensaio de estanqueidade fazem parte do grupo construtivo diretamente injetado. O conjunto ativo é envolto por uma resina polimérica reforçada com fibra de vidro que os recobre totalmente. A amostra 2 desse fabricante foi aberta e inspecionada visualmente conforme Figura B.1 (Anexo B). Inicialmente foi feito um corte ao longo do eixo vertical da amostra e não foi possível perceber qualquer tipo de alteração nas propriedades mecânicas do para-raios. Verificou-se total perda de adesão entre a parte ativa e o invólucro de silicone, com perda de adesão entre as flanges metálicas e o silicone, reforçando assim a suspeita de falha da interface.

4.2.2 FABRICANTE B

A Figura 4.6 apresenta o comportamento da corrente de fuga das amostras pertencentes ao fabricante B ao longo de 12 semanas de ensaio de imersão. Observa-se que a amostra 6 apresentou uma variação no valor da corrente de fuga extremamente elevada da 4^a para a 5^a semana de imersão. Durante as medições realizadas na 5^a semana a amostra falhou eletricamente, ou seja, o aumento da temperatura interna do para-raios decorrente do aumento da corrente fez com que a amostra entrasse em avalanche térmica.

A amostra 7 passou a apresentar variações bruscas na amplitude da corrente de fuga a partir da 5^a semana de imersão, indicando que nesse ponto da medição a presença de umidade interna no para-raios tornava-se significativa. Apesar de haver uma elevação gradativa da corrente de fuga ao longo do ensaio, o para-raios não falhou eletricamente.

A amostra 8 manteve-se praticamente estável até a 4^a semana de medição, com valores da corrente de fuga de no máximo 760 μA . A partir da 5^a semana de imersão essa amostra passou a apresentar indicativos de penetração de umidade, com um aumento considerável da corrente de fuga. A falha elétrica desse para-raios ocorreu na 8^a semana de ensaio.

A amostra 9 passou a apresentar alterações na amplitude da corrente que circulava entre seus terminais quando aplicado a MCOV a partir da 4^a semana de imersão. Apesar do aumento gradativo da corrente ao longo de todo o ensaio, esse para-raios não falhou efetivamente durante o ensaio de imersão.

A amostra 10 por sua vez apresentou alterações significativas nos valores medidos de corrente a partir do 5^o ciclo de medição e sua falha elétrica ocorreu na medição do 6^o ciclo, através da avalanche térmica.

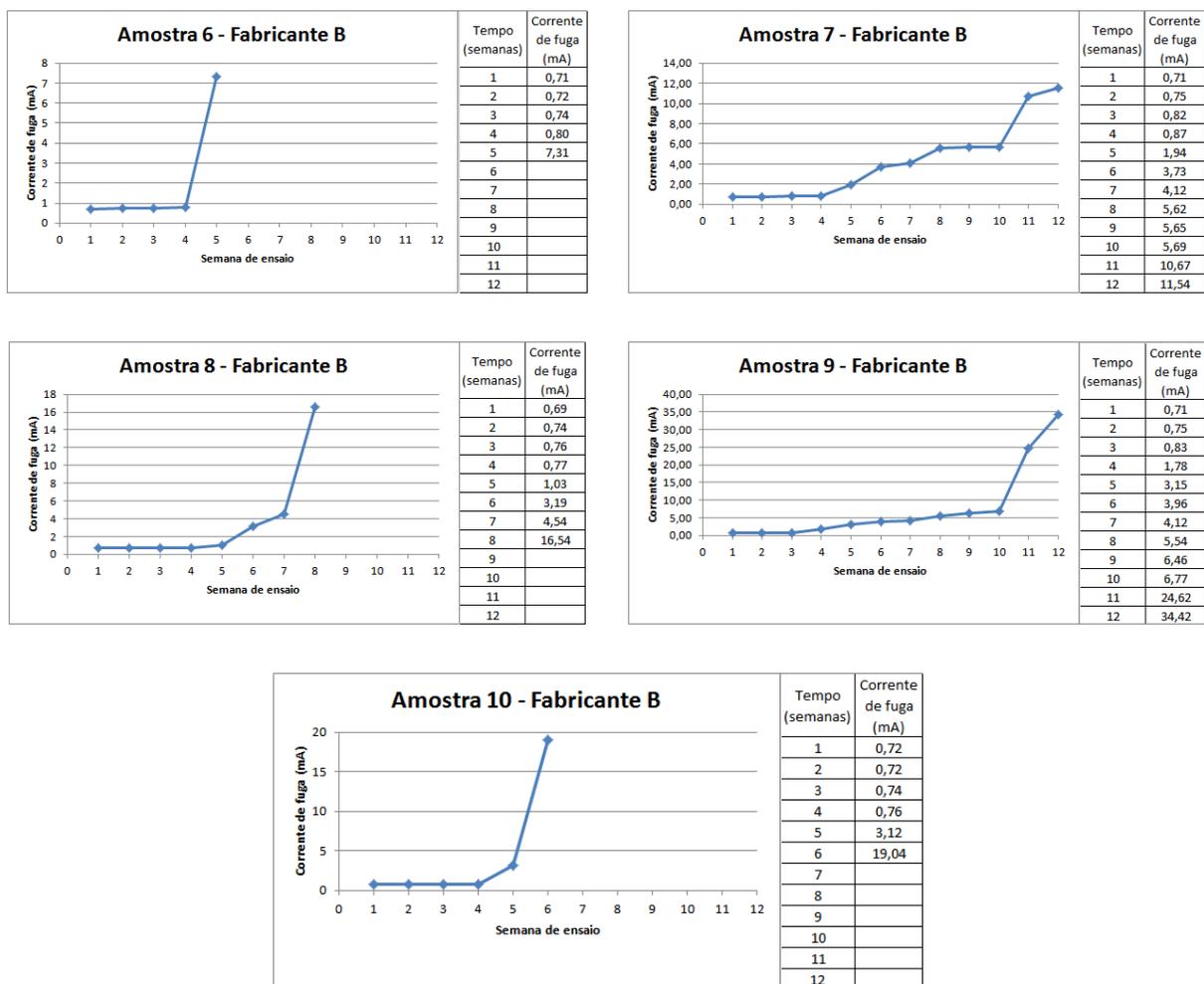


Figura 4.6 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante B.

A Figura 4.7 apresenta o comportamento da corrente de fuga no 12º ciclo do ensaio de imersão para as amostras que não falharam eletricamente (amostra 7 e 9), além da corrente de fuga no momento da falha, ou seja, no 5º ciclo para a amostra 6, no 6º ciclo para a amostra 10 e no 8º ciclo de medição para a amostra 8. Os valores indicados nas imagens correspondem à queda de tensão sobre o shunt de medição de 1040 Ω, sendo a referência 1 obtida no instante da energização e as demais medidas adquiridas com 20, 40 e 60 s de aplicação da MCOV.

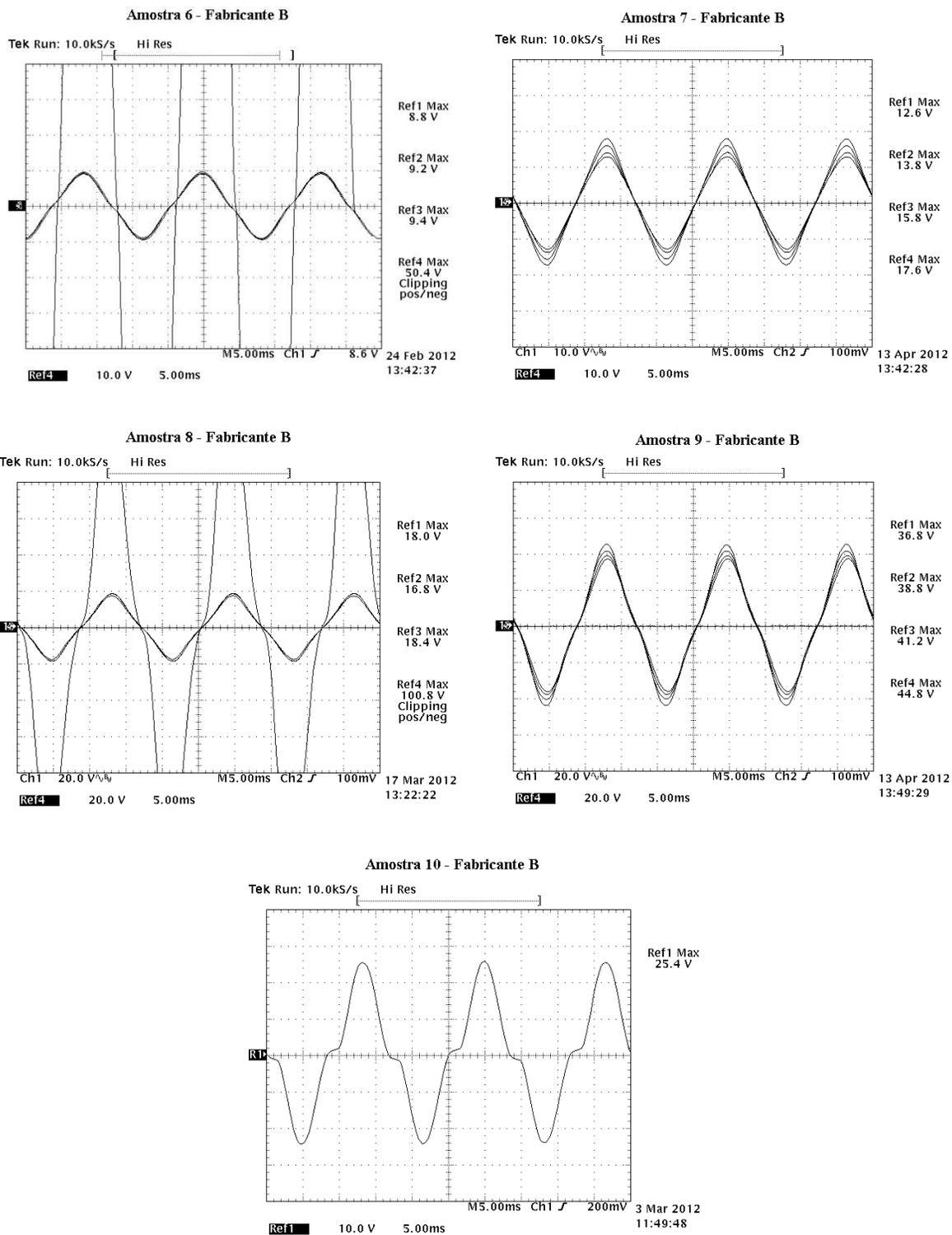


Figura 4.7 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante B – 5º ciclo (amostra 6), 6º ciclo (amostra 10), 8º ciclo (amostra 8) e 12º ciclo (amostras 7 e 9).

A corrente de fuga para todas as amostras do fabricante B apresentaram na última medição um comportamento instável, com um aumento constante na amplitude da corrente de fuga e, em algumas amostras, deformação na forma de onda.

Durante a medição realizada na 5ª semana de imersão para a amostra 6, verifica-se que durante 40 s (intervalo de tempo em que a forma de onda da ref.1, ref.2 e ref.3 é obtida) a amplitude da corrente mantém-se elevada, em torno de 8,8 mA, e com uma pequena deformação em sua forma. Após 40 s de aplicação da MCOV, o valor da corrente de fuga apresentou uma elevada taxa de variação, falhando após 47 s de sua energização e a amplitude da corrente nesse momento foi de aproximadamente 48,5 mA.

O aumento da corrente de fuga durante a medição, em consequência de umidade interna no para-raios, faz com que sua temperatura também aumente e, conforme destacado no capítulo 2, a corrente de fuga circula com maior facilidade entre os terminais do para-raios à medida que a temperatura aumenta. Esse comportamento gera um ciclo em que tanto a corrente quanto a temperatura sofrem elevação até que a capacidade de troca de calor do dispositivo com o meio ambiente é excedido e o para-raios entra em avalanche por instabilidade térmica.

As amostras 7 e 9, conforme citado anteriormente, não falharam efetivamente durante o ensaio de corrente de fuga, mas apresentaram valores elevados, 16,9 mA e 43,1 mA, respectivamente; além de forma de onda ligeiramente deformada. A deformação na forma de onda da corrente indica que a penetração de umidade provavelmente atingiu os varistores.

Valores da corrente de fuga a partir de 1 mA, em geral, encontram-se dentro da curva intermediária de atuação dos para-raios (região de campo elétrico médio). Essa região descreve um comportamento altamente não linear onde há predominância da componente resistiva da corrente de fuga em relação a componente capacitiva, deformando a corrente total. Dessa forma, caso a corrente que circula entre os terminais do dispositivo apresente-se com a forma de onda senoidal, estima-se que o caminho percorrido por essa corrente seja na interface

entre o invólucro e a fibra de vidro que recobre a parte ativa dos para-raios. Caso haja deformação da forma de onda da corrente, o caminho mais provável é através dos blocos de varistores.

Durante a medição realizada na 6ª semana de imersão, na corrente de fuga da amostra 10 verifica-se uma forma de onda extremamente distorcida, com valor de pico de 24,4 mA, resultado de uma maior influência da componente resistiva sobre a componente capacitiva. Esse comportamento pode ser entendido como o efeito da penetração de umidade nos elementos ativos do para-raios e não apenas na interface entre esses elementos e o invólucro de silicone, conforme observa-se nas demais falhas apresentadas até o momento. Apenas a aquisição da primeira forma de onda foi possível, para $t = 0$ s, pois a amostra entrou em avalanche com 10 s de aplicação da MCOV impossibilitando, assim, as demais aquisições.

Na medição realizada no 8º ciclo a amostra 8 apresentou uma pequena variação na amplitude da corrente de fuga durante os 40 s iniciais de aquisição desse sinal. Nos últimos 20 s de aplicação da tensão houve uma taxa de variação da corrente elevada, fazendo com que a amostra entrasse em avalanche térmica aos 60 s de aplicação da MCOV, apresentando um pico de corrente de fuga de 96,9 mA.

Os para-raios do fabricante B que foram submetidos ao ensaio de estanqueidade são do tipo diretamente injetados. Os elementos ativos desse para-raios são trançados por uma espécie de fita de fibra de vidro.

A amostra 8 foi escolhida aleatoriamente entre os para-raios do fabricante B para abertura e averiguação de suas condições internas, apresentado na Figura B.2 (Anexo B). Inicialmente foi feito um corte ao longo do eixo longitudinal do para-raios e forçou-se a retirada do invólucro. O silicone tornou-se quebradiço e aparentemente sofreu alterações em suas propriedades mecânicas, como redução da flexibilidade e da tensão de ruptura, aumento da dureza e maior facilidade de rasgo. A perda de adesão foi parcial entre o invólucro e o revestimento da parte ativa, feito com fibra de vidro. Nas regiões onde o silicone

encontrava-se diretamente em contato com as ferragens a perda de adesão foi total.

4.2.3 FABRICANTE C

A Figura 4.8 apresenta o comportamento da corrente de fuga das amostras pertencentes ao fabricante C ao longo dos 12 ciclos, ou seja, 3 meses de ensaio de imersão.

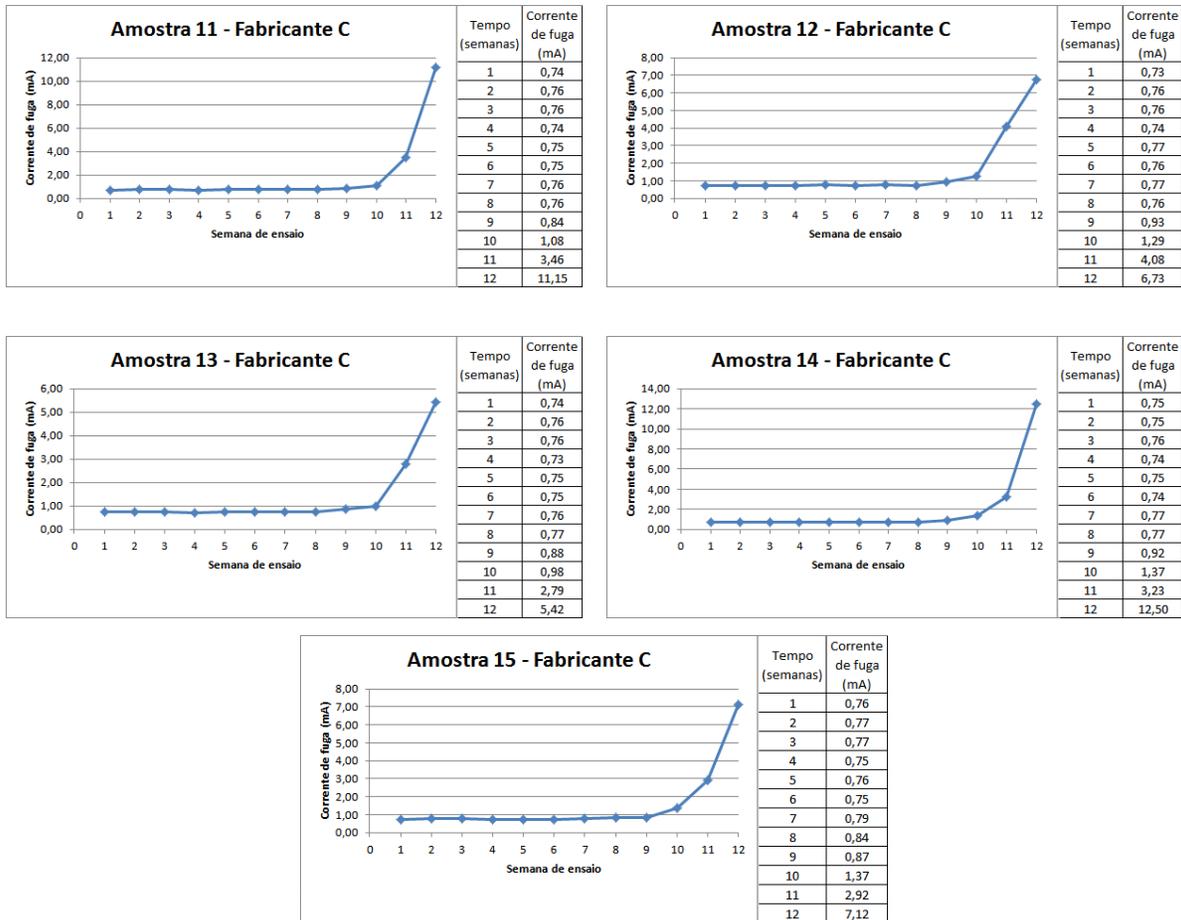


Figura 4.8 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante C.

As amostras 11, 12, 13 e 14 apresentaram corrente de fuga praticamente constante até o 8º ciclo de ensaio. Uma pequena alteração no valor da corrente para esses para-raios começou a partir do 9º ciclo de ensaio, sendo que as alterações significativas aconteceram a partir da 10ª semana de medição.

A amostra 15 manteve valores constantes de corrente de fuga até aproximadamente o 7º ciclo de medição. Alterações significativas ocorreram apenas a partir da 10ª medição, mas apesar dos altos valores de corrente de fuga encontrados a partir dessa semana de ensaio, o fabricante C apresentou um desempenho mais constante ao longo do ensaio, sem que nenhuma amostra entrasse em avalanche térmica.

A Figura 4.9 apresenta o comportamento da corrente de fuga no 12º ciclo do ensaio de imersão para as amostras desse fabricante. Os valores indicados nas imagens correspondem à queda de tensão sobre o shunt de medição de 1040 Ω , sendo a referência 1 obtida no instante da energização e as demais medidas adquiridas com 20, 40 e 60 s de aplicação da MCOV.

A amostra 11 apresentou durante a última aquisição da corrente de fuga realizada no 12º ciclo de medição valor de pico igual a 10,6 mA e forma de onda levemente distorcida.

A amostra 12 apresentou uma distorção acentuada da forma de onda da corrente de fuga e amplitude de 6,3 mA, obtida na última aquisição realizada no 12º ciclo de imersão.

A amostra 13 apresenta amplitude da corrente de fuga igual a 5,2 mA e forma de onda levemente distorcida.

Para a amostra 14 observa-se uma forma de onda extremamente distorcida e amplitude da corrente de fuga total de 11 mA, obtida com um minuto de aplicação da tensão.

A corrente de fuga da amostra 15 obtida na última aquisição realizada no 12º ciclo de medição foi de 6,2 mA.

A corrente de fuga para todas as amostras do fabricante C apresentaram na última medição um comportamento instável. Essa instabilidade é representada pela redução da amplitude da corrente de fuga ao longo dos 60 s de aplicação de tensão. Essas amostras caracterizam-se também por apresentar a forma de onda da corrente de fuga deformada.

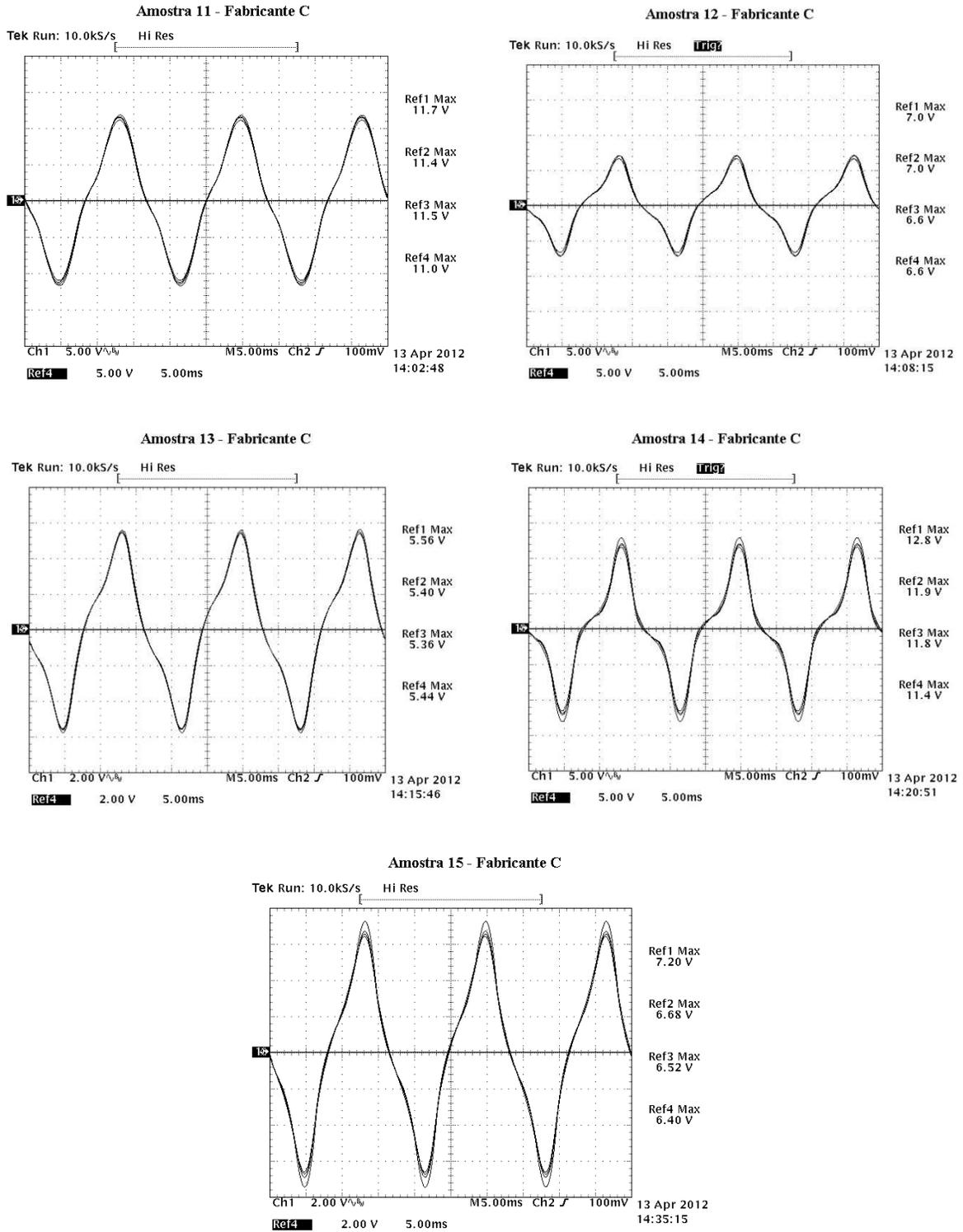


Figura 4.9 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante C – 12º ciclo (amostras 11, 12, 13, 14 e 15).

Uma hipótese para a redução na amplitude da corrente de fuga é de que o aquecimento produzido nos para-raios, devido o aumento da corrente de fuga, tenha “secado” parcialmente a umidade interna das amostras sem que elas entrassem em avalanche térmica, pois a capacidade de troca de calor do dispositivo com o meio externo não foi excedida.

Os para-raios pertencentes ao fabricante C, submetidos ao ensaio de estanqueidade, fazem parte do grupo construtivo diretamente injetado. O conjunto ativo é envolto por fibra de vidro coberta por uma espécie de resina. Como nenhuma amostra do fabricante C apresentou falha elétrica durante o ensaio de imersão, escolheu-se aleatoriamente a amostra 13 para abertura. As imagens detalhadas encontram-se na Figura B.3 (Anexo C). Inicialmente foi feito um corte ao longo do eixo longitudinal da amostra, sem que fosse percebido qualquer tipo de alteração nas propriedades mecânicas do invólucro. Verificou-se perda de adesão entre a fibra de vidro e o invólucro de silicone e, também, perda de adesão entre as flanges metálicas e o silicone.

Conforme observado na Figura 4.10, havia umidade tanto na interface entre a fibra de vidro e o invólucro, pois era visível a presença de gotas d’água, quanto nos elementos ativos, observado através da oxidação parcial dos contatos metálicos situados entre os varistores.



Figura 4.10 - Detalhes dos mecanismos de degradação da amostra 15 do fabricante C.

4.2.4 FABRICANTE D

A Figura 4.11 apresenta o comportamento da corrente de fuga das amostras pertencentes ao fabricante D. Esse fabricante foi o único fabricante submetido ao ensaio com característica nominal de 12 kV/10 kA. Nenhuma amostra desse fabricante resistiu a mais do que duas semanas de ensaio de imersão em água com cloreto de sódio e temperatura de 90 °C.

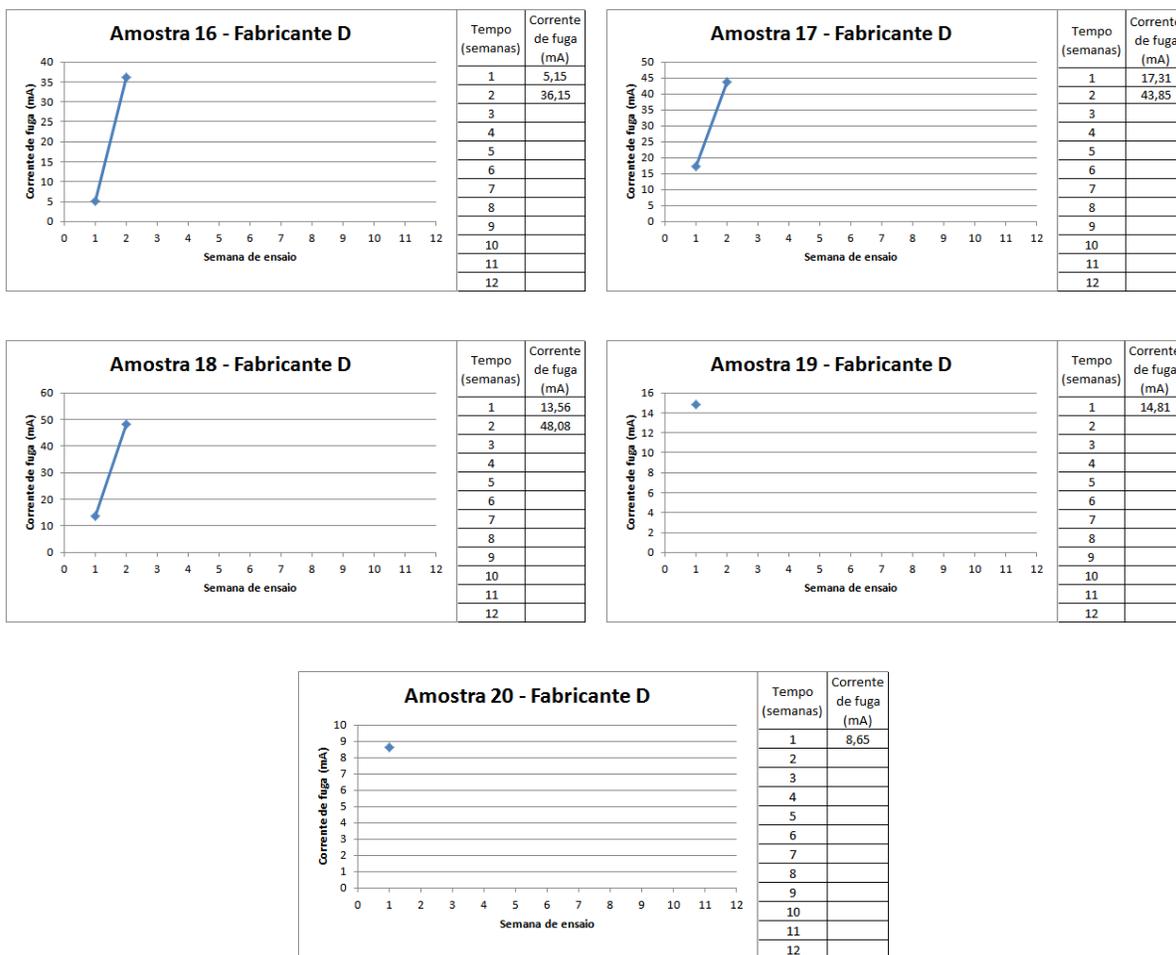


Figura 4.11 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante D.

As amostras 16, 17 e 18 apresentaram significativa alteração no valor da corrente a partir da 1ª semana de ensaio, falhando no 2º ciclo de medição. As amostras 19 e 20 falharam com apenas 1 ciclo de ensaio.

Observou-se logo na 1ª medição uma completa instabilidade da corrente de fuga.

A Figura 4.12 apresenta a medição da corrente de fuga das amostras pertencentes ao fabricante D no 1º e 2º ciclo do ensaio de imersão. Os valores indicados nas imagens correspondem à queda de tensão sobre o shunt de medição de 1040 Ω , sendo a referência 1 obtida no instante da energização e as demais medidas adquiridas com 20, 40 e 60 s de aplicação da MCOV.

A corrente de fuga indicada na figura 4.12, para a amostra 16, é referente à medição realizada ao término do 2º ciclo de imersão. Esse para-raios falhou com 16 s de aplicação da MCOV, sendo assim apenas uma forma de onda foi registrada em $t = 0$ s, com amplitude máxima de 36,2 mA.

A corrente de fuga da amostra 17 também é referente à medição realizada ao término do 2º ciclo de imersão. Como a taxa de variação da corrente mostrou-se elevada, a forma de onda da referência 3 foi obtida com apenas 25 s de aplicação da MCOV, indicando amplitude da corrente de 151,9 mA. A amostra falhou com 26 s de aplicação da tensão.

A amostra 18 apresentou na última medição do 2º ciclo corrente de fuga com amplitude de 46,2 mA, registrada em $t = 20$ s. A amostra entrou em avalanche térmica com 21 s de aplicação da tensão.

As amostras 19 e 20 apresentaram um comportamento da corrente de fuga instável durante a medição executada após o 1º ciclo de imersão. Ambas falharam com 60 s de aplicação da máxima tensão contínua de operação. A amplitude da corrente obtida na última medição do ciclo foi de 48,7 mA para a amostra 19 e de 20,6 mA para a amostra 20.

As falhas prematuras observadas nas amostras do fabricante D demonstraram fragilidade no sistema de vedação do invólucro.

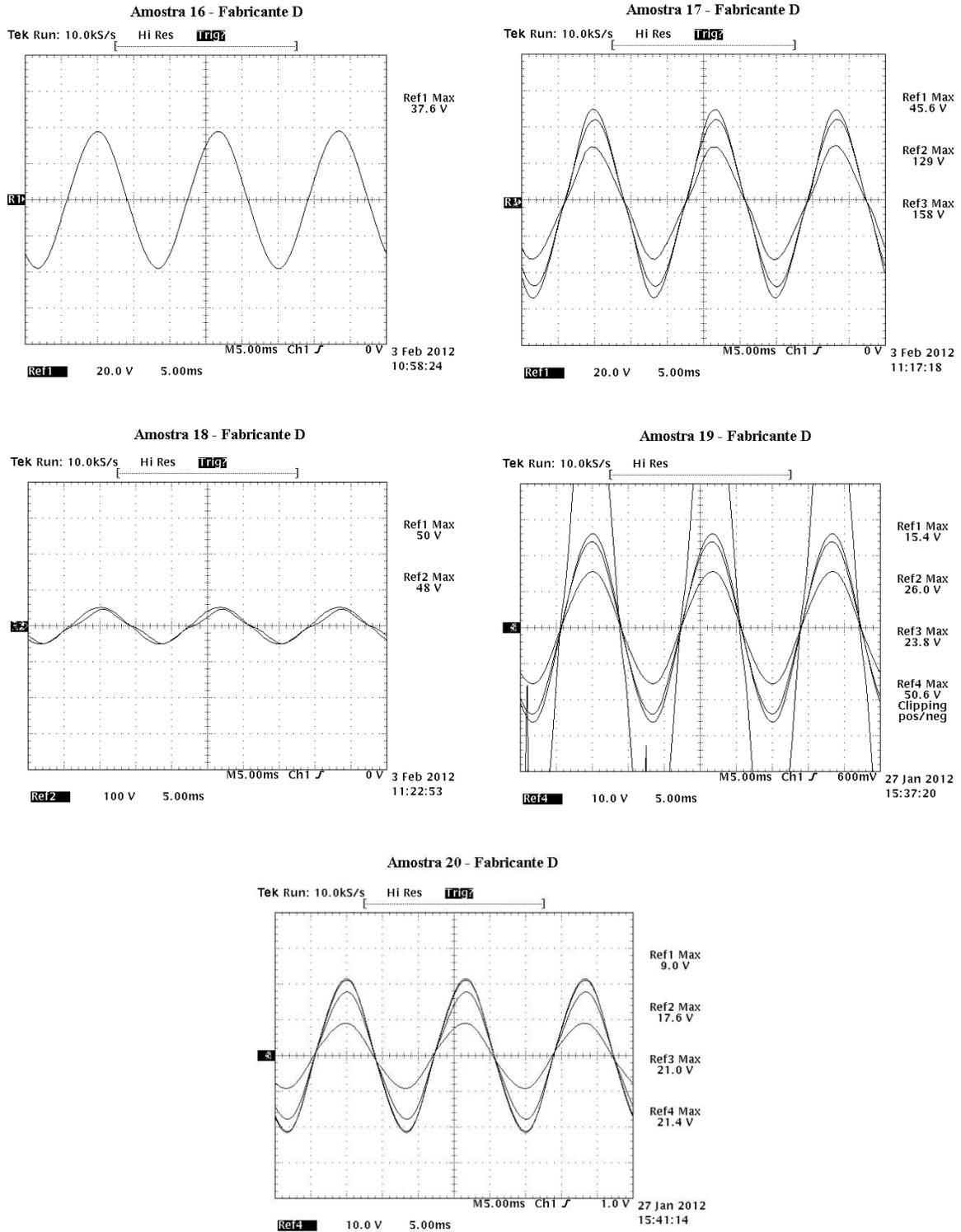


Figura 4.12 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante D – 1º ciclo (amostras 19 e 20) e 2º ciclo (amostras 16, 17 e 18).

Os para-raios pertencentes ao fabricante D submetidos ao ensaio de estanqueidade fazem parte do grupo construtivo diretamente injetado. O conjunto ativo é envolto por um tipo de tecido de fibra de vidro, coberto por fios de fibra de vidro envoltos primeiramente ao longo do eixo longitudinal do para-raios e, em uma segunda camada, ao longo do eixo vertical.

A amostra 18 do fabricante C foi escolhida aleatoriamente para ser aberta. As imagens detalhadas encontram-se na Figura B.4 (Anexo B). Inicialmente foi feito um corte ao longo do eixo longitudinal da amostra sem que fosse possível perceber qualquer tipo de alteração nas propriedades mecânicas do invólucro. Verificou-se a perda parcial de adesão entre a fibra de vidro e o invólucro de silicone. A aderência do silicone com as flanges metálicas apresentaram um desempenho melhor.

4.2.5 FABRICANTE E

A Figura 4.13 mostra o comportamento da corrente de fuga dos para-raios do fabricante E ao longo do ensaio de imersão/envelhecimento. Observa-se que os para-raios desse fabricante não apresentaram praticamente nenhuma alteração no valor da corrente de fuga medida durante os 3 meses de ensaio. Esse comportamento indica um excelente sistema de vedação do dispositivo, pois nenhum indício de penetração de umidade foi observado.

Ao contrário do que aconteceu com os demais para-raios ao longo do ensaio de imersão, as amostras pertencentes ao fabricante E não apresentou alterações significativas na amplitude e forma de onda da corrente, apenas 3% de aumento nas amostras 21 e 22, e 6% nas amostras 23, 24 e 25. O comportamento da corrente de fuga demonstrou-se totalmente estável, por essa razão a aquisição da forma de onda da corrente ao longo dos 60 segundos de aplicação da MCOV não foi necessária.

É importante atentar-se para a escala do eixo vertical da Figuras 4.13 para que não se tenha a ideia errada de que houve grande variação nos valores medidos da corrente de fuga.

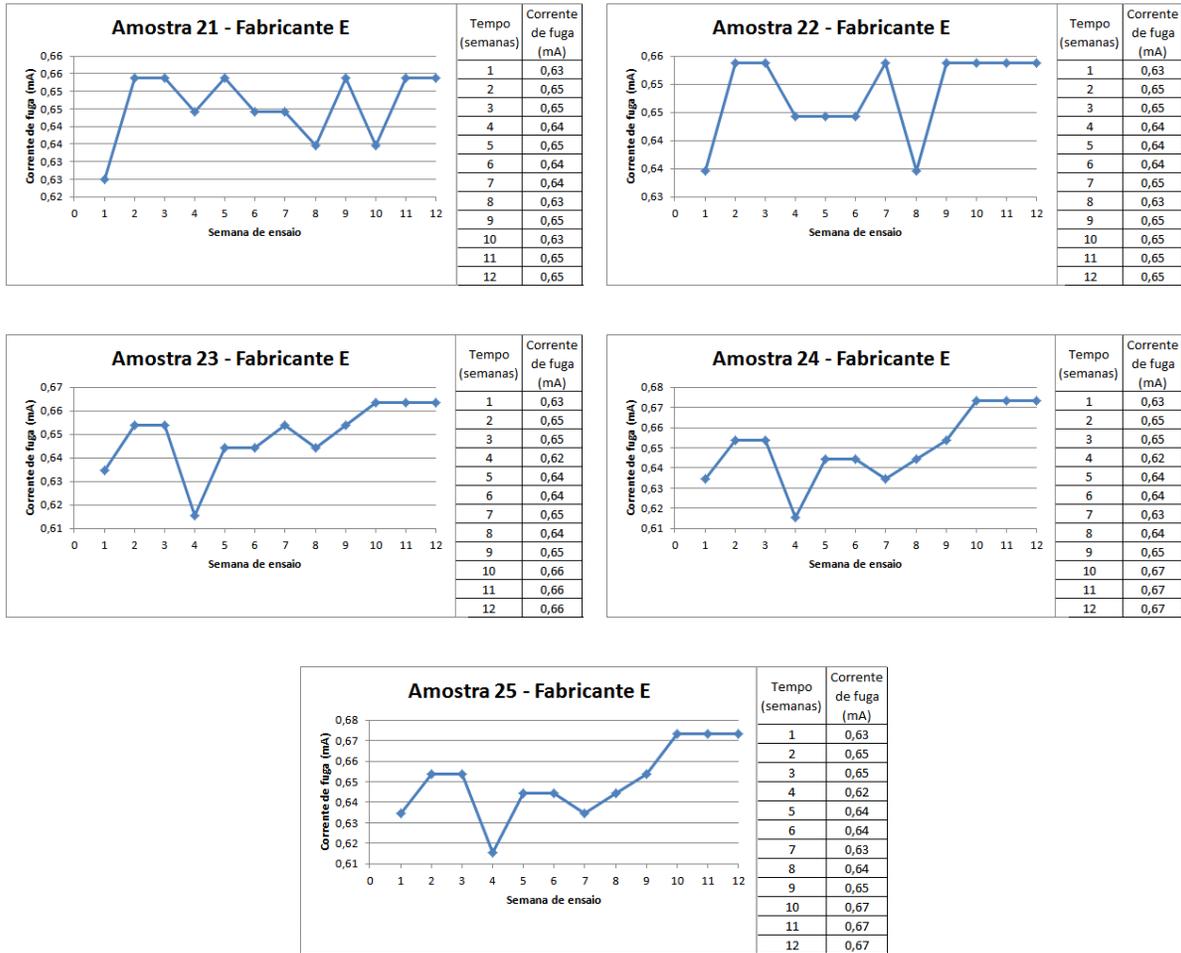


Figura 4.13 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão para o fabricante E.

A Figura 4.14 apresenta a medição da corrente de fuga das amostras pertencentes ao fabricante E no último ciclo do ensaio de imersão, com o respectivo valor de tensão aplicada. Os valores indicados para o canal 1 correspondem à queda de tensão sobre o shunt de medição de 1040 Ω, enquanto que o canal 2 indica a tensão através do divisor de tensão de relação 44510/1.

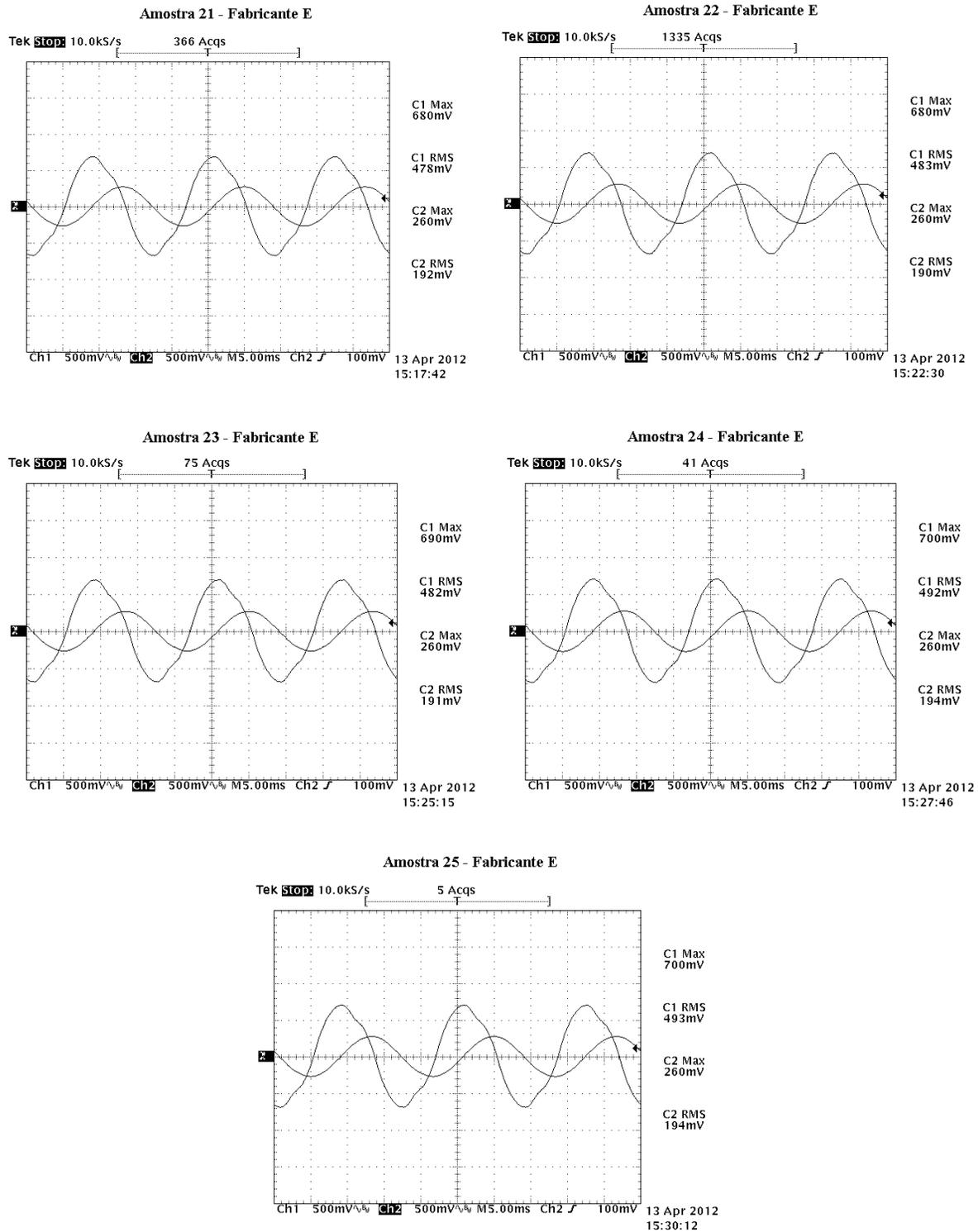


Figura 4.14 - Comportamento da corrente de fuga do fabricante E – 12º ciclo (amostras 21, 22, 23, 24 e 25).

Os para-raios pertencentes ao fabricante E submetidos ao ensaio de estanqueidade fazem parte do grupo construtivo tipo pré-moldado. O conjunto ativo é envolto por um tipo de resina com fibra de vidro, formando um material parecido com plástico rígido.

De acordo com [15], esses para-raios são mais susceptíveis à penetração de umidade devido a necessidade de flanges de vedação, o que facilitaria a penetração de umidade pelo efeito de capilaridade. No entanto, o resultado obtido ao longo do ensaio de imersão não ofereceu indicativos de penetração de umidade para esse fabricante.

A amostra 23 do fabricante E foi escolhida aleatoriamente para ser aberta. As imagens detalhadas encontram-se na Figura B.5 (Anexo B). Inicialmente foi feito um corte ao longo do eixo longitudinal da amostra e não foi possível perceber qualquer tipo de alteração nas propriedades mecânicas do invólucro. Como o invólucro é do tipo moldado, há certa facilidade na extração do invólucro quando comparado aos para-raios do tipo diretamente injetados. Nenhum tipo de alteração foi perceptível visualmente para essa amostra.

4.2.6 FABRICANTE A – AMOSTRA USADA.

A Figura 4.15 apresenta o comportamento da corrente de fuga da amostra 26 pertencente ao fabricante A ao longo do ensaio de imersão/envelhecimento. Esse para-raios estava instalado em campo na região da Zona da Mata mineira.



Figura 4.15 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão na amostra retirada de campo do fabricante A.

Observa-se que nas primeiras 3 semanas de ensaio a corrente de fuga variou em torno de 7,8%. A partir da 4ª medição, no entanto, essa variação tornou-se cada vez mais significativa.

A Figura 4.16 apresenta a medição da corrente de fuga da amostra 26, pertencente ao fabricante A, no 12º ciclo do ensaio de imersão. Os valores indicados nas imagens correspondem à queda de tensão sobre o shunt de medição de 1040 Ω, sendo a referência 1 obtida no instante da energização e as demais medidas adquiridas com 20, 40 e 60 s de aplicação da MCOV.

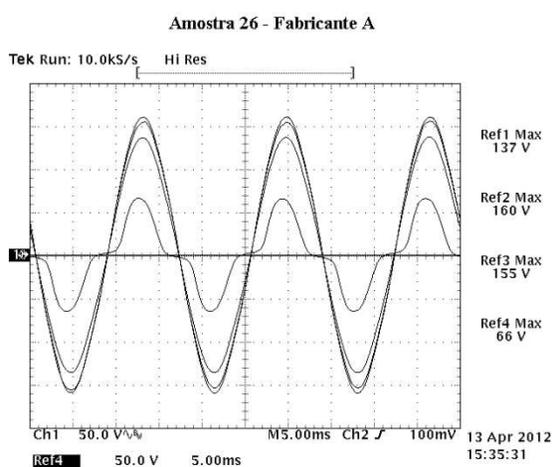


Figura 4.16 - Comportamento da corrente de fuga na amostra retirada de campo do fabricante A – 12º ciclo.

Apesar da amostra 26 apresentar alterações nos valores medidos de corrente de fuga a partir da 4ª semana de imersão, a instabilidade dos valores só foi observada a partir da 6ª semana de imersão, persistindo até o último ciclo, porém sem que a amostra falhasse efetivamente.

Durante os 40 s iniciais de aplicação da máxima tensão contínua de operação, os valores de pico da onda da corrente de fuga permaneceram elevados, possuindo uma forma de onda senoidal o que demonstra uma falha de interface.

Na última aquisição dessa forma de onda realizada com 60 s de aplicação da MCOV a amplitude da corrente reduziu em mais de 50% do valor obtido para $t = 40$ s apresentando-se com 63,5 mA e distorcendo a forma de onda consideravelmente.

Tanto a redução na amplitude quanto a distorção da forma de onda da corrente ocorrem devido ao aumento da temperatura, que reduz a umidade na interface entre o invólucro e a fibra de vidro que envolve os varistores. No entanto, o aquecimento incomum do dispositivo se reproduz também nos varistores influenciando a componente resistiva da corrente [20] e levando a degradação dos blocos resultando em falha elétrica do dispositivo.

4.2.7 FABRICANTE B – AMOSTRA USADA

A Figura 4.17 apresenta o comportamento da corrente de fuga da amostra 27 pertencente ao fabricante B ao longo do ensaio de imersão. Esse para-raios estava instalado em campo na região da Zona da Mata mineira.

A corrente de fuga medida após 2 semanas de imersão apresentou uma brusca variação em sua amplitude. No entanto, o comportamento posterior mostrou-se diferente de todos os resultados encontrados para as amostras desse e dos demais fabricantes. A corrente de fuga reduziu sua amplitude a cada ciclo de medição até o 7º ciclo. A partir do 8º ciclo a corrente novamente apresentou valores elevados, entrando em avalanche térmica no 9º ciclo.



Figura 4.17 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão na amostra retirada de campo do fabricante B.

A medição da corrente de fuga da amostra 27 após a 1ª semana de imersão, apesar de apresentar uma amplitude considerada aceitável para esse tipo de dispositivo apresentou ruídos característicos de descargas parciais, conforme identificado na Figura 4.18. Essa constatação foi baseada apenas na

experiência de trabalhos anteriores, uma vez que o laboratório não possui medidor de descargas parciais e portanto não foi realizada tal medição.

Os valores indicados nas imagens para o canal 1 correspondem à queda de tensão sobre o shunt de medição de 1040Ω , enquanto que o canal 2 indica a tensão através do divisor de tensão de relação 44510/1.

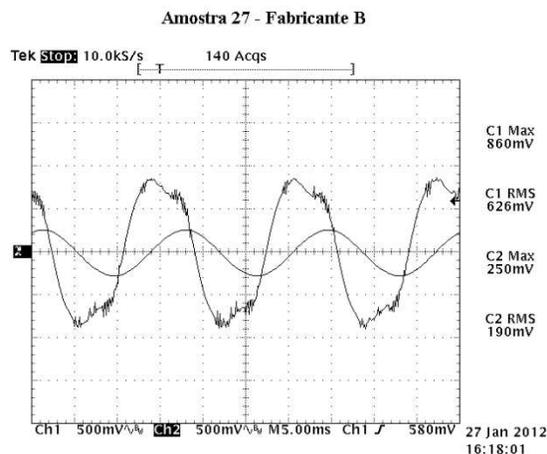


Figura 4.18 - Corrente de fuga da amostra 27 do fabricante B após 1º ciclo de imersão.

A partir da 2ª semana de imersão observou-se instabilidade na amplitude da corrente de fuga. A Figura 4.19 apresenta o comportamento da corrente durante a medição realizada na 9ª semana de imersão. Os valores indicados nas imagens correspondem à queda de tensão sobre o shunt de medição de 1040Ω , sendo a referência 1 obtida no instante da energização e as demais medidas adquiridas com 20, 40 e 60 s de aplicação da MCOV.

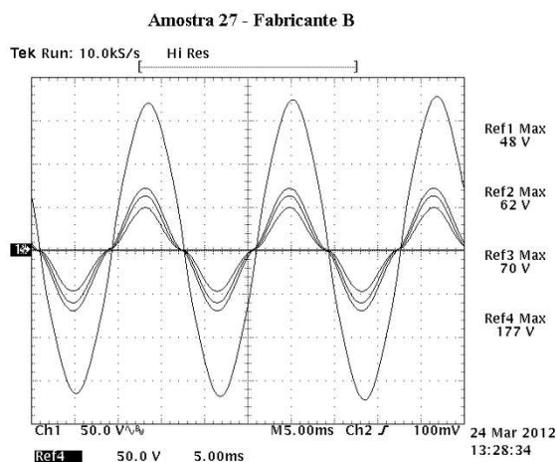


Figura 4.19 - Comportamento da corrente de fuga na amostra retirada de campo do fabricante B – 9º ciclo.

A forma de onda da corrente durante os 40 s iniciais de aplicação da tensão representam muito bem o comportamento da forma de onda desde a 2ª semana de imersão, com predominância da componente resistiva indicando a degradação do bloco.

A aquisição da corrente com 60 s de aplicação da MCOV apresentou amplitude de 170,2 mA e forma de onda incomum para essa amostra, praticamente senoidal. A amostra falhou imediatamente após a aquisição do sinal.

Através de para-raios de sacrifício foi possível verificar que na eminência da falha os varistores se tornam um curto e aos poucos a forma de onda da corrente de fuga assume a forma de onda da tensão de alimentação, ou seja, senoidal.

As formas de onda distorcidas indicam que o mecanismo de falha para esse fabricante tenha acontecido inicialmente nos blocos e, em seguida, através da passagem da corrente pela interface entre o invólucro e a fibra de vidro. Como o revestimento da parte ativa desse para-raios é composto de fitas de fibra de vidro trançadas, a interface entre o invólucro e a fibra apresenta-se resistente a penetração de umidade. Dessa forma, os blocos de varistores são os mais susceptíveis a degradação devido à penetração de umidade.

4.2.8 FABRICANTE C – AMOSTRA USADA

A Figura 4.20 apresenta o comportamento da corrente de fuga da amostra 28 pertencente ao fabricante C ao longo do ensaio de imersão. Esse para-raios estava instalado em campo na região da Zona da Mata mineira.

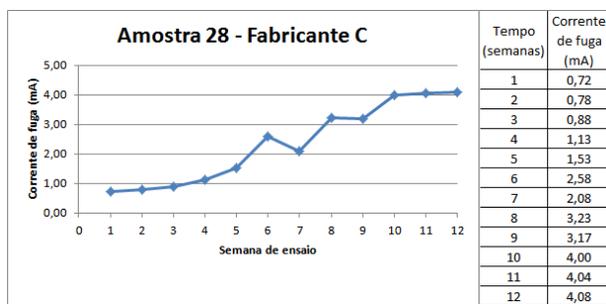


Figura 4.20 - Comportamento da corrente de fuga ao longo do ensaio de imersão na amostra retirada de campo do fabricante C.

Verifica-se um aumento praticamente contínuo na amplitude da corrente de fuga desde a 1ª medição até o 6º ciclo. Na 7ª semana de ensaio a amplitude da corrente teve uma redução de 19,4% do valor obtido na medição anterior, mantendo a forma de onda senoidal. Nas demais medições a corrente de fuga continuou aumentando, porém apresentando-se com uma pequena taxa de crescimento. Apesar da constante variação nos valores da corrente de fuga apresentados desde a primeira medição, a amostra não falhou efetivamente durante o ensaio.

A Figura 4.21 apresenta o comportamento da corrente da amostra 28 do fabricante C durante a medição realizada ao final do ensaio de imersão. Os valores indicados nas imagens correspondem à queda de tensão sobre o shunt de medição de 1040 Ω, sendo a referência 1 obtida no instante da energização e as demais medidas adquiridas com 20, 40 e 60 s de aplicação da MCOV.

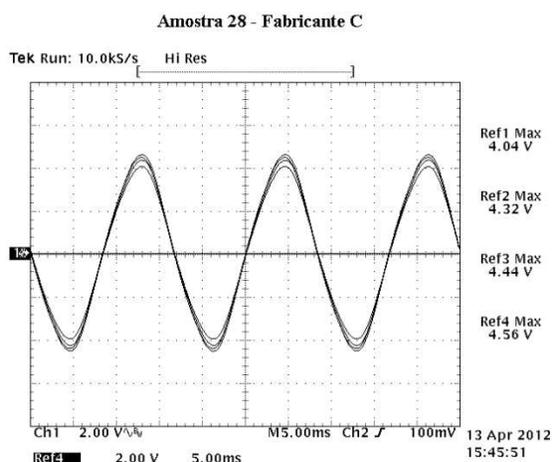


Figura 4.21 - Comportamento da corrente de fuga na amostra retirada de campo do fabricante C – 12º ciclo.

Verifica-se um comportamento levemente instável na amplitude da corrente. A última aquisição realizada com 60 s de aplicação da tensão forneceu uma corrente de 4,4 mA.

4.2.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise da amplitude e forma de onda da corrente, conforme explicitado ao longo deste capítulo, oferecem um bom indicativo em relação ao mecanismo de degradação dos para-raios submetidos ao ensaio de imersão/envelhecimento. Averiguando-se a amplitude da corrente de fuga ao longo do ensaio é possível afirmar se houve ou não penetração de umidade nos para-raios, enquanto que a análise da forma de onda oferece um indicativo do caminho dessa corrente nesses dispositivos de proteção.

Foram submetidos ao teste de imersão 25 para-raios novos com invólucro de silicone pertencentes à 5 fabricantes (3 nacionais e 2 importados) e outros 3 para-raios também com invólucro de silicone retirados de campo pertencentes a 3 fabricantes nacionais. Ao término do ensaio, 9 amostras novas e 1 amostra retirada de campo apresentaram falha elétrica durante a medição da corrente de fuga.

A Figura 4.22 apresenta o percentual de falha por fabricante considerando-se as amostras novas. Verifica-se que apenas 2 fabricantes não

apresentaram falha elétrica em nenhuma amostra. Um nacional (fabricante C) e um importado (fabricante E).

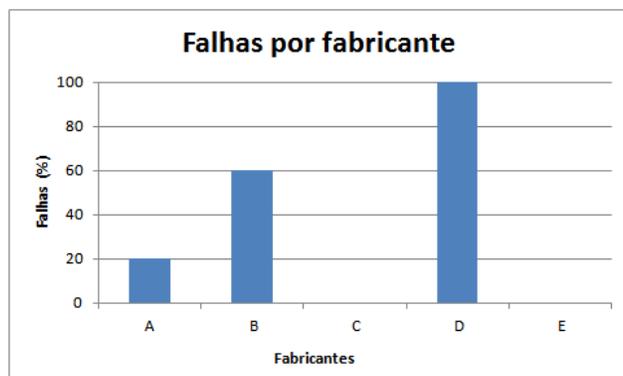


Figura 4.22 - Percentual de falha por fabricante ao longo do ensaio de imersão.

A Figura 4.23 oferece o perfil de ocorrência das falhas ao longo do ensaio de imersão das amostras novas. As duas primeiras semanas de imersão são marcadas pelos maiores índices de falhas ao longo de todo o ensaio. Nesse período concentra-se as falhas das 5 amostras pertencentes ao fabricante D, com duas falhas ocorrendo durante a 1ª semana e as outras três falhas na 2ª semana.

A 5ª, 6ª e 8ª semana do ensaio de imersão são marcadas pela ocorrência de falhas de 3 amostras pertencentes ao fabricante B, uma a cada semana. A 12ª semana de ensaio, ou seja, última semana de imersão é caracterizada pela falha de 1 amostra do fabricante A.

Conforme destacado anteriormente o fabricante C e E não apresentaram nenhuma falha ao longo do ensaio.



Figura 4.23 - Perfil de ocorrência de falhas ao longo do ensaio de imersão.

Entre os para-raios submetidos ao ensaio de imersão, 18 amostras não falharam eletricamente. No entanto, avaliar o desempenho dos para-raios baseando-se apenas nessa informação torna o estudo muito genérico.

Buscando-se quantificar o aumento da corrente de fuga nas amostras que não falharam durante o ensaio a Figura 4.24 apresenta a relação entre a corrente de fuga medida no 12º ciclo e a corrente medida no 1º ciclo do ensaio de imersão.

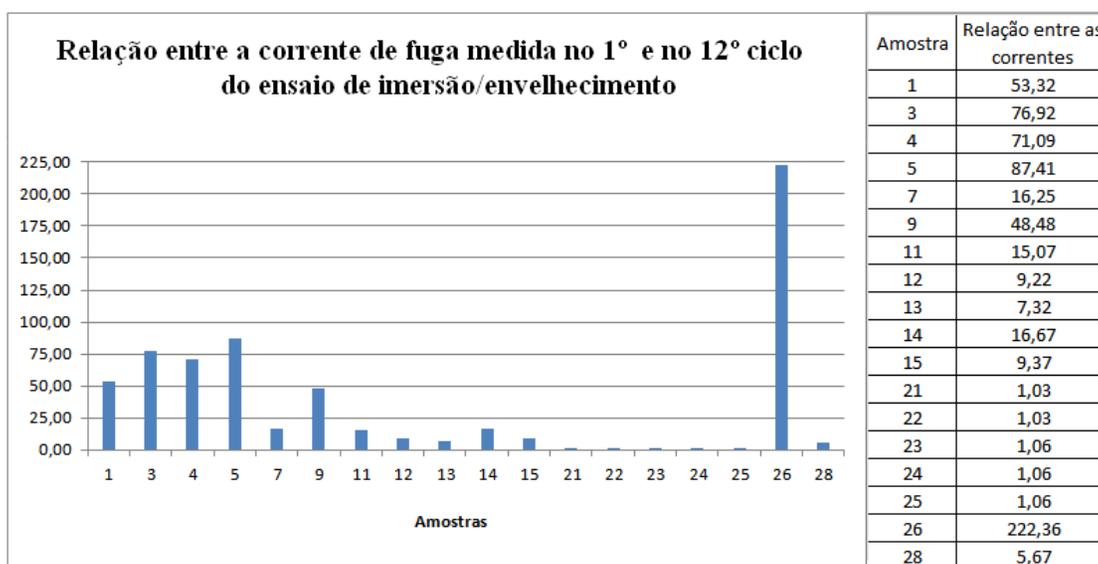


Figura 4.24 - Relação entre a corrente de fuga medida no 1º e no 12º ciclo do ensaio de imersão/envelhecimento.

Observa-se para as amostras do fabricante A um aumento em média de 72,1 vezes a corrente medida no 1º ciclo. O fabricante B indica um aumento médio de 32,4 vezes a corrente do 1º ciclo. O fabricante C mostra um aumento médio de 11,5 vezes a corrente do 1º ciclo enquanto que o fabricante E apresenta um comportamento praticamente constante ao longo de todo o ensaio, o aumento médio da corrente no final do ensaio para esse fabricante foi de 1,05.

4.3 Comportamento da tensão residual

A medição da tensão residual para descarga atmosférica consistiu em aplicar a corrente nominal dos para-raios com uma forma de onda do tipo 8/20 μ s. De acordo com [20], a frente de onda da corrente deve estar compreendida entre 7 e 9 μ s e o tempo de cauda entre 18 e 22 μ s, sendo que o tempo de cauda pode apresentar valores fora dessa faixa sem trazer solicitações adicionais ao para-raios.

A Figura 4.25 apresenta a forma de onda do impulso atmosférico aplicado aos para-raios ao longo do ensaio de imersão. O tempo de subida (C1 Rise) é o tempo que a onda leva para sair de 10% e atingir 90% de seu valor, definido a partir de identidade trigonométrica. Dessa forma deve-se multiplicar C1 Rise por 1,25, e C1 Max é medido usando uma ponta de prova com ordem de grandeza de 100 vezes o valor de leitura.

A indicação na figura feita por C2 Max é o valor de pico da tensão residual entre os terminais do para-raios usando-se a relação de 17255,7/1.

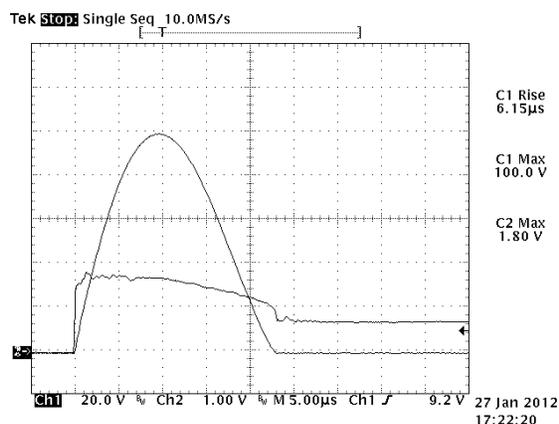


Figura 4.25 - Impulso atmosférico aplicados às amostras ao longo do ensaio de imersão.

4.3.1 FABRICANTE A

A Figura 4.26 apresenta o comportamento da tensão residual nas amostras do fabricante A ao longo do ensaio de imersão. Como a amostra 2 apresentou formação de bolha durante a medição da corrente de fuga e

aquecimento incomum no 9º ciclo, optou-se por não submeter essa amostra à tensão residual a partir desse ensaio, pois ela seria aberta para averiguação dos mecanismos de degradação e, caso ocorresse a falha por tensão residual, a explosão da amostra poderia mascarar suas características de degradação.

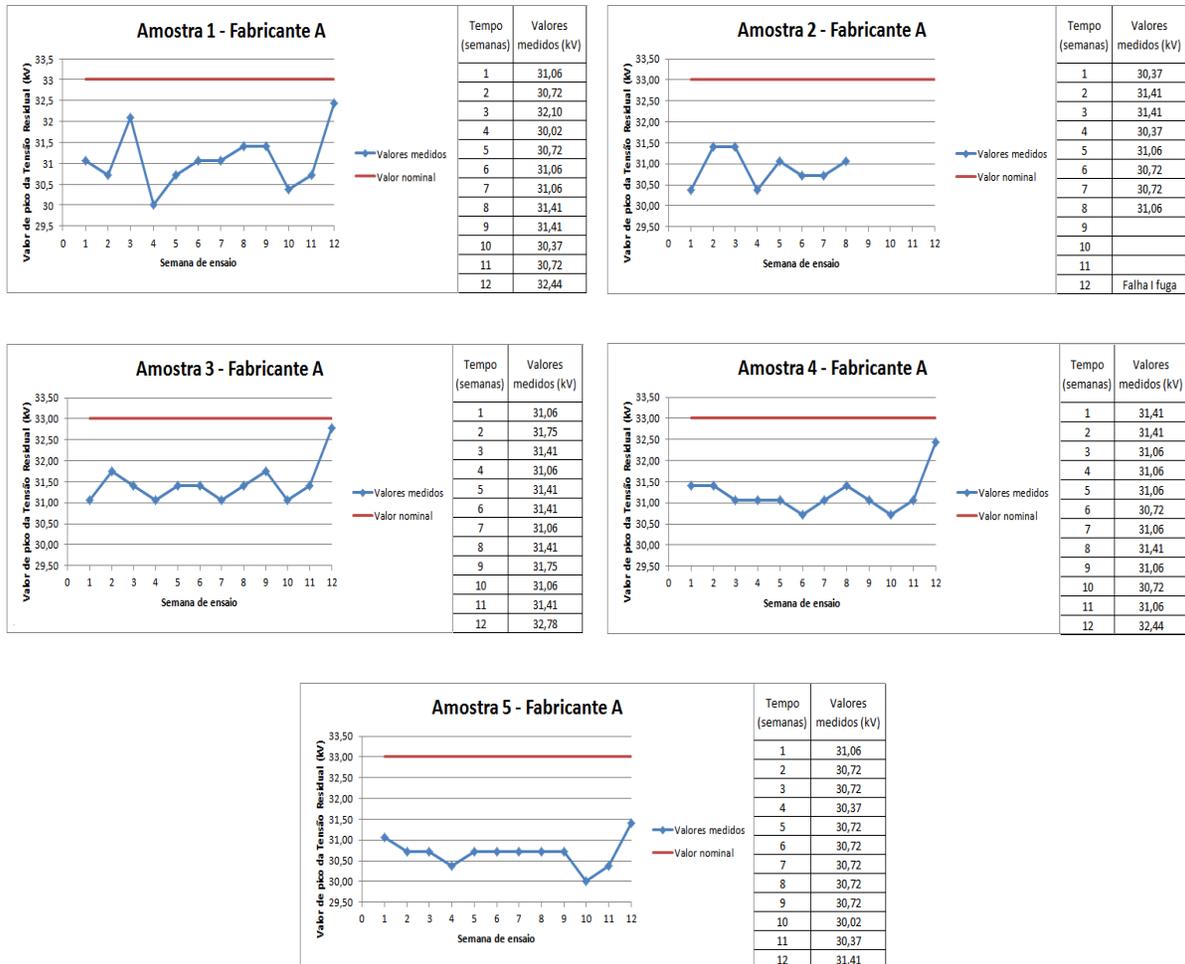


Figura 4.26 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante A.

4.3.2 FABRICANTE B

A Figura 4.27 apresenta o comportamento da tensão residual nas amostras do fabricante B ao longo do ensaio de imersão. O ciclo em que as falhas ocorreram também é identificado.

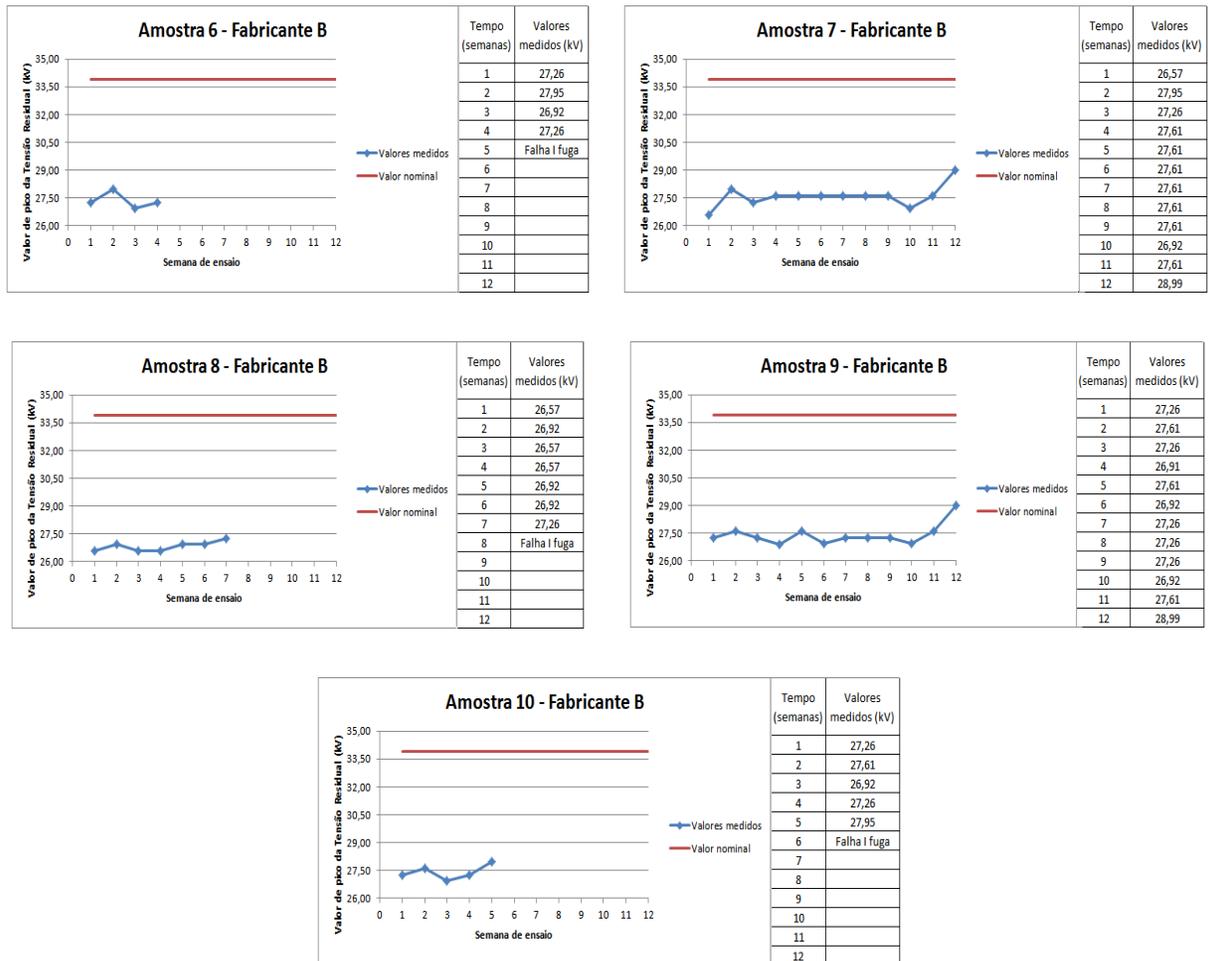
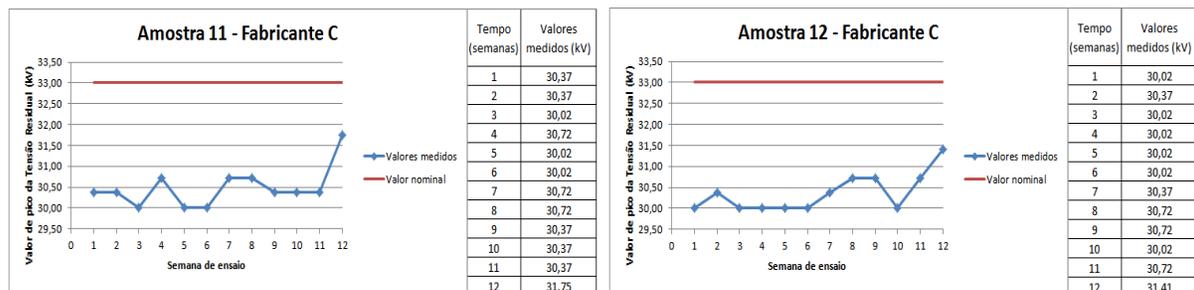


Figura 4.27 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante B.

4.3.3 FABRICANTE C

A Figura 4.28 apresenta o comportamento da tensão residual nas amostras do fabricante C ao longo do ensaio de imersão.



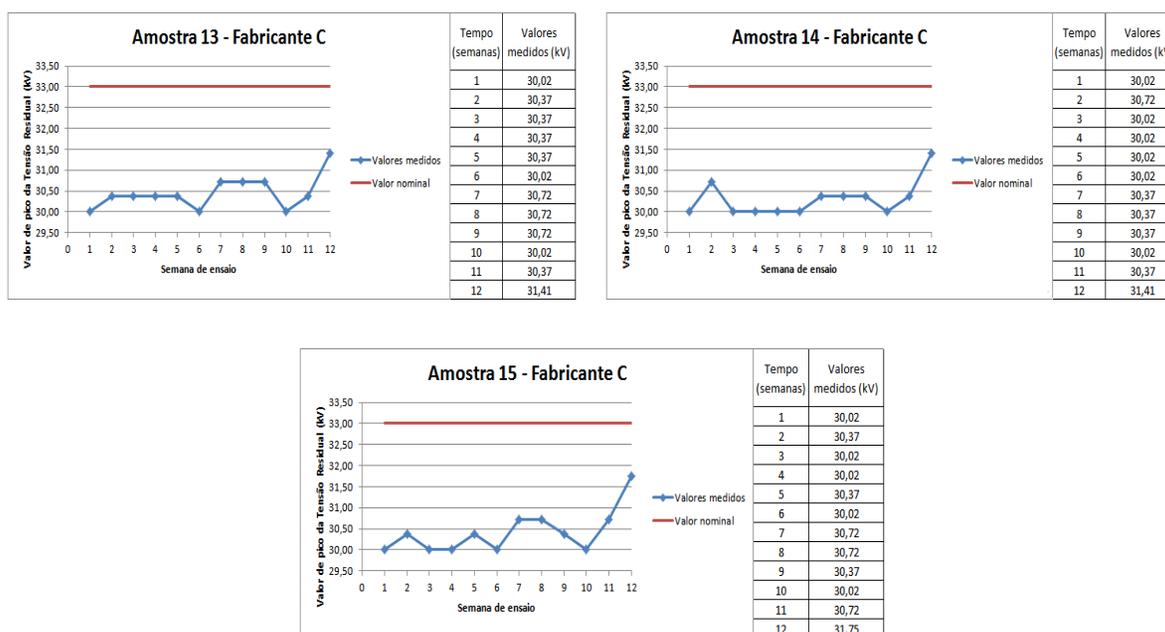
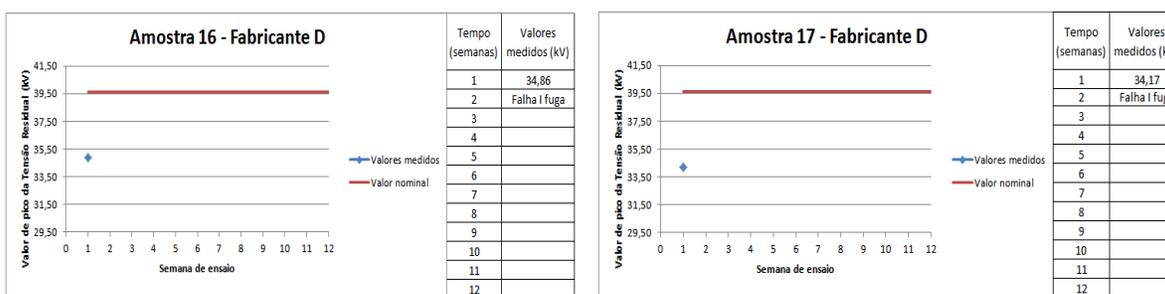


Figura 4.28 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante C.

4.3.4 FABRICANTE D

A Figura 4.29 apresenta o comportamento da tensão residual nas amostras do fabricante D ao longo do ensaio de imersão. Apenas 3 amostras desse fabricante foram submetidas à medição da tensão residual, pois os outros 2 para-raios falharam no 1º ciclo de imersão durante a realização da medição da corrente de fuga.



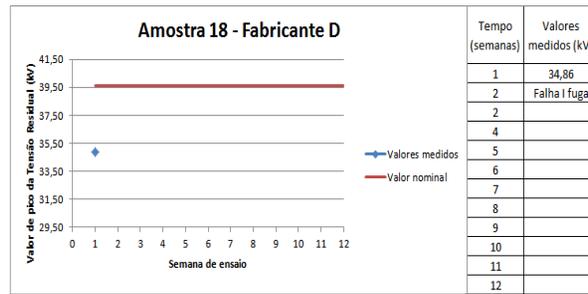


Figura 4.29 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante D.

4.3.5 FABRICANTE E

A Figura 4.30 apresenta o comportamento da tensão residual nas amostras do fabricante E ao longo do ensaio de imersão.

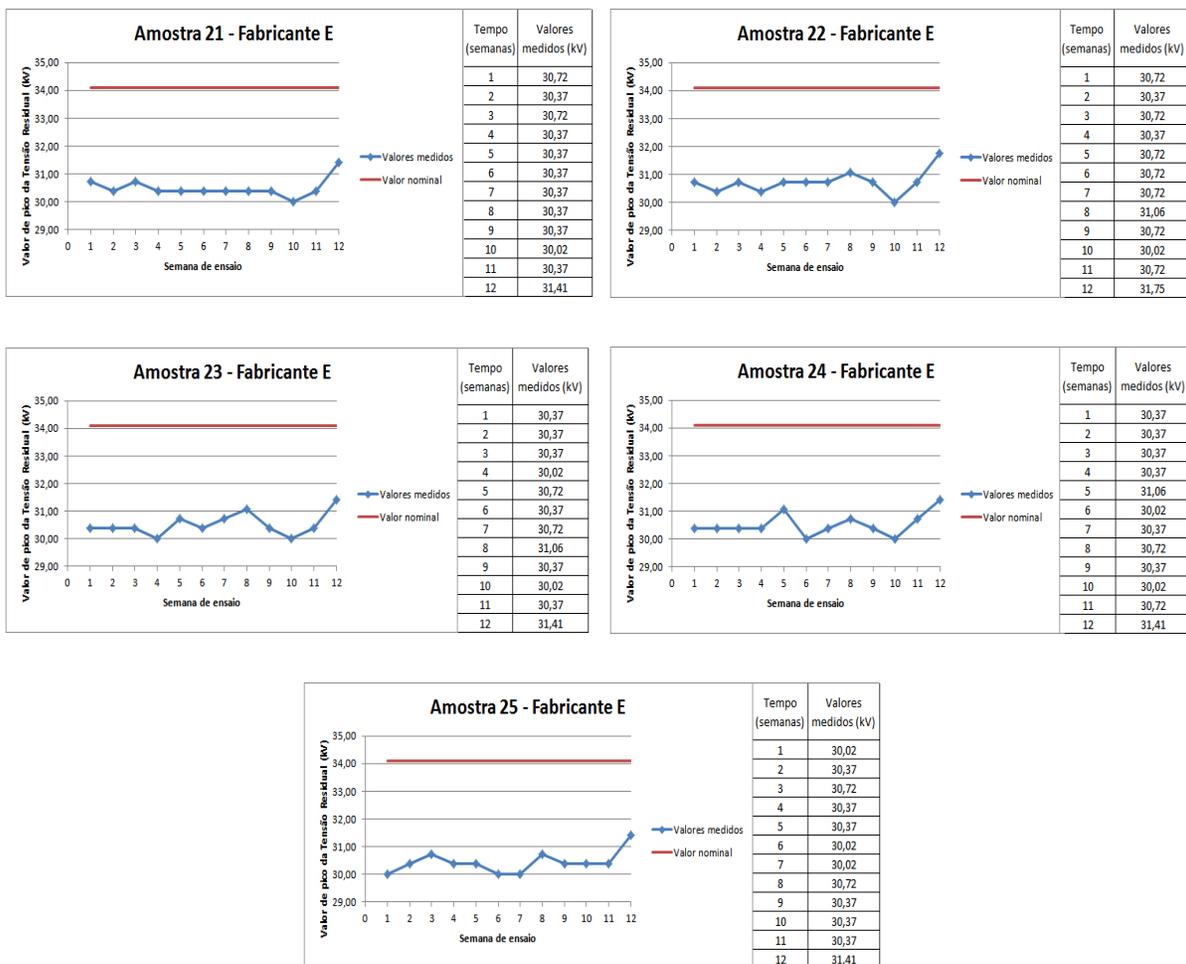


Figura 4.30 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Fabricante E.

4.3.6 AMOSTRAS USADAS

A Figura 4.31 apresenta o comportamento da tensão residual nas amostras retiradas de campo dos fabricantes A, B e C ao longo do ensaio de imersão.

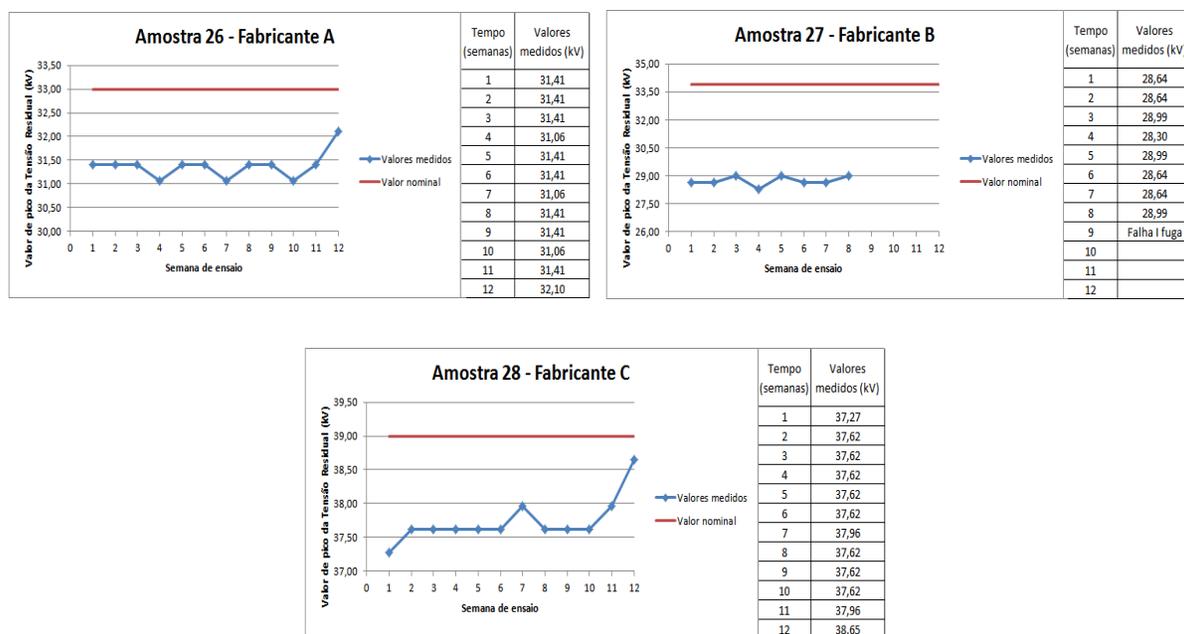


Figura 4.31 - Comportamento da tensão residual ao longo do ensaio de imersão – Amostras retiradas de campo.

4.3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A medição da tensão residual nos para-raios realizada ao longo do ensaio de imersão apresentou uma variação extremamente pequena na amplitude dos valores medidos. A Tabela 4.1 apresenta uma síntese do comportamento da tensão residual nos para-raios submetidos à imersão.

Tabela 4.1 - Síntese do comportamento da tensão residual.

Tipo	Fabricante	Amostra	Relação entre o Maior e o Menor Valor Medido da Tensão Residual (%)	Valor Médio	Desvio Padrão
Novas	A	1	8,06	31,09	0,68
		2	3,42	30,89	0,41
		3	5,53	31,46	0,48
		4	5,59	31,21	0,45
		5	4,63	30,69	0,35
	B	6	3,83	27,35	0,43
		7	9,11	27,58	0,57
		8	2,60	26,82	0,26
		9	7,73	27,41	0,56
		10	3,83	27,40	0,39
	C	11	5,76	30,49	0,47
		12	4,63	30,37	0,45
		13	4,63	30,46	0,40
		14	4,63	30,31	0,42
		15	5,76	31,43	0,51
	D	16	-	34,86	-
		17	-	34,17	-
		18	-	34,86	-
		19	-	-	-
		20	-	-	-
	E	21	4,63	30,49	0,34
		22	5,76	30,72	0,42
		23	3,42	30,51	0,40
		24	4,63	30,51	0,40
		25	4,63	30,43	0,39
Usadas	A	26	3,35	31,38	0,28
	B	27	2,44	28,73	0,24
	C	28	3,7	37,73	0,34

Verificou-se que a medição da tensão residual não oferece um bom indicativo com relação à penetração de umidade nos para-raios. Mesmo para as amostras mais degradadas pela umidade, detectadas através da análise da corrente de fuga, a variação na amplitude da tensão residual é pequena. A relação entre o máximo valor de tensão residual medido e o valor mínimo medido em geral

fica abaixo dos 5% para a maioria das amostras, enquadrando-se, portanto, em possíveis erros de medição.

Todos os valores de tensão residual medidos ficaram abaixo do valor máximo assegurado pelo fabricante e a dispersão desses valores determinada através do cálculo do desvio padrão excedeu o valor de 0,5, considerado como aceitável, em apenas 5 amostras.

Nenhum para-raios falhou durante a aplicação do impulso atmosférico e o ensaio de tensão residual mostrou-se inconclusivo em relação à averiguação da presença de umidade interna nos dispositivos.

Capítulo 5. Análise da Hidrofobicidade dos Para-raios

5.1 Aspectos gerais

Conforme explicitado anteriormente, os para-raios são continuamente submetidos à inúmeros estresses climáticos. A capacidade do invólucro de silicone em repelir a água em seu estado líquido (característica hidrofóbica) é particularmente vantajosa para a utilização desses dispositivos em sistemas de energia ao ar livre. O próprio design dos invólucros dos para-raios associados à baixa energia superficial do silicone faz com que a água escoe e não haja a formação de filmes d'água.

De acordo com [35] essa energia superficial baixa é decorrente das fracas interações moleculares existentes entre os grupos metis que compõem a estrutura do silicone. Esta é uma das propriedades que auxiliam na longevidade destes equipamentos quando instalados principalmente em regiões de poluição intensa.

Quando uma superfície hidrofílica é molhada, a água não é repelida por ela, sendo formado um filme que a recobre. No caso de um dispositivo elétrico, deseja-se uma superfície hidrofóbica, para que a água não seja um caminho de baixa resistência elétrica que provoque a ocorrência de descargas disruptivas. Os materiais cujo ângulo de contato das gotas d'água é inferior a 90° são considerados hidrofílicos e superiores a 90° são considerados hidrofóbicos.

Muitos trabalhos e estudos técnicos/científicos sobre as propriedades destes materiais têm sido voltado aos isoladores poliméricos [12], entretanto, tais

estudos podem ser estendidos aos para-raios cujo invólucro constitui-se dos mesmos materiais.

Solicitações operacionais, tais como a presença de arcos elétricos na superfície do polímero, exposição aos raios UV e ataques químicos, causam redução ou perda total da hidrofobicidade aumentando a formação de bandas secas e acelerando a degradação do revestimento polimérico [15].

Os silicões são capazes de transferir parcialmente sua hidrofobicidade aos depósitos de contaminantes vindos do meio ambiente tais como poeira, sal marinho, etc. Isto ocorre por causa das pequenas quantidades de siloxanos, que migram para a superfície do elastômero cobrindo os depósitos com uma rede hidrofóbica. Por outro lado, as características hidrofóbicas presentes em materiais poliméricos como o silicone se alteram parcialmente ou totalmente, devido estresses ambientais e elétricos sofridos ao longo do tempo [13].

O ensaio de hidrofobicidade desenvolveu-se com base na metodologia da norma IEC/TS 61245, entretanto, algumas adaptações foram realizadas uma vez que o procedimento descrito pela norma exige que seja retirada parte do invólucro, impossibilitando a realização dos ensaios elétricos nessas amostras. Sendo assim a classificação do grau de hidrofobicidade das amostras foi realizada nos para-raios completos e não apenas em corpos de prova, utilizando-se para tal o Guia STRI.

Para avaliar a classificação de hidrofobicidade uma área da superfície do para-raio é borrifada com água deionizada e a classificação é diferenciada em seis níveis de hidrofobicidade, onde HC1 apresenta a maior hidrofobicidade e HC6 a menor hidrofobicidade, ou seja, é o material mais hidrofílico. Seis imagens servem de escala para os níveis de hidrofobicidade serem obtidos por comparação, estas fotos estão disponíveis no Guia de Classificação de Hidrofobicidade STRI e estão demonstradas na Figura 5.1.

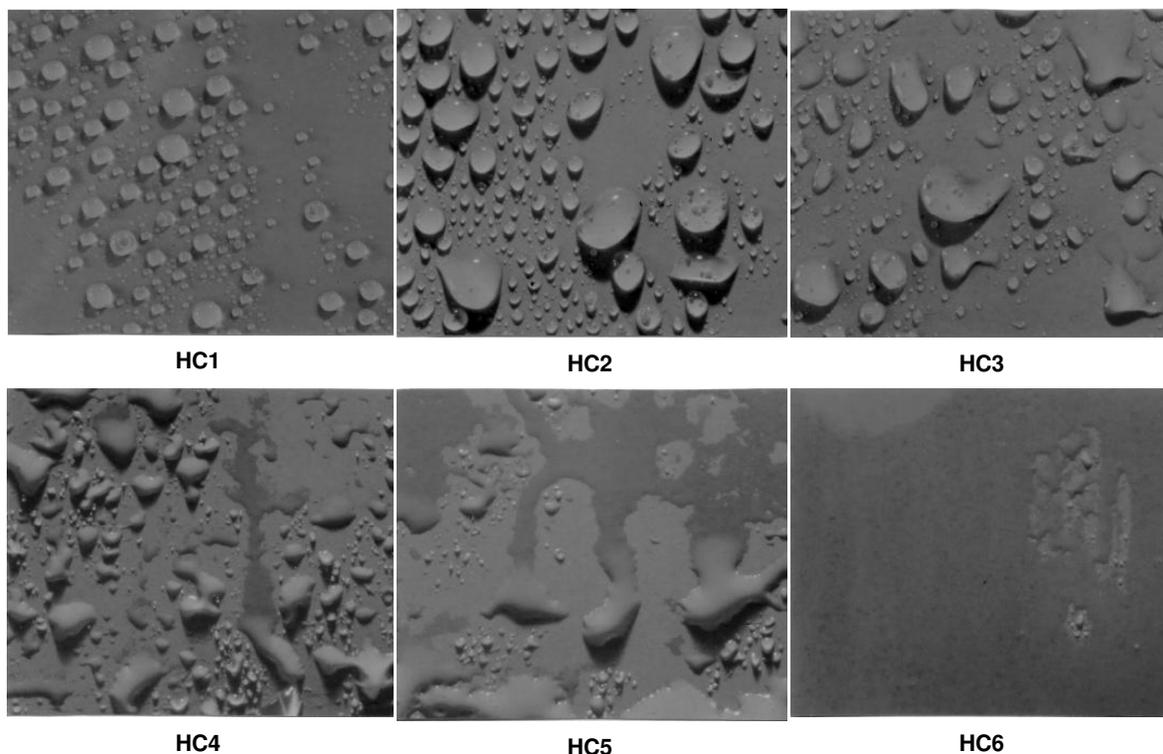


Figura 5.1 - Classes de hidrofobicidade segundo o Guia STRI.

O procedimento para classificação da hidrofobicidade, de acordo com [5], deve ser realizado de 1 a 2 vezes por segundo a uma distância 25 ± 10 cm, durante um intervalo de tempo situado entre 20 e 30 segundos. A avaliação deve ser realizada até 10 segundos após o último borrifo e preferencialmente a amostra deve estar com uma inclinação de 20° a 30° . O pulverizador deve dispersar de 0,7 a 1,0 mL por borrifamento, sendo o ângulo de dispersão de 50° a 70° .

O procedimento adotado consistiu em borrifar água deionizada com um borrifador uma vez por segundo durante 25 segundos a uma distância de 25 cm. Como se utilizou para-raios completos e não apenas corpos de prova a hidrofobicidade nos para-raios foi avaliada na primeira saia de cada amostra levando em consideração o ângulo de inclinação do próprio para-raio em relação ao seu eixo.

5.2 Hidrofobicidade - Pós ensaio de imersão/envelhecimento

Buscando-se avaliar as condições de hidrofobicidade dos para-raios ao término do ensaio de imersão/envelhecimento, desenvolveu-se a análise de hidrofobicidade perdida (Hp) e posteriormente da hidrofobicidade recuperada (Hr).

As amostras analisadas são aquelas que suportaram eletricamente o ensaio de imersão/envelhecimento e são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Para-raios submetidos à análise de hidrofobicidade pós imersão.

Tipo	Fabricante	Amostra
Novos	A	1
		3
		4
		5
	B	7
		9
	C	11
		12
		13
		14
		15
		21
	E	22
		23
		24
25		
26		
Usados	A	26
	C	28

Verifica-se que nenhuma amostra do fabricante D foi submetida à análise de hidrofobicidade pós ensaio de imersão. Isso ocorreu, pois apenas os para-raios que não falharam eletricamente foram mantidos no tanque durante os 3 meses de ensaio e todas as amostras desse fabricante apresentaram falha.

5.2.1 HIDROFOBICIDADE PERDIDA (HP)

O procedimento para avaliar se houve ou não perda de hidrofobicidade dos para-raios consistiu em retirar as amostras do tanque onde permaneciam nas condições do ensaio de imersão/envelhecimento e deixar as amostras esfriarem e secarem em temperatura ambiente por 1 hora. Como a água usada no ensaio de imersão foi obtida diretamente da rede de fornecimento, há deposição parcial de sedimentos nas saias dos para-raios. Esses sedimentos foram mantidos durante a análise da hidrofobicidade para representar o estado real das amostras após 3 meses de envelhecimento.

Em seguida utilizou-se um borrifador para borrifar água deionizada uma vez por segundo durante 25 segundos a uma distância de 25 cm da região a ser avaliada e fotografando-a.

A formação da película d'água em grande parte das amostras contribuiu para que as imagens apresentadas tivessem uma qualidade ruim, pois a camada de água desfocava a foto.

A Figura 5.2 apresenta as imagens dos para-raios pertencente ao fabricante A, durante a averiguação da hidrofobicidade perdida. Verifica-se que nas amostras 1, 3 e 4 o silicone perdeu totalmente sua característica de hidrofobicidade formando uma película de água sobre o invólucro. Esse comportamento demonstra que a amostra tornou-se hidrofílica, classificando-a como HC6. Apenas a amostra 5 desse fabricante apresentou formação de gotículas d'água em parte da região sob análise, demonstrando um desempenho um pouco melhor do que as demais amostras desse fabricante mas que ainda a caracteriza como parcialmente hidrofílica, ou seja, HC5.

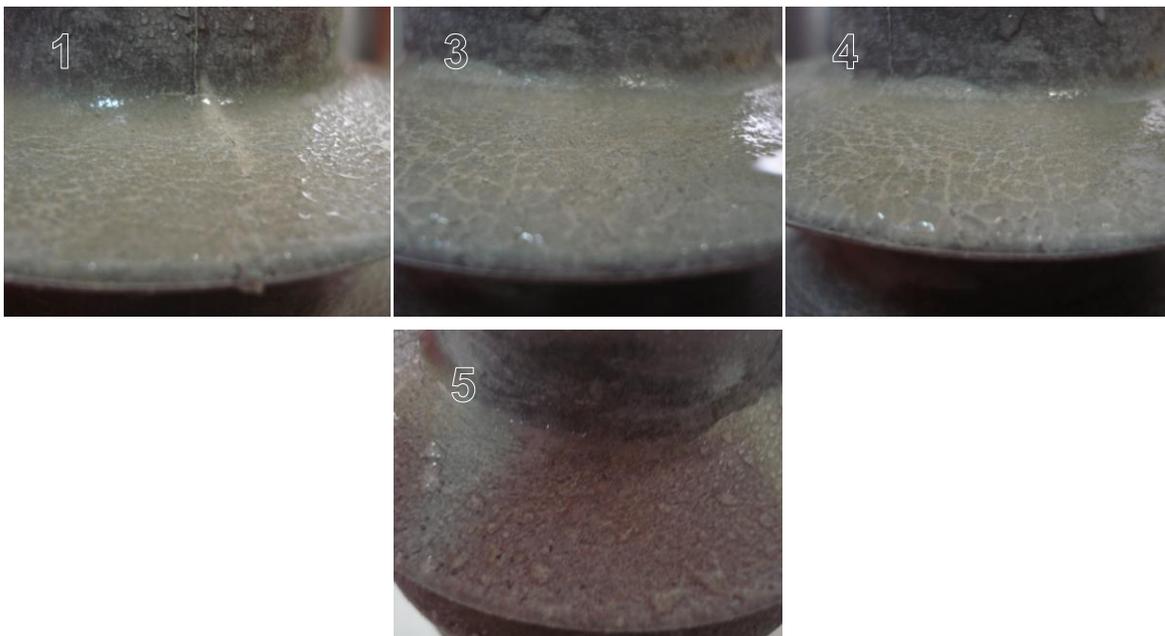


Figura 5.2 - Hidrofobicidade perdida – amostras do fabricante A.

A Figura 5.3 apresenta as amostras analisadas do fabricante B. Tanto a amostra 7 quanto a amostra 9 demonstraram comportamento altamente hidrofílico, com classificação HC6. A formação de uma película d'água cobrindo totalmente a saia dos para-raios dificultou o registro de uma imagem clara que pudesse evidenciar a ausência da hidrofobicidade do material.



Figura 5.3 - Hidrofobicidade perdida – amostras do fabricante B.

A Figura 5.4 apresenta as imagens das amostras do fabricante C. Verifica-se em praticamente todas as amostras a formação de um filme d'água representativo da ausência de hidrofobicidade. Apenas a amostra 11, apresenta

pequenos espaços com dispersão de água, classificando-a com o nível HC5. As demais amostras são classificadas como HC6.

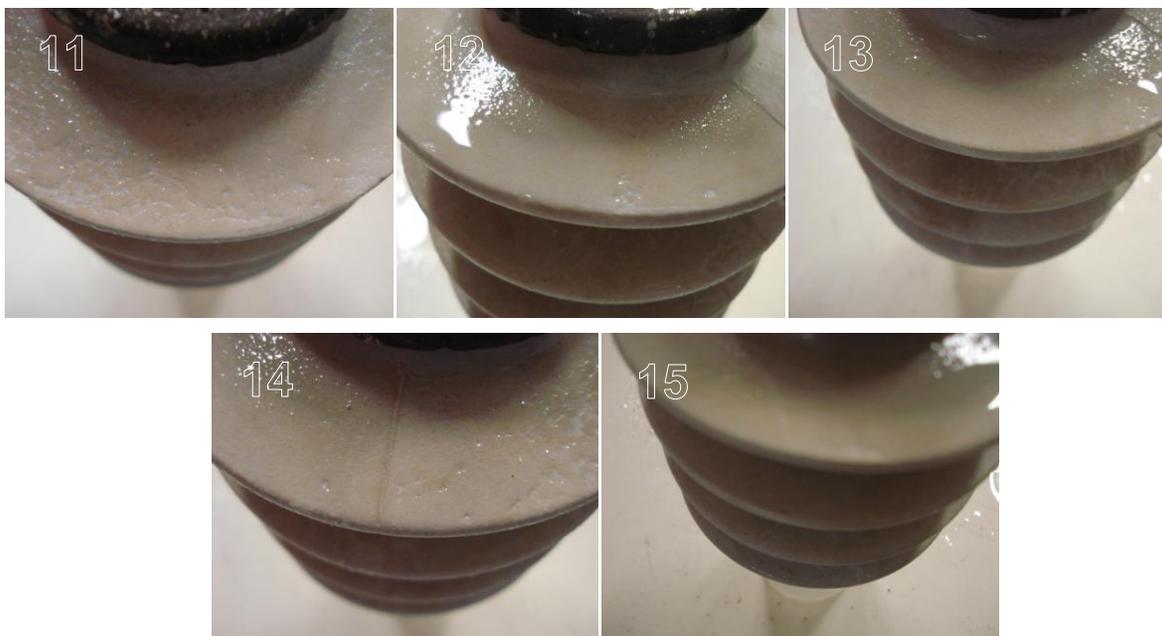


Figura 5.4 - Hidrofobicidade perdida – amostras do fabricante C.

A Figura 5.5 apresenta as imagens dos para-raios do fabricante E. As amostras 21, 22, 23 e 25 apresentaram um bom desempenho comparativamente às amostras dos outros fabricantes. A formação de gotículas destaca a característica de hidrofobicidade do material, no entanto, como essas gotas apresentam-se de forma heterogênea quanto o formato e tamanho sua classificação é de HC4, ou seja, material hidrofóbico com leve tendência ao desempenho hidrofílico.

A amostra 24 ao contrário do comportamento das demais amostras desse fabricante apresentou-se como altamente hidrofílica, ou seja, observou-se a formação de uma película d'água ao longo de praticamente todo o invólucro, classificando-a como HC6.



Figura 5.5 - Hidrofobicidade perdida – amostras do fabricante E.

A Figura 5.6 apresenta as imagens dos para-raios 26 e 27, pertencentes aos fabricantes A e C respectivamente. Essas amostras foram retiradas de campo e submetidas ao ensaio de imersão/envelhecimento.

Verifica-se que as duas amostras perderam suas características de hidrofobicidade, sendo então classificadas como HC6.



Figura 5.6 - Hidrofobicidade perdida – amostra 26 do fabricante A e amostra 28 do fabricante C.

A Tabela 5.2 apresenta de forma resumida a classificação dos para-raios submetidos à análise de hidrofobicidade perdida pós imersão.

Tabela 5.2 - Hidrofobicidade perdida (Hp) – pós imersão.

Tipo	Fabricante	Amostra	Classificação da hidrofobicidade
Novos	A	1	HC6
		3	HC6
		4	HC6
		5	HC5
	B	7	HC6
		9	HC6
	C	11	HC5
		12	HC6
		13	HC6
		14	HC6
		15	HC6
	E	21	HC4
		22	HC4
		23	HC4
		24	HC6
25		HC4	
Usados	A	26	HC6
	C	28	HC6

5.2.2 HIDROFOBICIDADE RECUPERADA (HR)

O silicone conforme apresentado anteriormente, possui em algumas situações capacidade de recuperação da hidrofobicidade quando o estresse responsável por sua perda é cessado. Buscando verificar se a perda da hidrofobicidade observada na análise da hidrofobicidade perdida pós imersão é permanente ou temporária, as amostras destacadas na Tabela 5.1 permaneceram

sem nenhum tipo de estresse durante 48 horas em ambiente climatizado e o procedimento de aspersão com água deionizada foi novamente executado.

A Figura 5.7 apresenta as imagens das amostras do fabricante A. Verifica-se que a amostra 1 permanece com a formação de película d'água ao longo da saia do para-raios, nesse caso não houve recuperação da hidrofobicidade perdida e a amostra continuou apresentando-se como altamente hidrofílica (HC6). As amostras 3, 4 e 5 apresentaram significativa melhora em seu desempenho, o que caracteriza uma perda temporária da hidrofobicidade. As amostras 3 e 4 foram classificadas como HC2 e a amostra 5 foi classificada com o maior grau de hidrofobicidade HC1.



Figura 5.7 - Hidrofobicidade recuperada – amostras do fabricante A.

A Figura 5.8 apresenta as imagens dos para-raios referentes ao fabricante B. Tanto a amostra 7 quanto a amostra 8, apresentou recuperação parcial da hidrofobicidade perdida sendo classificadas como HC4.



Figura 5.8 - Hidrofobicidade recuperada – amostras do fabricante B.

A Figura 5.9 apresenta as imagens dos para-raios pertencentes ao fabricante C. Todas as amostras apresentaram recuperação da hidrofobicidade. A amostra 11 recebeu a classificação de material mais hidrofóbico HC1, seguido pela classificação HC2 para as amostras 13, 14 e 15 e de HC3 para a amostra 12.

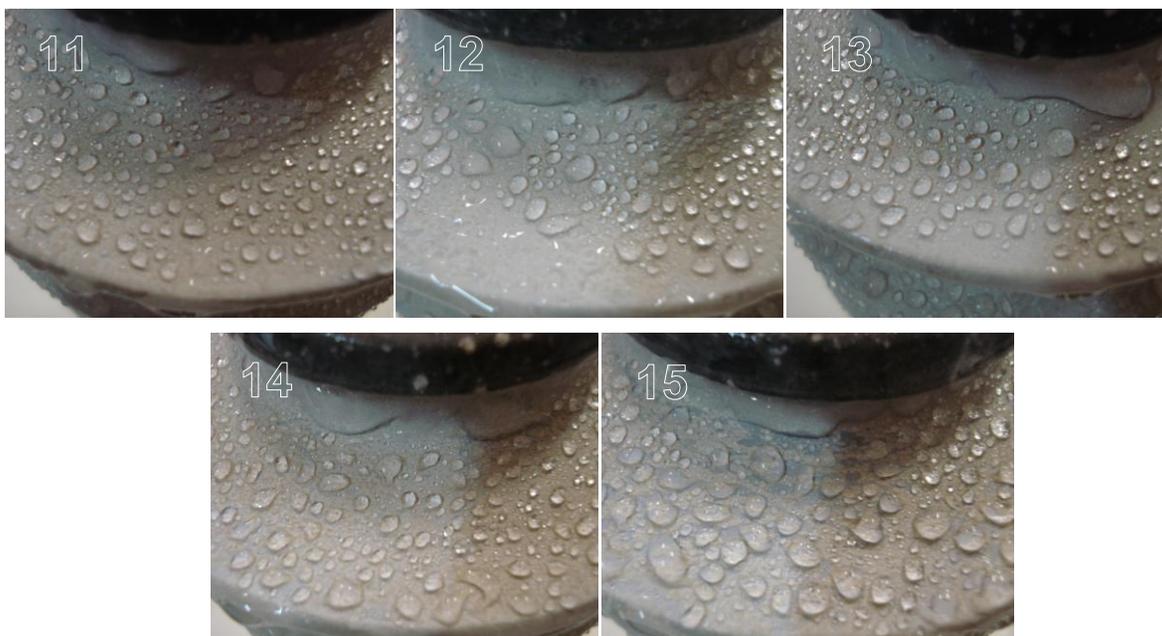


Figura 5.9 - Hidrofobicidade recuperada – amostras do fabricante C.

A Figura 5.10 apresenta as imagens dos para-raios pertencentes ao fabricante E. Todas as amostras apresentaram recuperação significativa da hidrofobicidade. As amostras 22 e 23 passaram a ser classificadas como HC1.

As amostras 21, 24 e 25 por sua vez foram classificadas como HC2.



Figura 5.10 - Hidrofobicidade recuperada – amostras do fabricante E.

A Figura 5.11 apresenta a amostra 26 e 28 dos fabricantes A e C. Verificou-se que a perda de hidrofobicidade para essas amostras foi permanente. Isso pode ser influência dos estresses sofridos pelas amostras quando as mesmas encontravam-se instaladas em campo. Tanto o para-raios 26 quanto o para-raios 28 permaneceram com a classificação HC6, indicando o comportamento hidrofílico.



Figura 5.11 - Hidrofobicidade recuperada – amostra 26 do fabricante A e amostra 28 do fabricante C.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos durante a análise da recuperação de hidrofobicidade dos 18 para-raios que suportaram os 3 meses de ensaio de imersão/envelhecimento sem que apresentassem falha elétrica.

Tabela 5.3 – Hidrofobicidade Recuperada (Hr) – pós imersão

Tipo	Fabricante	Amostra	Classificação da hidrofobicidade
Novos	A	1	HC6
		3	HC2
		4	HC2
		5	HC1
	B	7	HC4
		9	HC4
	C	11	HC1
		12	HC3
		13	HC2
		14	HC2
		15	HC2
	E	21	HC2
		22	HC1
		23	HC1
		24	HC2
25		HC1	
Usados	A	26	HC6
	C	28	HC6

5.2.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observando o gráfico da Figura 5.12 têm-se:

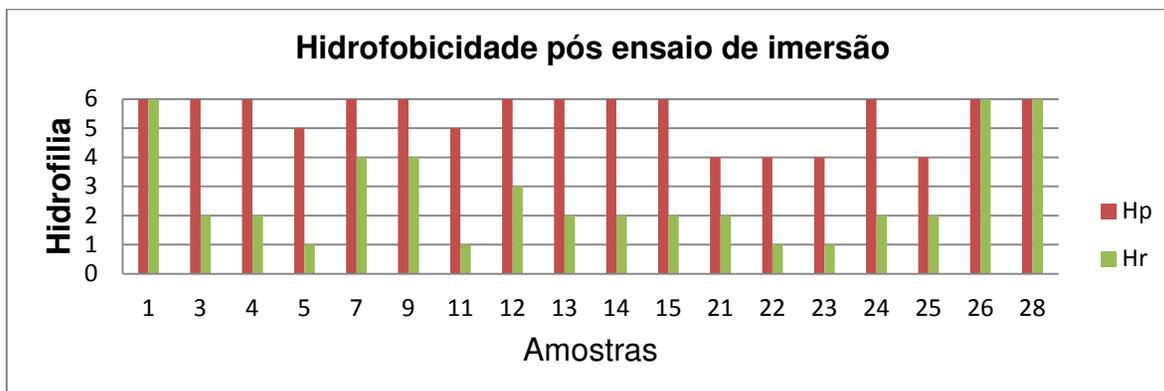


Figura 5.12 – Hidrofobicidade pós ensaio de imersão.

- Fabricante A – Verificou-se que durante a análise da perda de hidrofobicidade as amostras 1, 3 e 4 apresentavam-se como totalmente hidrofílicas. Essas amostras foram classificadas com o pior desempenho de hidrofobicidade de acordo com o guia STRI (HC6). A formação de um filme de água nas saias dos para-raios caracteriza essa perda de hidrofobicidade e caracteriza um comportamento hidrofílico dos invólucros de silicone. A amostra 5 apresentou um desempenho ligeiramente melhor, no entanto, sua classificação foi HC5 pois apesar da formação de poucas gotículas a predominância do filme d'água é visível.

Após 48 horas secando em ambiente climatizado as amostras foram novamente submetidas à análise para verificar se a perda de hidrofobicidade era temporária. Apenas a amostra 1 desse fabricante apresentou perda permanente da hidrofobicidade. As demais amostras recuperaram 4 níveis de hidrofobicidade, sendo a amostra 3 e 4 classificadas como HC2, enquanto a amostra 5 foi classificada como HC1 destacando-se como um comportamento altamente hidrofóbico dessa amostra;

- Fabricante B – Na verificação da perda de hidrofobicidade as amostras desse fabricante demonstraram um comportamento totalmente hidrofílico, com classificação para todos os para-raios igual a HC6. No ensaio de hidrofobicidade efetuado após 48 horas de descanso das amostras e realizado para verificar a capacidade do silicone em recuperar suas características de repelir a água em estado líquido, verificou-se que a perda da hidrofobicidade era temporária. Nessa situação as amostras 7 e 9 recuperaram parcialmente suas características hidrofóbicas, classificando-as como HC4;
- Fabricante C – Esse fabricante apresentou desempenho semelhante ao fabricante A com relação à perda de hidrofobicidade. A amostra 11 foi a única em que a formação da película d'água no invólucro foi parcial, classificando-a como HC5. As amostras 12, 13, 14 e 15 foram classificadas como extremamente hidrofílicas, ou seja, HC6. Após o período sem que as amostras sofressem nenhum tipo de estresse, a hidrofobicidade foi novamente analisada. Constatou-se que as amostras tiveram recuperação total (amostra 11) ou parcial (12, 13, 14 e 15) da hidrofobicidade. O que indica que a perda de hidrofobicidade nesse caso foi apenas temporária.
- Fabricante E – Esse fabricante foi o que apresentou resultados mais satisfatórios com relação à perda de hidrofobicidade quando comparado com os demais fabricantes. A única amostra desse fabricante considerada inicialmente como totalmente hidrofílica foi a amostra 24, as demais amostras ficaram com a classificação de hidrofobicidade parcial, ou seja, HC4. Essas amostras após as 48 horas sem serem submetidas a nenhum tipo de estresse foram novamente analisadas. As amostras 22 e 23 recuperaram totalmente sua característica de material altamente hidrofóbico (HC1) e as amostras 21, 22 e 24 recuperaram sua hidrofobicidade parcialmente (HC2);

- Amostra 26 do fabricante A e amostra 28 do fabricante C – Essas amostras após perda da hidrofobicidade não apresentaram recuperação sequer parcial da hidrofobicidade perdida. Esse fato pode ser atribuído aos mais variados estresses que as amostras sofreram quando estavam instaladas em campo, fazendo com a hidrofobicidade fosse perdida permanentemente.

Capítulo 6. Conclusões

- A metodologia adotada para medição da corrente de fuga foi eficiente para averiguar o desempenho elétrico dos para-raios sujeito à penetração de umidade. No entanto, como as medições foram realizadas em ciclos de uma semana, o intervalo de tempo de 7 dias não oferece uma data precisa com relação ao momento em que a estanqueidade do material tornou-se ineficiente;
- O aumento da corrente de fuga faz com que aumente também a temperatura interna do para-raios. Enquanto o dispositivo for capaz de dissipar uma quantidade de calor igual a que é gerada, a corrente mantém-se estável apesar de algumas vezes apresentar amplitudes elevadas. Quando o para-raios passa a dissipar uma quantidade menor de calor, a temperatura interna aumenta proporcionando o aumento da corrente de fuga e levando o para-raios à falha por instabilidade térmica;
- A resina polimérica reforçada com fibra de vidro que envolve a parte ativa dos para-raios do fabricante A, apresenta uma excelente proteção aos varistores, no entanto, a camada “lisa” entre esse revestimento e a parte interna do invólucro oferece um caminho de menor resistência à passagem da corrente, para o caso de presença de umidade interna;
- A fibra de vidro trançada utilizada pelo fabricante B apresentou boa aderência para o silicone, observado durante a abertura do para-raios. Essa aderência dificulta o caminho da corrente de fuga através da

interface entre o invólucro e a fibra. Nesse caso, observou-se que os blocos sofreram maior influência da umidade do que a interface.

- A corrente de fuga inicial dos para-raios, ou seja, aquela relacionada às suas características nominais, não podem ser avaliadas isoladamente para representar um melhor ou pior desempenho desses dispositivos. O fabricante C, por exemplo, apresenta a maior corrente de fuga inicial entre os fabricantes analisados, no entanto, foi o único fabricante nacional em que 100% de suas amostras não falharam efetivamente ao longo do ensaio de imersão;
- A forma de onda da corrente de fuga oferece indicativos do caminho que a mesma percorre internamente ao para-raios. No caso das amostras em que a umidade permaneceu apenas na interface entre a parte ativa e o invólucro verifica-se uma forma de onda praticamente senoidal. Enquanto que nas amostras em que a umidade atingiu os blocos de varistores, a alta não linearidade do óxido de zinco distorce a forma de onda da corrente de fuga;
- Levando-se em consideração apenas a quantidade de para-raios que falharam no ensaio, podemos qualificá-los organizando-os da seguinte forma do melhor desempenho para o pior: $E = C > A > B > D$. No entanto, apenas o percentual de falhas não se apresenta como suficiente para qualificá-los. É necessário ainda analisar o desempenho das amostras que não falharam ao longo do ensaio. Assim a classificação dos fabricantes é reorganizada da seguinte forma do melhor desempenho para o pior: $E > C > A > B > D$;
- A análise dos resultados da tensão residual mostrou-se insuficiente para avaliar a degradação dos para-raios submetidos à imersão. Os valores medidos apresentam uma pequena variação ao longo de todo o ensaio que para a maioria das amostras pode ser enquadrada dentro dos 5% aceitáveis de erro de medição;

- A metodologia de ensaio do STRI Guide é eficiente para se qualificar a hidrofobicidade dos compostos de borracha de silicone dos diferentes fabricantes de para-raios estudados, é fácil de realizar e permite encontrar diferenças significativas de comportamento nestes materiais;
- A metodologia de avaliação da hidrofobicidade de compostos de borracha de silicone realizados após o ensaio de imersão/envelhecimento (Hp e Hr) mostrou-se eficiente para qualificar a hidrofobicidade destes materiais em diferentes situações de estresse. No entanto, a quantificação da perda ou recuperação da hidrofobicidade dos para-raios mostrou-se como algo subjetivo, pois fica sob o critério de classificação de quem está realizando o teste, baseado em sua experiência e comparação visual com as imagens do Guia;
- Através da análise da hidrofobicidade, verificou-se que a capacidade de recuperação da hidrofobicidade perdida, varia significativamente de fabricante para fabricante;
- Observou-se que os fabricantes com os melhores desempenhos durante a medição da corrente de fuga são aqueles que também apresentaram os melhores desempenhos durante o teste de hidrofobicidade: $E > C > A > B > D$;

Capítulo 7. Referências

Bibliográficas

[1] Kannus, K.; Lahti, K.; Nousiainen, K.; “Effects of Impulse Current Stresses on the Durability and Protection Performance of Metal Oxide Surge Arresters”, High Voltage Engineering Engineering Symposium, Conference Publications Nº. 467, Agosto 1999.

[2] Sakshaug, E.C.; Burke, J.J.; Kresge, J.S.; “Metal Oxide Arrester on Distribution System - Fundamental Considerations”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, Nº. 4, Outubro 1989.

[3] Lat, M.V.; Kortschinski, J.; “Distribution Arrester Research”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 7, Julho 1981.

[4] Marques de Britto, T.; “Metodologia da manutenção centrada em confiabilidade aplicada a para-raios de alta tensão”, 122 f., Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Maio 2006.

[5] STRI Guide 1 (92/1), “ Hydrophobicity Classification Guide”.

[6] Sakshaug, E.C.; “A Brief History of AC Surge Arresters’, IEEE Power Energy Review, Agosto 1991.

[7] Lahti, K. et al; “Long Term Performance of Polymer Housed Mo-Surge arresters”, CIGRE 2004, A3-110.

[8] Cherney, E. A.; Biglar, B.; Jayaram, S.; “Salt Fog Testing of Polymer Housed Surge Arresters”, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 16, Nº. 2, Abril 2001.

[9] Kumagai, S. et al; “Comparison of Leakage Current and Aging Silicone Rubbers and Porcelain in both Field and Salt-fog Tests”, IEEE, Maio 2006.

[10] Bradwell, A.; “Importance of preventing moisture ingress to polymeric insulators”, IEE PROCEEDINGS, Vol. 131, Nº. 6, Novembro 1984.

[11] Sundararajan, R. et al; “Multistress Accelerated Aging of Polymer Housed Surge Arresters Under Simulated Coastal Florida Conditions”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, Nº. 1, Fevereiro 2006.

[12] Frost, N. E.; Kreneski, M.; “Hydrophobicity Recovery in Silicone Insulators: A Closer Look at Testing”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, USA, 7-10 Abril, 2002.

[13] Guerreiro, R. S. et al. “Physical and Chemical Characterization of Polymer Housed Surge Arresters Tested under Accelerated Weathering”, Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Yokkaichi, Mie, Japan, 7-11 Setembro, 2008.

[14] Perrot, F.; Mackinlay, R.; “Comparative Accelerated Ageing Test to Assess the Sealing Performance of Composite Surge Arresters and Insulators”, High Voltage Engineering Symposium, 22-27 Agosto, 1999.

[15] Lahti, K.; “Effects of Internal Moisture on the Durability and Electrical Behaviour of Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters”, 162 f., Tese de doutorado, Universidade de Tecnologia de Tampere, 2003.

[16] Lahti, K. et al; “Seal Integrity Tests on Metal Oxide Surge Arresters with Polymeric Housing”.

[17] Bennett, J. A.; Mackevich, J. P.; Mosse, R. J.; “Innovations in Polymer Arrester Moisture Sealing Testing”.

[18] Kannus, K.; Lahti, K.; Nousiainen, K.; “Aspects of the Performance of Metal Oxide Surge Arrester in Different Environmental Conditions”, CIRED, Conference Publication N^o. 438, 2-5 Junho, 1997.

[19] Lahti, K.; “Performance of MV Arresters under Tropical Conditions”, Tampere University of Technology, Finland.

[20] IEC Standard 60099-4 (2006)[1], “Metal- Oxide Surge Arresters without Gaps for AC Systems”.

[21] Lahti, K. et al; “Water Immersion Tests on Metal Oxide Surge Arresters”, Nordic Insulation Symposium, Bergen, 10-12 Junho, 1996.

[22] Wanderley Neto, E. T. et al; “Monitoração e Diagnóstico de Para-raios a ZnO”.

[23] José de Oliveira, M.; “Avaliação do Efeito Geográfico-Termal na Capacidade de Absorção de Energia em Para-raios de ZnO”, Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dezembro 2004.

[24] Woodworth, J.; “History of Arrester on Power Systems 1750 – 1890”, ArresterWorks, 2011.

[25] Woodworth, J.; “History of Arrester on Power Systems 1890 – 1930”, ArresterWorks, 2011.

[26] Zinc-Oxide Arrester Design and Characteristics, Hubberll Power Systems, 2004.

[27] Isoladores de Suspensão e Descarregadores de Chifre, catálogo.

[28] Woodworth, J.; “History of Arrester on Power Systems 1965 – Present”, ArresterWorks, 2011.

[29] Steinfeld, K.; “Design of Metal-Oxide Surge Arresters with Polymeric Housings”, Berlin, Germany.

[30] Schei, A; Weck, K.H., “Metal Oxide Surge Arresters in AC systems – Part 1: General Properties of Metal Oxide Surge Arrester”, Working Group 06, Committee 33.

[31] Sundhar, S. et al; “Polymer Insulating Materials and Insulators for High Voltage Outdoor Applications”, Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, USA, 7-10 Junho 1992.

[32] Mobedjina, M.; Johnnerfelt, B.; Stenström, L.; “Design and Testing of Polymer-Housed Surge Arresters”, CIGRÉ 9th Symposium, Abu Dhabi, Outubro, 1998.

[33] Gorur, R. S.; Cherney, E. A.; Burnham, J. T.; “Outdoor Insulators”, Phoenix, Arizona, USA, 1999.

[34] “Basic Compounding and Processing of Rubber”, edited by Harry Long, 1997.

[35] Kim, J.; Chaudhury, M.K.; Owen, M.J.; “Hydrophobicity Loss and Recovery of Silicone HV Insulation”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.6, Nº. 5, Outubro, 1999.

[36] Sarantópoulos, C.I. G. L et al; “Embalagens Plásticas Flexíveis – Principais Polímeros e Avaliação de Propriedades”, Campinas, CETEA/ITAL, 2002.

ANEXO A – Para-raios Utilizados no Ensaio de Imersão/Envelhecimento

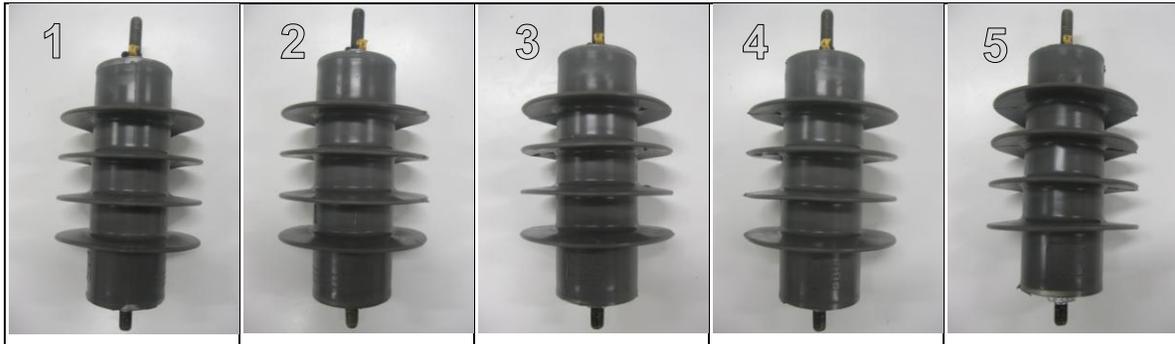


Figura A.1 - Fabricante A.

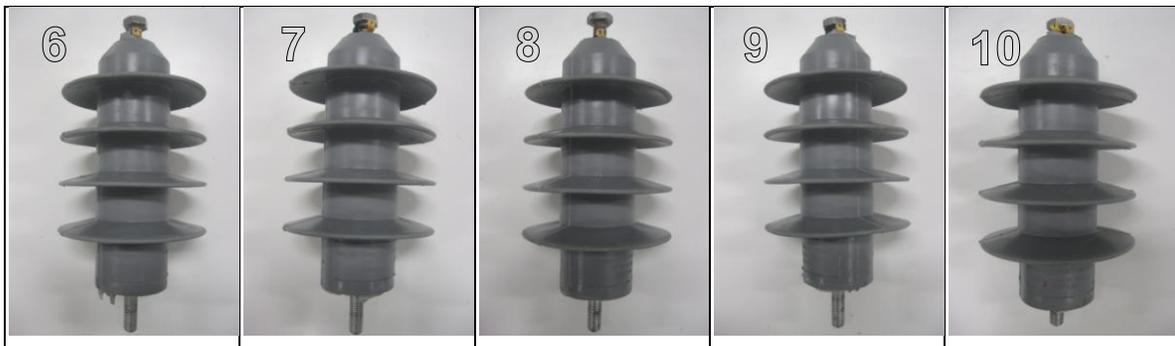


Figura A.2 - Fabricante B.

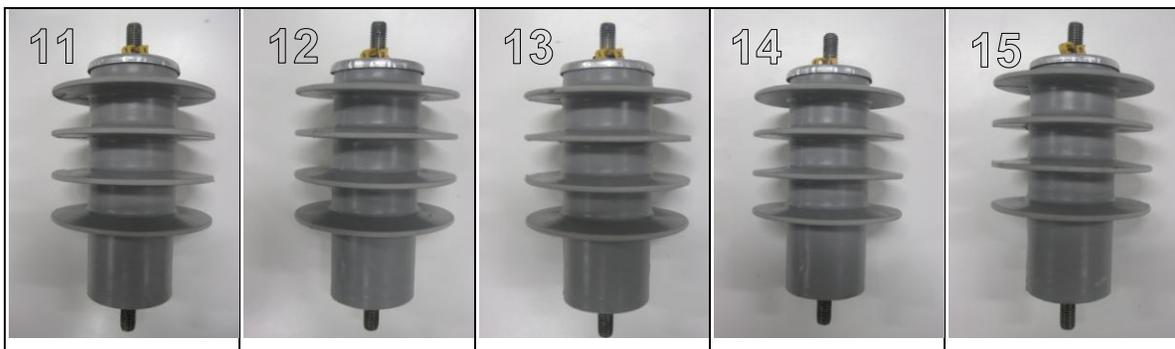


Figura A.3 - Fabricante C.



Figura A.4 - Fabricante D.



Figura A.5 - Fabricante E.



Figura A.6 - Amostras usadas - Fabricantes A, B e C.

ANEXO B – Detalhes Construtivos



Figura B.1 - Amostra 2 - Fabricante A.



Figura B.2 - Amostra 8 - Fabricante B.



Figura B.3 - Amostra 13 - Fabricante C.



Figura B.4 - Amostra 18 - Fabricante D.

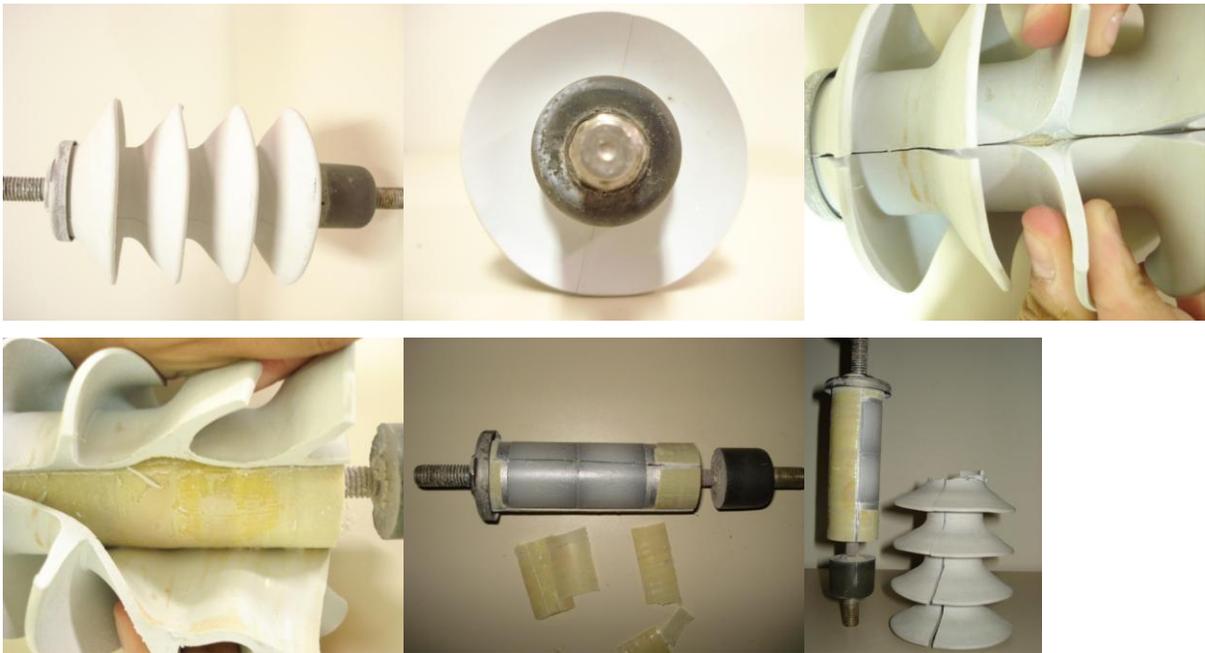


Figura B.5 - Amostra 23 - Fabricante E.