

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE
ISOLAMENTOS POLIMÉRICOS**

Proponente:

André Dantas Germano

Campina Grande, maio de 2010.

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE
ISOLAMENTOS POLIMÉRICOS**

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, maio de 2010.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G373a Germano, André Dantas
Análise da degradação de isolamentos poliméricos / André Dantas Germano. — Campina Grande, 2010.
69 f : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.
Referências.
Orientador: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa.

1. Isolamentos Poliméricos 2. Diagnóstico 3. Degradação 4. Envelhecimento Artificial I. Título.

CDU 621.315.62(043)

UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I	
2 2705	18-10-010

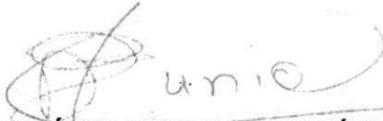
ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE ISOLAMENTOS POLIMÉRICOS

ANDRÉ DAN TAS GERMANO

Dissertação Aprovada em 21.06.2010



EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador



DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Componente da Banca



WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB

RESUMO

Os isolamentos elétricos desempenham um papel essencial nos sistemas de transporte de energia elétrica, influenciando diretamente na sua eficiência e confiabilidade. Historicamente, os isolamentos elétricos tradicionalmente utilizados têm sido os modelos cerâmicos, cujo material isolante consiste de vidro ou porcelana. No entanto, nas últimas décadas, uma nova classe de isolamentos, constituída de compostos orgânicos vem sendo amplamente empregada: os isolamentos poliméricos. Por serem relativamente novos, o comportamento dos isolamentos poliméricos ainda não é de todo conhecido, de modo que esses equipamentos demandam técnicas de monitoramento mais eficazes e estudos aprofundados dos seus mecanismos de falha. Visando a uma compreensão mais abrangente dos fatores responsáveis pela degradação dos isolamentos poliméricos, ensaios de envelhecimento acelerado foram realizados em diversos modelos de isoladores, espaçadores e laços plásticos de amarração de linhas de distribuição de energia. Através desses ensaios, foi possível determinar a contribuição de fatores como radiação ultravioleta, deposição de água, altas temperaturas e tensão elétrica na degradação dos equipamentos. O envelhecimento artificial das amostras, em laboratório, permite que esses fatores possam ser analisados tanto de maneira associada quanto exclusivamente, o que raramente pode ser obtido através do envelhecimento em campo. Cinco técnicas de diagnóstico foram utilizadas para avaliação da integridade das amostras, a saber: corrente de fuga, descargas parciais, tensão suportável em 60 Hz e tensão de descarga disruptiva, a seco e sob névoa salina. Os ensaios de corrente de fuga e de descargas parciais evidenciaram maior degradação das amostras submetidas ao envelhecimento por tensão elétrica e névoa salina. Já os ensaios de tensão de descarga disruptiva, a seco e sob névoa, evidenciam menor suportabilidade de tensão das amostras envelhecidas através da exposição à radiação ultravioleta.

Palavras-chave: isolamentos poliméricos, diagnóstico, degradação, envelhecimento artificial.

ABSTRACT

Electrical insulators perform an essential role in the electrical energy transportation systems, directly influencing their efficiency and reliability. Historically, the traditional electrical insulators in use have been the ceramic models, composed of glass or porcelain. Nevertheless, in the last few decades, a new class of insulating materials, made of organic compounds, has been widely applied: the polymeric insulators. Because they are relatively novel, the behavior of polymeric insulators is not fully known, and these equipments require more efficient monitoring techniques, and deeper studies of their failure mechanisms. Aiming a wider comprehension of the factors responsible for the degradation of polymeric insulators, accelerated aging tests were performed in several models of insulators, spacers and other accessories. These tests allowed the determination of the contribution of factors such as ultraviolet radiation, water deposition, high temperatures and electrical voltage in the degradation of the equipments. The artificial aging of the samples, in laboratory, allows the analysis of these factors exclusively, which can rarely be obtained in field conditions. Five diagnostic techniques were used to evaluate the integrity of the samples: leakage current measurement, partial discharges, withstand voltage and flashover voltage, both in dry conditions and under salt fog. Leakage current and partial discharge measurements evidence a greater degradation of the samples exposed to electrical voltage and salt fog, while the flashover voltage tests indicate an inferior supportability of the samples aged through ultraviolet radiation exposure.

Keywords: polymeric insulation, diagnosis, degradation, artificial aging.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS	XIV
CAPÍTULO 1 – Introdução	01
CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica	03
CAPÍTULO 3 - Material e Métodos	11
3.1. MATERIAL	11
3.2. MÉTODOS	13
3.2.1. ENSAIOS ELÉTRICOS DE DIAGNÓSTICO	14
3.2.1.1. <i>Corrente de Fuga</i>	14
3.2.1.2. <i>Descargas Parciais</i>	15
3.2.1.3. <i>Tensão Suportável em 60 Hz</i>	16
3.2.1.4. <i>Tensão de Descarga Disruptiva</i>	16
3.2.1.5. <i>Tensão de Descarga Disruptiva Sob Névoa Salina</i>	17
3.2.2. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO	18
3.2.2.1. <i>Envelhecimento por Tensão Elétrica</i>	18
3.2.2.2. <i>Envelhecimento por Tensão Elétrica e Névoa Salina</i>	19
CAPÍTULO 4 - Resultados e Análises	20
4.1. AMOSTRAS NOVAS	20

4.1.1. CORRENTE DE FUGA	20
4.1.2. DESCARGAS PARCIAIS	21
4.1.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ	25
4.1.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA	25
4.1.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA	26
4.2. AMOSTRAS ENVELHECIDAS EM <i>WEATHER-OMETER</i>	27
4.2.1. CORRENTE DE FUGA	27
4.2.2. DESCARGAS PARCIAIS	27
4.2.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ	28
4.2.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA	29
4.2.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA	29
4.3. AMOSTRAS ENVELHECIDAS POR IMERSÃO EM ÁGUA	31
4.3.1. CORRENTE DE FUGA	31
4.3.2. DESCARGAS PARCIAIS	31
4.3.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ	32
4.3.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA	33
4.3.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA	33
4.4. AMOSTRAS ENVELHECIDAS EM FORNO A 120°C	35
4.4.1. CORRENTE DE FUGA	35
4.4.2. DESCARGAS PARCIAIS	36
4.4.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ	36
4.4.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA	37
4.4.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA	37

4.5. AMOSTRAS ENVELHECIDAS POR TENSÃO ELÉTRICA	38
4.5.1. CORRENTE DE FUGA	38
4.5.2. DESCARGAS PARCIAIS	38
4.5.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ	39
4.5.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA	40
4.5.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA	41
4.6. AMOSTRAS ENVELHECIDAS POR TENSÃO ELÉTRICA E NÉVOA SALINA	42
4.6.1. CORRENTE DE FUGA	42
4.6.2. DESCARGAS PARCIAIS	43
4.6.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ	43
4.6.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA	44
4.6.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA	45
CAPÍTULO 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros	46
5.1. CONCLUSÕES	46
5.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	49
5.3. TRABALHOS PUBLICADOS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXO A - Sinais de Descargas Parciais das Amostras Novas	58
ANEXO B - Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas em <i>Weather-Ometer</i>	62
ANEXO C - Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas por Imersão em Água	63

ANEXO D - Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas em Forno a 120°C	65
ANEXO E - Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas por Tensão Elétrica	66
ANEXO F - Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas por Tensão Elétrica e Névoa Salina	68

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1. Constituição de um isolador polimérico.	05
Fig. 3.1 Isolamentos poliméricos analisados nos ensaios.	12
Fig. 3.2. Fotografia do kit didático de alta tensão.	13
Fig. 3.3. Fotografia do salão de Alta Tensão, destacando o transformador utilizado nos ensaios.	13
Fig. 3.4. Fotografia externa da câmara de névoa salina.	14
Fig. 3.5. Diagrama esquemático da montagem para medição da corrente de fuga.	15
Fig. 3.6. Circuito de medição de descargas parciais.	15
Fig. 3.7. Diagrama esquemático da montagem para medição da tensão suportável em 60 Hz.	16
Fig. 3.8. Diagrama esquemático da montagem para medição da tensão de descarga disruptiva.	17
Fig. 3.9. Diagrama esquemático da montagem para medição da tensão de descarga disruptiva sob névoa salina.	17
Fig. 4.1. Sinais de tensão aplicada e corrente de fuga em uma das amostras dos isoladores de suspensão novos.	21
Fig. 4.2. Fotografias evidenciando as imperfeições construtivas nos isoladores de pino novos.	22
Fig. 4.3. Fotografia das imperfeições dos espaçadores novos.	23
Fig. 4.4. Simulação de campo elétrico num espaçador polimérico ideal.	24
Fig. 4.5. Fotografia da amostra Laço Plástico Lateral WO após ruptura sob névoa.	30

Fig. A.1. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de isoladores de suspensão.	58
Fig. A.2. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de isoladores de pino.	59
Fig. A.3. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de espaçadores.	59
Fig. A.4. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de laços plásticos laterais.	60
Fig. A.5. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de laços plásticos de topo.	61
Fig. B.1. Sinais de descargas parciais nas amostras WO.	62
Fig. C.1. Sinais de descargas parciais nas amostras H de isoladores de suspensão.	63
Fig. C.2. Sinais de descargas parciais nas amostras H de isoladores de pino.	63
Fig. C.3. Sinais de descargas parciais nas amostras H de espaçadores.	63
Fig. C.4. Sinais de descargas parciais nas amostras H de laços plásticos laterais.	64
Fig. C.5. Sinais de descargas parciais nas amostras H de laços plásticos de topo.	64
Fig. D.1. Sinais de descargas parciais nas amostras T de isoladores de suspensão.	65
Fig. D.2. Sinal de descargas parciais na amostras T de isolador de pino.	65
Fig. D.3. Sinal de descargas parciais na amostras T de espaçador.	65
Fig. E.1. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de isoladores de suspensão.	66
Fig. E.2. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de isoladores de pino.	66
Fig. E.3. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de espaçadores.	67
Fig. E.4. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de laços plásticos laterais.	67
Fig. E.5. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de laços plásticos de topo.	67
Fig. F.1. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de isoladores de suspensão.	68
Fig. F.2. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de isoladores de pino.	68
Fig. F.3. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de espaçadores.	69
Fig. F.4. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de laços plásticos laterais.	69

Fig. F.5. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de laços plásticos de topo.

69

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Resultados da medição de corrente de fuga nos isolamentos poliméricos novos.	20
Tabela 4.2. Valores médios e máximos das descargas nos isoladores de suspensão novos.	21
Tabela 4.3. Valores médios e máximos das descargas nos isoladores de pino novos.	21
Tabela 4.4. Valores médios e máximos das descargas nos espaçadores novos.	22
Tabela 4.5. Valores médios e máximos das descargas nos laços plásticos laterais novos.	24
Tabela 4.6. Valores médios e máximos das descargas nos laços plásticos de topo novos.	24
Tabela 4.7. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras novas.	25
Tabela 4.8. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras t_0 .	25
Tabela 4.9. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa com as amostras t_0 .	26
Tabela 4.10. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras WO.	27
Tabela 4.11. Valores médios e máximos das descargas nas amostras WO.	28
Tabela 4.12. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras WO.	28
Tabela 4.13. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras WO.	29
Tabela 4.14. Valores de tensão de descarga disruptiva sob névoa das amostras WO.	30

Tabela 4.15. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras H.	31
Tabela 4.16. Valores médios e máximos das descargas nas amostras H.	32
Tabela 4.17. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras H.	32
Tabela 4.18. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras H.	33
Tabela 4.19. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa com as amostras H.	33
Tabela 4.20. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras T.	35
Tabela 4.21. Valores médios e máximos das descargas nas amostras T.	36
Tabela 4.22. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras T.	36
Tabela 4.23. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras T.	37
Tabela 4.24. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa com as amostras T.	37
Tabela 4.25. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras TE.	38
Tabela 4.26. Valores médios e máximos das descargas nas amostras TE.	39
Tabela 4.27. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras TE.	39
Tabela 4.28. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras TE.	40
Tabela 4.29. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa com as amostras TE.	41
Tabela 4.30. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras TS.	42
Tabela 4.31. Valores médios e máximos das descargas nas amostras TS.	43
Tabela 4.32. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras TS.	44

Tabela 4.33. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras TS.	44
Tabela 4.34. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa com as amostras TS.	45

LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

CF	Corrente de Fuga.
EPDM	Etileno-Propileno-Dieno.
H	Amostras envelhecidas através de processo de imersão em água.
PEAD	Polietileno de Alta Densidade.
T	Amostras envelhecidas em estufa, por altas temperaturas.
t_o	Amostras novas, recém retiradas do almoxarifado.
TDD	Tensão de descarga disruptiva a seco.
TDS	Tensão de descarga disruptiva sob névoa salina.
TE	Amostras envelhecidas por tensão elétrica exclusivamente.
TS	Amostras envelhecidas por tensão elétrica e névoa salina.
WO	Amostras envelhecidas em <i>weather-ometer</i> , por radiação ultravioleta.

CAPÍTULO 1

Introdução

Os sistemas de isolamento, presentes na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica devem, idealmente, impedir a circulação de corrente entre áreas vizinhas submetidas a diferentes potenciais. Quando falham, os isolamentos elétricos podem provocar interrupções no fornecimento de energia elétrica. Com as modificações recentes na política das agências reguladoras, a ocorrência de desligamentos acidentais implica no pagamento de multas onerosas por parte das concessionárias. Portanto, para garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica, as baixas perdas e um perfeito funcionamento do sistema elétrico, faz-se necessário o monitoramento dos sistemas de isolamento quanto a possíveis falhas, uma vez que suas funcionalidades são imprescindíveis no isolamento e proteção das redes de energia elétrica.

Tradicionalmente, os isolamentos elétricos são constituídos de materiais cerâmicos (vidro ou porcelana). Todavia, há uma demanda crescente pelo uso de isolamentos poliméricos em linhas de transmissão, sub-transmissão e distribuição de energia elétrica. Apesar de estes materiais terem seu uso difundido desde 1980, ainda persistem dúvidas quanto a sua vida útil e seus modos de falha mais frequentes. Os polímeros são produzidos a partir de compostos orgânicos e, portanto, podem ter sua degradação acelerada por diversos agentes. Assim, é preciso conhecer o processo de seleção dos materiais, fabricação, e aplicação, assim como acompanhá-los em campo, visando ao aumento da vida útil e à antecipação de possíveis falhas. Faz-se necessário, ainda, o estudo das causas da degradação, com propostas de soluções alternativas e o levantamento de requisitos para otimização do desempenho dos produtos, intervindo, quando possível, no processo de fabricação.

Os testes elétricos de diagnóstico da degradação de polímeros (ex.: medição de corrente de fuga, descargas parciais e tensão suportável) se sobressaem frente aos ensaios físico-químicos, por exemplo, por preservarem, em sua maioria, a integridade das amostras testadas, permitindo que as mesmas possam ser devolvidas ao sistema elétrico sem alteração das suas propriedades físicas, elétricas e químicas.

O diagnóstico antecipado, em campo, da degradação de equipamentos elétricos com revestimento polimérico ainda apresenta bastantes dificuldades operacionais. Em laboratório, todavia, através de ambientes com características climáticas e eletromagnéticas controladas, o

acompanhamento do estado de conservação destes equipamentos já pode ser realizado. Na maioria das vezes é possível estressar equipamentos poliméricos de maneira a provocar uma degradação controlada, a fim de simular o comportamento observado em campo.

Os ensaios artificiais de envelhecimento são importantes na medida em que permitem que apenas um, ou mesmo um número predeterminado de fatores degradantes incidam sobre a amostra. Assim, pode-se investigar como um determinado fenômeno que atinge equipamentos poliméricos manifesta-se de maneira isolada, o que raramente pode ser concluído através da análise de equipamentos envelhecidos em campo.

A motivação deste trabalho vem da grande variedade de agentes degradantes aos quais os isolamentos estão sujeitos. Os materiais que constituem os isolamentos devem, portanto, apresentar uma substancial robustez a estes fatores. Propõe-se investigar os efeitos da degradação de isolamentos poliméricos através da realização de ensaios laboratoriais de envelhecimento acelerado. A avaliação dos níveis de degradação dos isolamentos será realizada em três etapas: realização de ensaios de controle com amostras novas (ensaio de referência); aplicação dos diversos estresses, através dos ensaios de degradação; e, finalmente, realização de novos ensaios de controle, agora com as amostras envelhecidas.

Assim, este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento de isolamentos poliméricos novos e envelhecidos, através do monitoramento de suas grandezas elétricas, visando a registrar quais são mais afetadas pelos envelhecimentos. As cinco grandezas elétricas a serem avaliadas são: corrente de fuga, descargas parciais, tensão suportável em 60 Hz e tensões de descarga disruptiva, a seco e sob névoa. O resultado prático da pesquisa será a formação de um grande banco de dados que poderá ser utilizado no desenvolvimento de softwares de auxílio à tomada de decisão. Com base nestas informações, procurar-se-á definir parâmetros que facilitem o processo de especificação de equipamentos por parte das concessionárias, além de sugerir modificações no processo de fabricação que venham a melhorar o desempenho dos produtos.

Para alcançar os objetivos supracitados, a dissertação será dividida em cinco capítulos. No Capítulo 2 realiza-se uma breve revisão bibliográfica acerca dos temas abordados no trabalho. Os materiais e métodos utilizados no decorrer da pesquisa são apresentados no Capítulo 3. No Capítulo 4 são expostos os resultados mais significativos, e o Capítulo 5 finaliza a dissertação com a apresentação das principais conclusões e a proposição de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

Desde que a eletricidade pôde ser gerada em quantidades significativas (por volta de 1880), os isoladores têm sido usados no isolamento dos sistemas de energia elétrica. Os isoladores da época eram de porcelana, e as configurações usadas se assemelhavam bastante aos modelos utilizados nas redes telegráficas. Apenas 30 anos depois uma configuração próxima da adotada atualmente foi desenvolvida (VOSLOO et al., 2006). Posteriormente, no final da década de 1960, surgem os primeiros isoladores poliméricos, como alternativa aos isolamentos cerâmicos tradicionais (compostos de porcelana ou vidro).

Os isoladores possuem duas funções principais: prover isolamento elétrico e suporte mecânico às estruturas. Isso faz deles um dos componentes mais críticos do sistema. Portanto, o comportamento elétrico e mecânico dos isolamentos afeta diretamente o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de energia elétrica.

O perfeito funcionamento dos isolamentos externos depende de muitos fatores, dentre os quais um dos mais importantes é a condição do ambiente em que o equipamento operará. Segundo GORUR et al. (1999), deve-se levar em conta no momento da instalação dos equipamentos fatores como temperatura, chuva, névoa, ventos, altitude, radiação solar, proximidade de áreas costeiras e fontes de poluição (ex.: indústrias), índices pluviométricos, níveis cerâmicos, vandalismo e queimadas. Até mesmo a possibilidade de deposição de excremento de pássaros precisa ser considerada (BURNHAM, 1995).

A presença de camadas condutivas ou parcialmente condutivas (i.e. poluição) afeta profundamente o desempenho dos isoladores (REYNDERS, 1992). Outra grande causa de falhas nos isoladores de vidro está associada ao vandalismo. Os isoladores poliméricos surgiram visando à minimização desses problemas, uma vez que eles são menos susceptíveis que os isoladores cerâmicos tanto à poluição quanto ao vandalismo (RAVERA, 1992; EPRI, 1998).

Apesar do grande número de vantagens citado anteriormente, a utilização dos isolamentos poliméricos apresenta contrapontos, como a introdução de novos mecanismos de falha, como erosão do isolamento e trilhamento interno, até então desconhecidos entre os isoladores tradicionais. No caso de isoladores poliméricos a localização de defeitos é dificultada:

uma vez que eles não estilhaçam, os defeitos normalmente são pequenos e de difícil visualização, até mesmo com equipamentos como binóculos (BISNATH et al., 2006).

O revestimento polimérico dos equipamentos elétricos é composto tradicionalmente de EPDM ou silicone, e dotado de aletas para aumentar a distância de escoamento. O silicone, em particular, é caracterizado pela capacidade de repelir água (hidrofobicidade). Essa propriedade faz com que a água, em contato com a superfície, concentre-se em gotas, impedindo que a mesma forme uma lâmina, minimizando assim as correntes de fuga. No entanto, sob estresses de altas tensões, as gotas podem ser unidas por arcos elétricos locais. Esse curto-circuito parcial de regiões secas do isolador, denominadas bandas secas, pode evoluir para descargas completas, ou *flashovers* (KINDERSBERGER et al., 1989).

A poluição, associada à umidade, pode influenciar na distribuição de campo elétrico e intensificar fenômenos como correntes de fuga, bandas secas e *flashovers*, que em longo prazo podem provocar carbonização do isolamento e afetar a integridade do material (BISNATH et al., 2005). Correntes de fuga e outras atividades elétricas, como corona, normalmente não afetam os isolamentos cerâmicos. O mesmo não pode ser dito a respeito dos isolamentos poliméricos, nos quais vários mecanismos de falhas elétricas e mecânicas são atribuídos à atividade elétrica. Dois desses mecanismos são relevantes: a carbonização, devido a arcos locais, e a produção de ácidos que degradam o núcleo, podendo resultar em falhas mecânicas (McQUARRIE, 1999). Teorias quanto à origem desses ácidos são apresentadas em SCHMUCK et al. (2001), TOURREIL et al. (2001) e CIGRÉ (1992).

Os equipamentos poliméricos a serem utilizados neste trabalho são isoladores de suspensão e de pino, espaçadores, e laços plásticos de amarração (modelos laterais e de topo). Entre esses, os isoladores são os mais utilizados, uma vez que espaçadores e laços plásticos são acessórios bastante recentes, e possuem pouca bibliografia especializada. Logo, um maior enfoque será dado aos isoladores, que serão descritos a seguir. No entanto, é importante ressaltar que os demais equipamentos possuem características análogas, sendo compostos dos mesmos materiais utilizados no revestimento de isoladores.

A constituição de um isolador polimérico é apresentada na Figura 2.1, e apresenta três componentes básicos: núcleo, composto de uma haste de fibra de vidro reforçada; revestimento polimérico, e ferragens terminais, que fazem a ligação entre condutor, isolador e estrutura. Nos isoladores poliméricos, as regiões mais frágeis são as áreas de interface entre materiais. Interfaces críticas podem ser detectadas entre polímero e ferragens terminais, assim como entre

polímero e núcleo. A exposição do núcleo a umidade e ácidos pode levar a falhas como fratura exposta, fraturas frágeis, destruição das ferragens terminais, etc. (ENGELBRECHT et al., 1997; EPRI, 1998).

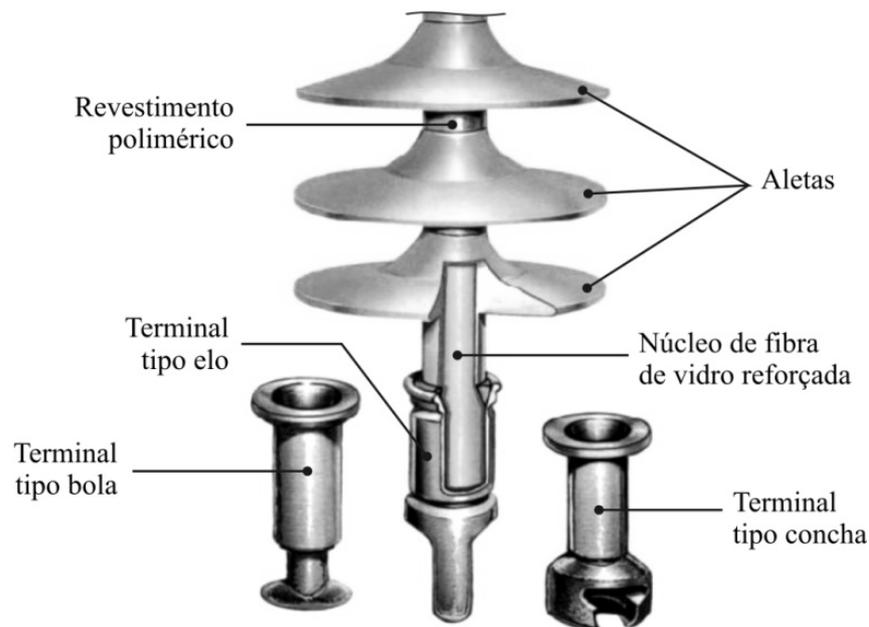


Figura 2.1. Constituição de um isolador polimérico (RODURFLEX, 2005).

Muitas técnicas têm sido usadas para detecção de isolamentos poliméricos defeituosos em serviço, como inspeção visual, medição de campo elétrico, detecção de corona, termografia infravermelha, avaliação de hidrofobicidade e detecção de ruído acústico (IEC 60815, 1986; BOLOGNA et al., 2002). Contudo, a utilização dessas técnicas apresenta dificuldades operacionais, e ainda não existe um consenso quanto à viabilidade e a eficácia das mesmas.

Dentre as técnicas conhecidas, a corrente de fuga é amplamente reconhecida como um dos principais parâmetros para avaliação do desempenho de equipamentos (HOULGATE, 1993). Através dela obtêm-se informações importantes acerca do estado de operação de um isolamento. Uma elevada corrente de fuga pode indicar presença de poluição, perda da capacidade isolante do material polimérico, carbonização, etc. Um isolador em boas condições geralmente apresenta corrente de fuga da ordem de alguns microampères, quando exposto a sua tensão nominal de operação.

A bibliografia relacionada à medição de corrente de fuga em isolamentos elétricos é vasta. AMIN et al. (2009) descrevem a importância da corrente de fuga em isoladores e equipamentos elétricos em geral, além de diversos métodos de monitoramento. Na maioria dos artigos analisados, as medições são realizadas em uma câmara de névoa, para maximizar as

correntes de fuga (LIANG et al. 1992; MATSUOKA et al., 1999; RICHARDS et al., 1999; McGRATH et al., 2003 e EL-HAG, 2007a). Nesse ensaio torna-se difícil detectar o estado de degradação do equipamento, uma vez que a maior parcela da corrente de fuga medida se deve à névoa salina depositada na superfície da amostra. Além disso, esses ensaios são realizados de forma contínua, sem ciclos secos, não havendo tempo para que as amostras recuperem sua hidrofobicidade original. Conseqüentemente, a corrente de fuga medida apresenta picos muito maiores que os obtidos em condições de campo, não condizendo com a realidade a que as amostras são submetidas.

TIAN et al. (1998), CHO et al. (2002), McGRATH et al. (2002) e EL-HAG (2007b) realizaram ensaios de degradação com aplicação de estresses múltiplos para avaliar variações nas características de isoladores, utilizando a medição de corrente de fuga como técnica de diagnóstico. Contudo, nota-se uma carência de estudos que envolvam a realização de ensaios de degradação por estresses individuais, para avaliar a contribuição de cada um desses exclusivamente.

Algumas técnicas têm sido amplamente utilizadas para pesquisa e controle de qualidade de isolamentos em laboratório, como inspeção visual, detecção de descargas parciais, medição diferencial de temperatura, detecção de descargas elétricas através de radiação ultravioleta, radiologia, medição do perfil de campo elétrico, medição da resposta em frequência ou vibracional, medição e detecção de emissões acústicas, ultra-som, dissecação e análise de amostras, entre outras (EPRI, 2003).

A detecção de descargas parciais para diagnóstico de isoladores envelhecidos em laboratório mostra-se promissora, por detectar mais facilmente alterações internas aos isolamentos. MANGIAVACHI et al. (1983), CONTIN et al. (1987), HOMMA et al. (1994) e CONTIN et al. (1996) aplicaram a técnica para diagnóstico de isolamentos envelhecidos naturalmente ou através de ensaios artificiais multi-estresse. TIAN et al. (1998) mostraram que apesar da amplitude e distribuição dos pulsos de descargas parciais variarem aleatoriamente ao longo do envelhecimento, a carga acumulada apresenta uma variação bastante linear com o tempo, refletindo mais precisamente o estado de conservação das amostras.

A isolação sólida de qualquer equipamento submetido a tensões elevadas está sujeita à ocorrência das descargas parciais. Segundo o IEEE (2000), descargas parciais são descargas elétricas localizadas que ocorrem quando a intensidade do campo elétrico local excede a rigidez dielétrica do isolamento envolvido, provocando curto-circuito parcial do mesmo. Quando

descargas parciais ocorrem em uma cavidade de um isolador polimérico, as superfícies internas da cavidade atingidas pelas descargas são carbonizadas, e assim, passam a ser condutoras, podendo distorcer e concentrar cada vez mais o campo elétrico na região, o que proporciona o crescimento da cavidade. Em isolamentos a base de compostos orgânicos, como os polímeros, o efeito das descargas parciais pode ser extremamente danoso, podendo levar inclusive à sua perfuração total. Como a formação de descargas parciais é interna ao equipamento, um isolamento polimérico pode operar por um longo período sem que efeitos danosos sejam observados.

Apesar de seu comportamento estocástico e manifestações físicas sutis, a medição de descargas parciais é uma ferramenta poderosa no diagnóstico de isolamentos, pois permite detectar os primeiros sinais de deterioração. Segundo NATTRASS (1988), desde 1940 um volume considerável de dados de descargas parciais tem sido acumulado, permitindo a detecção de imperfeições antes que elas levem a defeitos mais graves. Essas imperfeições consistem de cavidades no isolamento, rachaduras, interfaces com má aderência, bolhas gasosas, etc.

Os três outros ensaios de diagnóstico utilizados ao longo do trabalho (tensão suportável em 60 Hz, tensão de descarga disruptiva a seco e sob névoa salina) foram escolhidos por serem ensaios de rotina, e, portanto, tradicionalmente executados pelas concessionárias no momento de aquisição de novos equipamentos. Por conseguinte, a utilização desses ensaios facilita o processo de especificação de equipamentos, que é uma das propostas da dissertação. Além disso, uma vez que as concessionárias já dispõem da base de dados de equipamentos novos, a realização dos mesmos ensaios com amostras envelhecidas poderia fornecer uma noção quantitativa do estado de conservação dos equipamentos, facilitando o agendamento de manutenções preventivas e preditivas.

A escolha dos ensaios de suportabilidade de tensão ainda é baseada na experiência de JIANG et al. (2007), que estudaram a variação da tensão de descarga disruptiva de isoladores novos de diferentes modelos e composições; NAITO et al. (1994), que utilizaram TDS para determinação do nível de poluição de isoladores novos e SORQVIST et al. (1999), que repetiram os ensaios para diagnóstico de isoladores envelhecidos em campo. Os resultados, no entanto, não são tão triviais: VENKATARAMAN et al. (2006), por exemplo, enfatizam a dificuldade de se prever o *flashover* em isolamentos poliméricos, indicando que o processo de formação da descarga não é de todo conhecido.

O ensaio de tensão suportável em 60 Hz avalia se os equipamentos suportam a tensão senoidal de operação para a qual foram desenvolvidos. Já no ensaio de tensão de descarga disruptiva, determina-se a tensão na frequência industrial necessária para provocar uma disrupção no isolador. O processo de formação da descarga disruptiva em isoladores hidrofílicos é descrito em CIGRÉ (1979). VERMA et al. (1978) mostraram ainda que a probabilidade de disrupção num equipamento está diretamente associada à amplitude da corrente de fuga no mesmo.

O ensaio de tensão de descarga disruptiva em névoa salina difere daquele realizado a seco unicamente pela presença da solução salina aspergida no ambiente, que reduz significativamente a capacidade de isolamento do revestimento polimérico, devido à sua condutividade. Espera-se, no entanto, que as características hidrofóbicas do silicone possam reduzir os efeitos condutivos da névoa.

Outros testes de avaliação de desempenho de isoladores poliméricos são apresentados na norma IEC 62217. Técnicas para determinação da condutividade superficial de equipamentos são apresentadas na norma IEC 60507, e técnicas de estimação de poluição são citadas por BESZTERCEY et al. (1998). O estudo dessas características faz-se necessário na medida em que elas influem diretamente na corrente de fuga e tensões suportáveis.

Técnicas de envelhecimento de polímeros têm sido usadas com sucesso para prever o comportamento de isolamentos poliméricos ao longo do tempo. Essas técnicas se dividem em dois grupos básicos: técnicas multi-estresse, e técnicas que limitam o número de estresses aplicados (AMIN et al., 2006). Ensaio de aplicação de estresses múltiplos são mais amplamente utilizados, uma vez que simulam de forma mais satisfatória as condições às quais os isolamentos estão sujeitos em campo. Muitos artigos foram publicados onde se procura relacionar os envelhecimentos acelerados com os envelhecimentos naturais, como FOURMIGUÉ et al. (1995) e GARCIA et al. (1998).

A aplicação de um número limitado de estresses, sem compromisso com a analogia entre os resultados desses ensaios e as condições reais de campo, também precisa ser estudada. Esses ensaios de estresses únicos são importantes na medida em que permitem detectar de que forma um determinado fator afeta, individualmente, o envelhecimento das amostras ensaiadas. Para tanto, podem ser utilizados os seguintes ensaios de envelhecimento: câmara de intemperismo (*weather-ometer*), aplicação de névoa salina, teste de roda de trilhamento, envelhecimento por

tensão elétrica, *rotating wheel dip test*, envelhecimento térmico, imersão em água, resistência a hidrólise, ozônio ou ácido, etc.

O envelhecimento em câmaras de intemperismo do tipo “*weather-ometer*” foi estudado por XU et al. (1996), entretanto, testes elétricos de diagnóstico foram pouco explorados. As medições realizadas foram de ângulo de contato, análise termogravimétrica, espectroscopia por energia dispersiva e aplicação de tensão impulsiva. Além do experimento em *weather-ometer*, destacam-se o envelhecimento por imersão em água e o envelhecimento térmico, baseados nas publicações de BRADWELL (1984), EHSANI et al. (2004) e HAN et al. (2004). Não obstante, pouca bibliografia é encontrada analisando o efeito dos envelhecimentos citados através de ensaios elétricos.

Outras técnicas poderão ser adicionadas à pesquisa, com ênfase nos efeitos dos estresses elétricos aplicados aos equipamentos (ex.: envelhecimento por tensão elétrica ou por tensão elétrica e névoa salina). A principal motivação desses ensaios vem do fato de que eles permitem uma degradação interna às amostras, devido à ocorrência de descargas parciais, que provocam a carbonização de possíveis bolhas localizadas no interior dos isolamentos. Os outros envelhecimentos analisados até este ponto, por outro lado, provocam uma degradação mais superficial das amostras.

Nos envelhecimentos por aplicação de tensão, os equipamentos são expostos a uma tensão elétrica igual ou superior à sua tensão de operação em campo. A aplicação de alta tensão, e conseqüentes campos elétricos intensos, promove a deterioração acelerada do isolamento, facilitando carbonizações em eventuais cavidades internas e outras regiões de instabilidade elétrica, como por exemplo, pontos de conexão de condutores. Os envelhecimentos por tensão elétrica são baseados nas normas NBR 6936 e NBR 10621.

A depender do equipamento e do fenômeno que se deseja estudar, o envelhecimento pode ser intensificado através de descargas *flashover* ou presença de umidade (câmara de névoa). Cada um dos equipamentos deve ser exposto a tensões elétricas e demais fatores degradantes durante um intervalo de tempo específico, determinado pela norma NBR 10621.

Uma síntese esquemática das técnicas de diagnóstico e de degradação estudados é apresentada no Quadro 1.1.

Quadro 1.1. Quadro sinóptico das técnicas de diagnóstico e de degradação estudadas.

Técnicas		Artigos
Diagnóstico	Corrente de fuga	LIANG et al. (1992); HOULGATE (1993); TIAN et al. (1998); MATSUOKA et al. (1999); RICHARDS et al. (1999); CHO et al. (2002); McGRATH et al. (2002); McGRATH et al. (2003); EL-HAG (2007a); EL-HAG (2007b); AMIN et al. (2009).
	Descargas parciais	MANGIAVACHI et al. (1983); CONTIN et al. (1987); NATTRASS (1988); HOMMA et al. (1994); CONTIN et al. (1996); TIAN et al. (1998).
	Suportabilidade de tensão	VERMA et al. (1978); CIGRÉ (1979); NAITO et al. (1994); SORVQVIST et al. (1999); VENKATARAMAN et al. (2006); JIANG et al. (2007).
Envelhecimento	Envelhecimento multi-estresse	FOURMIGUÉ et al. (1995); GARCIA et al. (1998); MATSUOKA et al. (1999); CHO et al. (2002); McGRATH et al. (2002); EL-HAG (2007b).
	Weather-ometer, imersão em água e envelhecimento térmico	BRADWELL (1984); XU et al. (1996); EHSANI et al. (2004); HAN et al. (2004).
	Aplicação de tensão	LIANG et al. (1992); HOMMA et al. (1994); CONTIN et al. (1996); TIAN et al. (1998); McGRATH et al. (2003); EL-HAG (2007b).

Com o objetivo de avaliar as novas propostas de estudo citadas, ensaios elétricos foram planejados. Os materiais, montagens experimentais e ensaios necessários para realização da pesquisa são descritos no próximo capítulo.

CAPÍTULO 3

Material e Métodos

3.1. MATERIAL

Com o objetivo de avaliar o comportamento de diferentes isolamentos poliméricos, cinco equipamentos elétricos disponíveis comercialmente serão utilizados como amostras nos ensaios. Os equipamentos a serem avaliados são descritos a seguir, e na Figura 3.1 são apresentadas fotos dos mesmos.

1. Isoladores de suspensão poliméricos, classe 15 kV;
 - Isoladores compostos de núcleo de fibra de vidro com resina epóxi, revestidos por silicone livre de EPDM. Altura aproximada de 378 mm, com sistema de aletas alternadas medindo 77 mm e 54 mm.
2. Isoladores de pino poliméricos, classe 15 kV;
 - Isoladores compostos de polietileno de alta densidade (PEAD), com aletas alternadas, medindo cerca de 125 mm por 125 mm, com distância de escoamento de 415 mm.
3. Espaçadores poliméricos em forma de losango, classe 15 kV;
 - Espaçadores para redes compactas de cabos cobertos, composto de PEAD, com anéis de amarração em silicone. Tamanho aproximado de 222 mm por 395 mm; distância de escoamento de 280 mm.
4. Laços plásticos laterais para isoladores de pino;
 - Laços usados para fixação de condutores cobertos em isoladores de pino, composto de material plástico resistente de constituição não especificada pelo fabricante. Altura de 447 mm, diâmetro de 12 mm e largura de 88 mm.
5. Laços plásticos de topo para isoladores de pino.
 - Laços compostos de material plástico resistente não especificado pelo fabricante. Diâmetro de 12 mm, altura e largura de 545 mm e 85 mm, respectivamente.

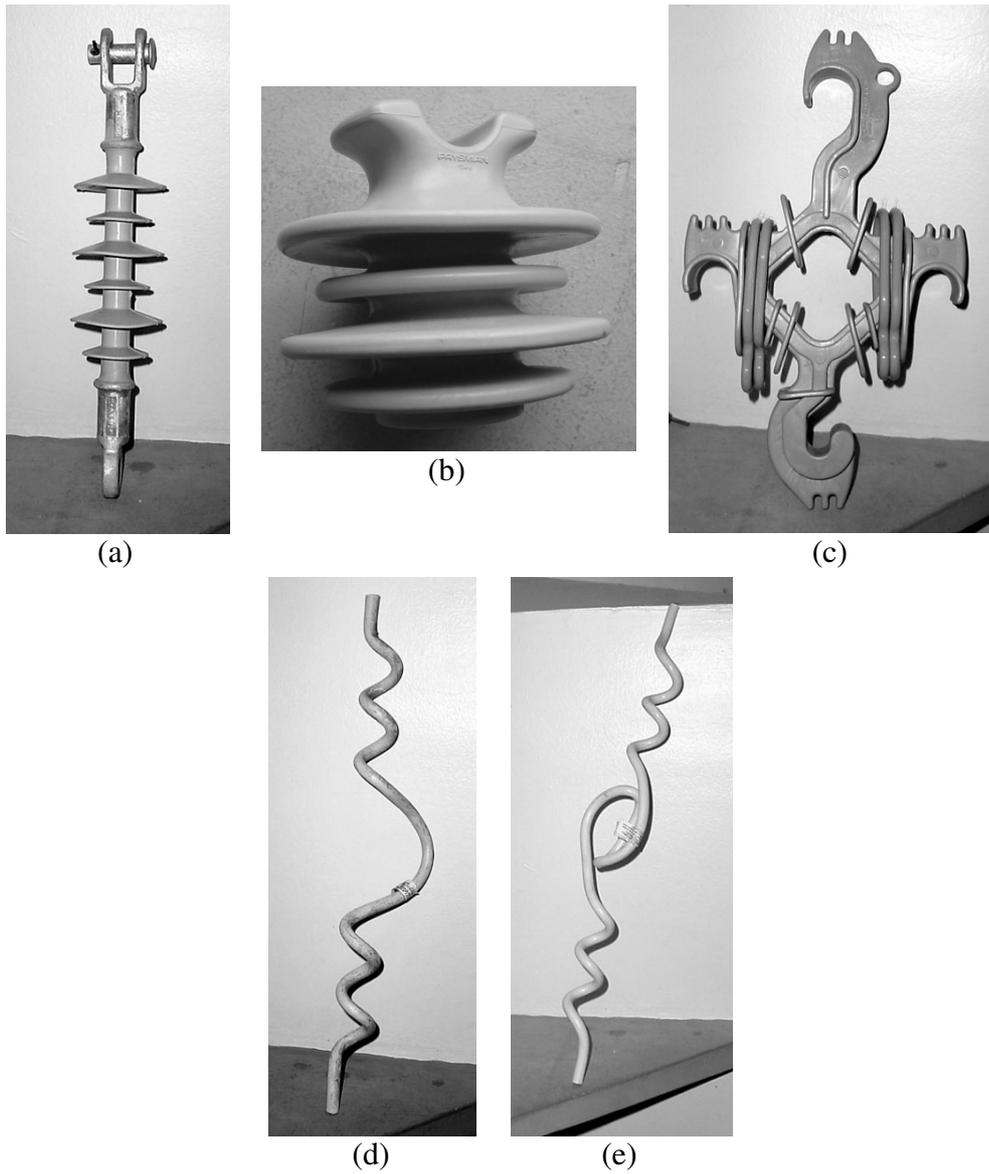


Figura 3.1. Fotografia de: (a) Isolador de suspensão polimérico; (b) Isolador de pino polimérico; (c) Espaçador polimérico; (d) Laço plástico lateral; e (e) Laço plástico de topo.

3.2. MÉTODOS

A avaliação e o envelhecimento dos revestimentos poliméricos das amostras de isoladores de suspensão e de pino, espaçadores e laços plásticos laterais e de topo serão realizados através dos ensaios descritos nesta seção. Os ensaios de controle (diagnóstico) e de degradação serão realizados nos laboratórios de Alta Tensão (LAT) e de Isolamentos Elétricos (LABIS) da UFCG. Os seguintes equipamentos serão utilizados:

1. Kit didático de alta tensão, contendo um transformador de 100 kV / 10 kVA (Figura 3.2);

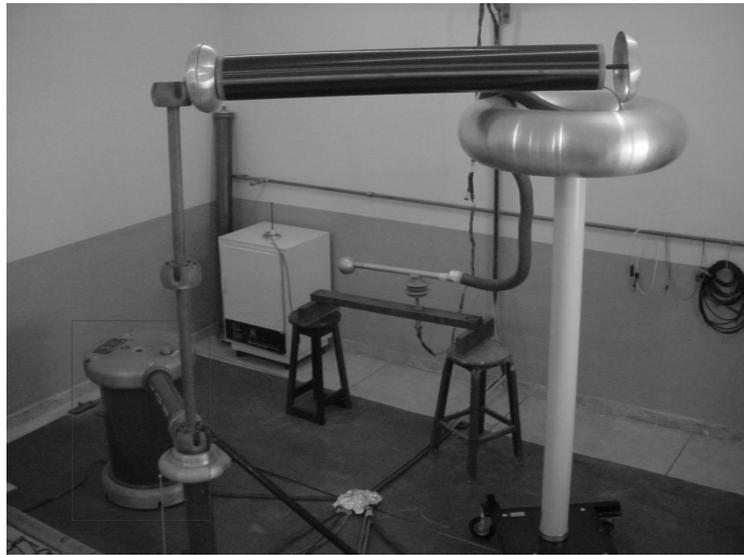


Figura 3.2. Fotografia do kit didático de alta tensão, mostrando o transformador em destaque.

2. Transformador de alta tensão de 600 kV / 600 kVA, mostrado na Figura 3.3;



Figura 3.3. Fotografia do salão de Alta Tensão, destacando o transformador utilizado nos ensaios.

3. Câmara de névoa, construída segundo as normas NBR 6936 e NBR 10621. A câmara possui um conjunto de cinco aspersores, que borrifam constantemente uma solução salina sob as amostras, para simular o efeito natural de névoa (Figura 3.4).



Figura 3.4. Fotografia externa da câmara de névoa salina, apresentando em detalhe uma das colunas de aspersores, localizada no interior.

3.2.1. ENSAIOS ELÉTRICOS DE DIAGNÓSTICO

A seguir são apresentados e descritos os ensaios elétricos utilizados para diagnóstico da degradação dos equipamentos poliméricos. Deverão ser submetidas a esses ensaios seis amostras novas de cada equipamento, além de amostras envelhecidas através dos diversos ensaios apresentados na Seção 3.2.2.

3.2.1.1. Corrente de Fuga

O ensaio para medição de corrente de fuga consiste de um arranjo experimental no qual a amostra sob ensaio é submetida à alta tensão enquanto a corrente do circuito é medida. O diagrama esquemático da montagem para medição de corrente de fuga é apresentado na Figura 3.5.

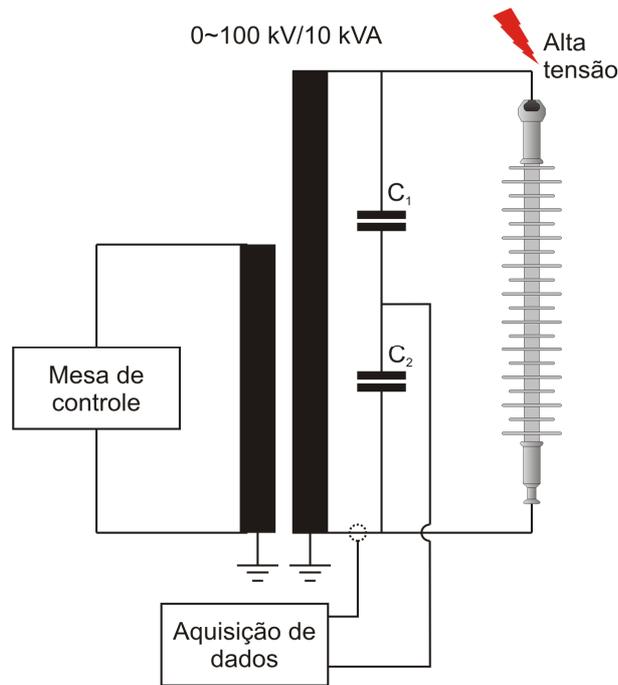


Figura 3.5. Diagrama esquemático da montagem para medição da corrente de fuga.

No ensaio em questão a corrente de fuga é medida indiretamente, através da tensão sobre um resistor *shunt* de resistência 1.485Ω . A tensão no resistor é medida utilizando-se um osciloscópio digital com largura de banda de 100 MHz e taxa de amostragem 1 bilhão de amostras por segundo (1 Gs/s).

3.2.1.2. Descargas Parciais

Na Figura 3.6 pode-se observar o circuito de medição de descargas parciais adotado no ensaio, conforme as normas NBR 6940 e IEC 60270. Na figura, a impedância Z corresponde a uma resistência para limitação de corrente; C_t representa a amostra sob ensaio; C_k corresponde ao capacitor de acoplamento; Z_m é o impedor e, DDP, o Detector de Descargas Parciais. Uma fotografia do arranjo pode ser vista na Figura 3.2.

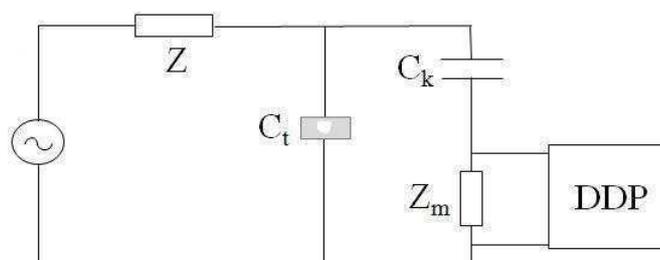


Figura 3.6. Circuito de medição de descargas parciais.

3.2.1.3. Tensão Suportável em 60 Hz

No ensaio de tensão suportável em 60 Hz a amostra é submetida à tensão na frequência industrial, que deve ser mantida por um intervalo de tempo de 60 segundos. O diagrama esquemático do ensaio pode ser visto na Figura 3.7. De acordo com a norma NBR 6936, o desempenho da amostra será considerado satisfatório se não ocorrer nenhuma descarga disruptiva na mesma.

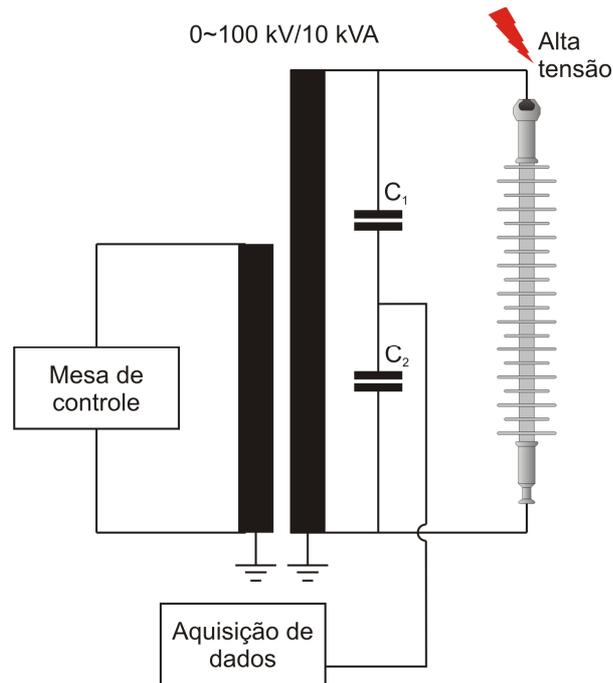


Figura 3.7. Diagrama esquemático da montagem para medição da tensão suportável em 60 Hz.

3.2.1.4. Tensão de Descarga Disruptiva

Neste ensaio a tensão aplicada, na frequência industrial, é elevada continuamente, até que ocorram descargas disruptivas na amostra. O valor da tensão alcançada no instante imediatamente anterior ao da descarga deve ser registrado e corrigido para condições atmosféricas normalizadas. O valor final deve ser a média das medidas de cinco descargas consecutivas. De acordo com a NBR 5032, a amostra é aprovada se o valor da tensão de descarga a seco não for inferior a 95% do valor nominal¹ de tensão disruptiva. O diagrama esquemático do ensaio é apresentado na Figura 3.8.

¹ Valor fixado pelo fabricante para uma determinada característica de um equipamento.

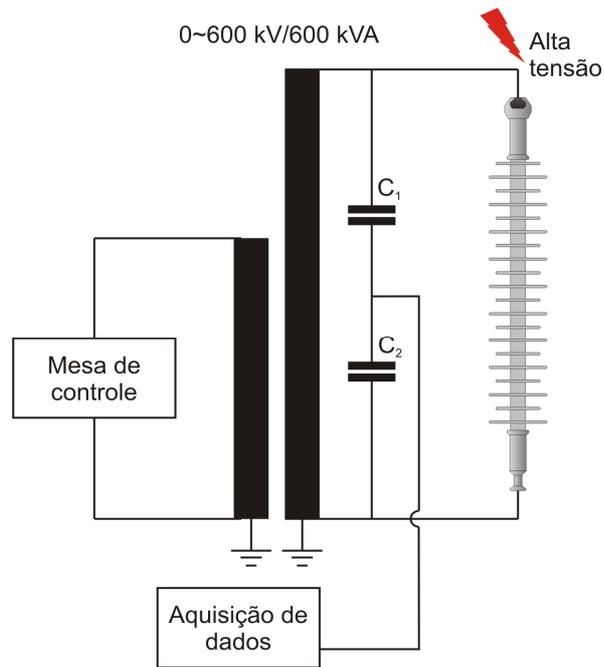


Figura 3.8. Diagrama esquemático da montagem para medição da tensão de descarga disruptiva.

3.2.1.5. Tensão de Descarga Disruptiva Sob Névoa Salina

A metodologia do ensaio é similar à apresentada na Seção 3.2.1.4, embora com a presença da névoa, que deve diminuir significativamente a suportabilidade superficial da amostra. O diagrama esquemático deste ensaio é apresentado na Figura 3.9.

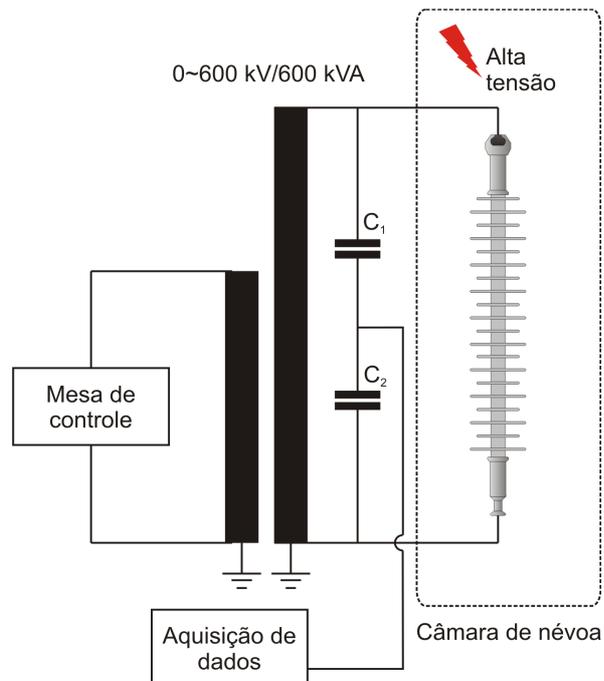


Figura 3.9. Diagrama esquemático da montagem para medição da tensão de descarga disruptiva sob névoa salina.

3.2.2. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

Com o intuito de promover a degradação acelerada das amostras, ensaios de envelhecimento deverão ser realizados. Os ensaios previstos são:

- Envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta em *Weather-Ometer* (WO) durante seis meses;
 - Câmara dotada de lâmpada de arco de xenônio de 6.500 W, com filtros de borosilicato. Ciclos de 120 min, divididos em 102 min de luz e 18 min de luz e spray de água, sem controle relativo de umidade. Ciclo seco a 63°C.
- Envelhecimento acelerado por submersão em água (H), durante 6 meses;
 - Tanque com água parada a 40°C.
- Envelhecimento térmico acelerado (T), por 6 meses;
 - Forno a 120°C, com circulação de ar.
- Envelhecimento por tensão elétrica (TE), durante 500 horas;
- Envelhecimento por tensão elétrica e névoa salina (TS), durante 500 horas.

Os três primeiros ensaios serão realizados nas dependências do CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento), sob a supervisão da Dra. Joceli M. G. Angelini. Serão utilizadas até duas amostras de cada equipamento, a depender da comportabilidade dos instrumentos de degradação. Nesta etapa do trabalho não haverá participação do proponente; o mesmo apenas terá acesso às amostras envelhecidas, que serão usadas no segundo ciclo de ensaios de diagnóstico.

Os demais ensaios, realizados pelo proponente na Universidade Federal de Campina Grande, são detalhados a seguir. Serão submetidas a estes ensaios duas amostras de cada equipamento.

3.2.2.1. *Envelhecimento por Tensão Elétrica*

Neste ensaio de envelhecimento as amostras serão submetidas à sua tensão nominal de operação por pelo menos 500 horas. Duas amostras de cada equipamento serão envelhecidas. Como cada equipamento possui uma tensão de operação diferente (ex.: espaçadores são submetidos à tensão fase-fase, enquanto nos isoladores aplica-se a tensão fase-terra), os pares

serão agrupados, para ensaio, de acordo com o nível de tensão. O diagrama esquemático do ensaio pode ser visto na Figura 3.8.

3.2.2.2. Envelhecimento por Tensão Elétrica e Névoa Salina

A metodologia é similar à apresentada na Seção 3.2.2.1. Este ensaio, no entanto, será conduzido em uma câmara de névoa, cujos aspersores são alimentados com solução salina de concentração determinada pela norma NBR 10621. Cada uma das amostras será exposta à alta tensão e à névoa salina por um período mínimo de 500 horas. O diagrama esquemático da montagem é mostrado na Figura 3.9.

CAPÍTULO 4

Resultados e Análises

4.1. AMOSTRAS NOVAS

Nas seções a seguir são apresentados os resultados dos ensaios de referência, realizados em amostras novas, recém retiradas do almoxarifado, identificadas por t_0 . As subseções estão divididas de acordo com os cinco ensaios elétricos realizados. Nestes ensaios, foram utilizadas seis amostras de cada equipamento, a exceção dos isoladores de pino, dos quais se dispunha de apenas duas amostras.

4.1.1. CORRENTE DE FUGA

O ensaio de corrente de fuga foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.1. Os resultados das medições podem ser observados na Tabela 4.1, onde são apresentados valores médios e desvios padrão das grandezas medidas em cada uma das amostras.

Tabela 4.1. Resultados da medição de corrente de fuga nos isolamentos poliméricos novos.

Amostras	Tensão aplicada (kV_{pico})	Corrente de fuga (μA_{pico})
Isoladores de suspensão	$13,2 \pm 0,3$	$11,5 \pm 1,4$
Isoladores de pino	$13,1 \pm 0,2$	$57,0 \pm 0,9$
Espaçadores	$21,3 \pm 0,2$	$61,2 \pm 7,5$
Laços plásticos laterais	$13,3 \pm 0,3$	$6,8 \pm 1,8$
Laços plásticos de topo	$13,5 \pm 0,5$	$5,6 \pm 1,3$

De maneira geral, todos os equipamentos apresentam correntes de fuga típicas e coerentes com seu estado de conservação e de poluição. Uma análise mais aprofundada deverá ser feita nas seções seguintes, quando estes resultados poderão ser comparados aos apresentados pelas amostras envelhecidas.

Na Figura 4.1, a título de ilustração, são mostrados os sinais de tensão aplicada e corrente de fuga em uma das amostras. É importante observar que os valores visualizados na figura representam sinais obtidos nos divisores de tensão e no resistor *shunt*, não correspondendo à ordem de grandeza dos valores apresentados na Tabela 4.1.

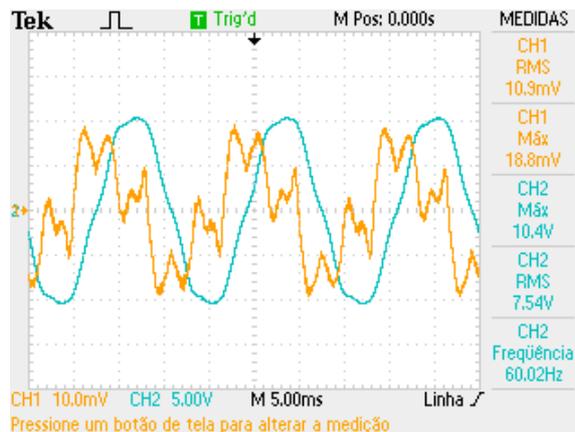


Figura 4.1. Sinais de tensão aplicada (azul) e corrente de fuga (laranja) em uma das amostras dos isoladores de suspensão novos.

As distorções visíveis nos sinais de corrente da Figura 4.1 são resultado da presença de ruídos externos à medição, bem como à influência de capacitâncias e indutâncias parasitas.

4.1.2. DESCARGAS PARCIAIS

As amostras dos isoladores de suspensão e de pino, espaçadores, laços plásticos laterais e de topo foram submetidas ao ensaio de descargas parciais, conforme descrito na Seção 3.2.1.2. Amostras de um mesmo equipamento apresentaram comportamento visivelmente díspar no ensaio, inviabilizando a exibição dos resultados em forma de médias e desvios padrão.

Devido ao grande número de amostras (vinte e seis, ao todo), são apresentadas nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 as grandezas mais significativas extraídas do ensaio. No Anexo A são apresentados os sinais de descargas parciais obtidos.

Nas células nulas presentes nas tabelas a seguir, é importante esclarecer que o nível de corte (*threshold*) definido no detector de descargas parciais durante as medições foi de 0 pC. Logo, pode-se afirmar que não foram detectadas descargas nas amostras em questão ao longo dos 60 segundos em que os dados do experimento foram registrados.

Tabela 4.2. Valores médios e máximos das descargas nos isoladores de suspensão novos.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
#1	17,0	0,3	9,5
#2	16,8	0,3	5,4
#3	16,8	0,0	0,0
#4	16,9	237,8	14,4
#5	16,8	0,0	0,0
#6	17,0	0,0	0,0

As amostras apresentam níveis de descarga condizentes com seu estado de conservação e de poluição. A amostra #4 apresentou maior atividade de descargas parciais em relação às outras amostras novas devido a uma cavidade presente na superfície do isolamento.

Tabela 4.3. Valores médios e máximos das descargas nos isoladores de pino novos.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
#1	16,8	49.660,0	341,4
#2	16,8	11.928,0	349,9

As duas amostras novas de isoladores de pino apresentaram níveis de descargas bastante elevados. Este comportamento pode ser justificado pela existência de numerosas imperfeições construtivas em pequena escala, como pode ser visto na Figura 4.2. Tais imperfeições dificultam a fixação adequada dos eletrodos de ensaio à amostra, provocando descargas nessas regiões.

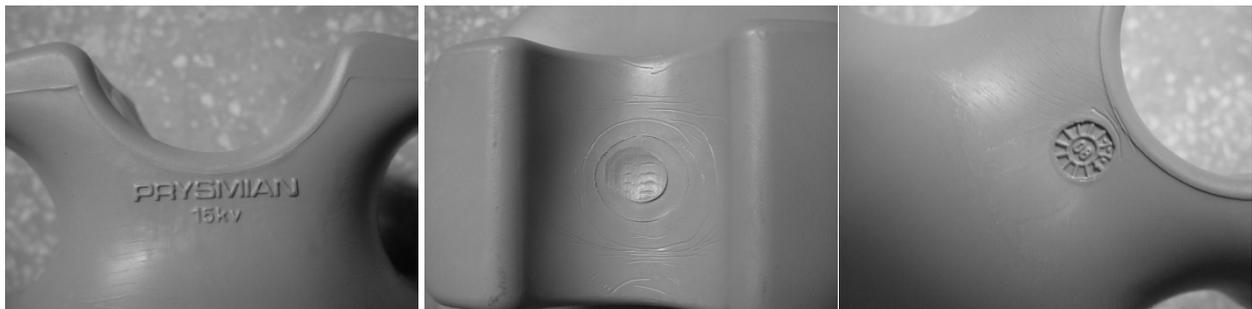


Figura 4.2. Fotografias evidenciando as imperfeições construtivas nos isoladores de pino novos.

A ocorrência de descargas nas estampas e na interface condutor-isolador impede um diagnóstico confiável de descargas parciais internas. O diagnóstico realizado refere-se a imperfeições construtivas superficiais, e não a possíveis cavidades internas, uma vez que o efeito das mesmas seria mascarado pelas descargas superficiais.

Tabela 4.4. Valores médios e máximos das descargas nos espaçadores novos.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
#1	29,3	981,9	14,0
#2	29,3	1.197,9	32,8
#3	29,3	446,8	20,1
#4	29,3	1.895,3	11,9
#5	29,3	4.852,0	99,9
#6	29,3	11.432,0	120,8

As elevadas médias de descargas observadas nas amostras de espaçadores novos se devem a imperfeições construtivas dos equipamentos, como as rebarbas apresentadas na Figura 4.3. Este mau acabamento gera espaços vazios entre o condutor e a superfície polimérica, onde ocorrem descargas.



Figura 4.3. Fotografia das imperfeições dos espaçadores novos.

Mesmo em um equipamento com acabamento perfeito, o ajustamento do condutor não é ideal, como pode ser visto na simulação apresentada Figura 4.4, realizada através do software COMSOL Multiphysics[®]. Na figura é mostrada uma simulação de campo elétrico em um espaçador sem rebarbas, onde se pode observar a elevada concentração de campo entre o condutor e a superfície polimérica. Numa amostra com rebarbas, como a apresentada na Figura 4.3, o espaço entre o condutor e a superfície polimérica seria ainda maior, provocando uma incidência mais intensa de descargas parciais.

A ocorrência de descargas nos espaços vazios entre o condutor e o espaçador ao longo do tempo provoca diminuição da resistência mecânica do equipamento, podendo inclusive ocasionar quebra do mesmo, e, por conseguinte, precisa ser investigada.

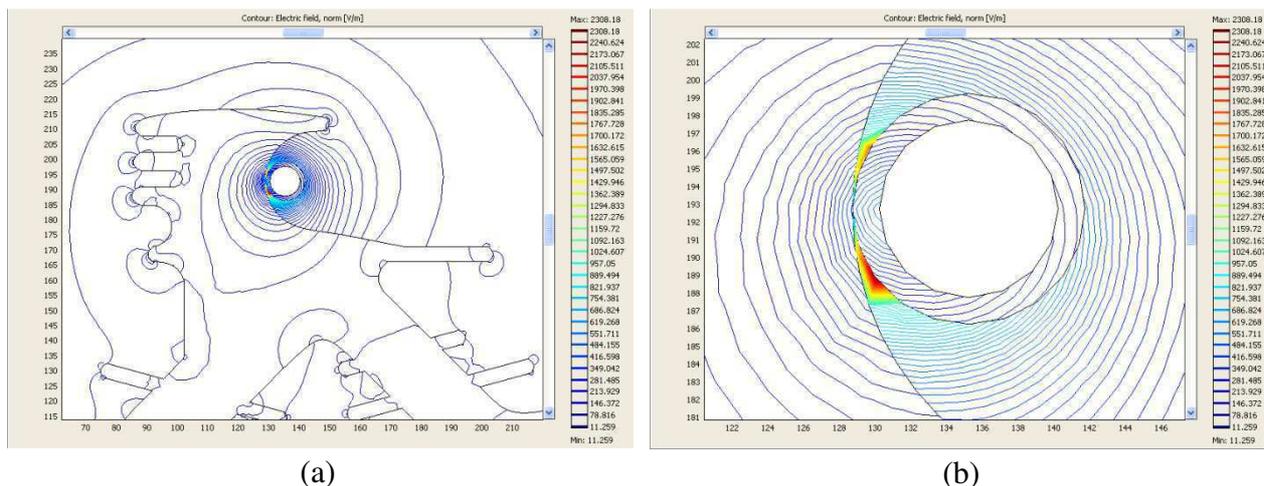


Figura 4.4. (a) Simulação de campo elétrico num espaçador polimérico ideal; (b) Vista aproximada da região crítica.

Tabela 4.5. Valores médios e máximos das descargas nos laços plásticos laterais novos.

Amostra	Tensão aplicada (kV _{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
#1	16,8	0,0	0,0
#2	16,8	0,0	0,0
#3	16,8	16,6	14,8
#4	16,8	0,0	0,0
#5	16,8	0,2	10,3
#6	16,8	0,0	0,0

Tabela 4.6. Valores médios e máximos das descargas nos laços plásticos de topo novos.

Amostra	Tensão aplicada (kV _{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
#1	16,8	0,0	0,0
#2	16,5	0,2	13,9
#3	16,5	0,0	0,0
#4	16,8	0,0	0,0
#5	17,0	0,2	7,9
#6	16,8	0,7	14,8

Os dois modelos de laços plásticos apresentaram baixos níveis de descargas parciais. O comportamento é previsível, devido à geometria longilínea dos equipamentos, resultando em campos elétricos relativamente baixos e incapazes de ionizar o ar ou possíveis cavidades internas às amostras.

4.1.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ

O ensaio de tensão suportável foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.3. Os resultados são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras novas.

Amostras	Tensão aplicada (kV_{pico})	Resultado
Isoladores de suspensão	13,2 ± 0,3	Aprovadas
Isoladores de pino	13,1 ± 0,2	Aprovadas
Espaçadores	21,3 ± 0,2	Aprovadas
Laços plásticos laterais	13,3 ± 0,3	Aprovadas
Laços plásticos de topo	13,5 ± 0,5	Aprovadas

Conforme esperado, nenhuma das amostras novas foi reprovada no ensaio de tensão suportável em 60 Hz.

4.1.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.4. Por ser um ensaio destrutivo, foi realizado em apenas uma amostra de cada equipamento, exceto os isoladores de pino, que possuíam duas amostras disponíveis. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras t_0 .

Amostras	Tensão (kV_{pico})	Tensão Normalizada (kV_{pico})
Isolador de suspensão	86,2	89,4
Isoladores de pino	94,4 ± 0,7	102,0 ± 0,8
Espaçador	74,2	76,7
Laço plástico lateral	177,6	185,3
Laço plástico de topo	213,8	222,2

Todas as amostras apresentaram resultados satisfatórios no ensaio em questão. Os resultados apresentados na Tabela 4.8 não trazem muita informação quando analisados isoladamente; estes ensaios de referência serão importantes a diante, quando poderão ser comparados ao desempenho de amostras envelhecidas dos mesmos equipamentos.

4.1.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.5. O número de amostras submetidas a este ensaio é idêntico ao utilizado no ensaio executado a seco (Seção 4.1.4). Os resultados são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa com as amostras t_0 .

Amostras	Tensão (kV_{pico})	Tensão Normalizada (kV_{pico})
Isolador de suspensão	85,1	88,5
Isoladores de pino	67,5 ± 2,4	73,1 ± 2,7
Espaçador	55,0	57,5
Laço plástico lateral	143,4	150,1
Laço plástico de topo	179,6	187,0

Conforme esperado, todas as amostras novas foram aprovadas no ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa salina. A tensão de descarga disruptiva das amostras sob névoa diminuiu consideravelmente em relação aos resultados da Tabela 4.8 (17,8% em média). Esta diminuição é provocada pelo aumento da condutividade superficial das amostras, devido à deposição da névoa salina.

4.2. AMOSTRAS ENVELHECIDAS EM *WEATHER-OMETER*

Apenas uma amostra de cada equipamento, identificada pela sigla WO, foi submetida ao *weather-ometer*, devido à capacidade reduzida da câmara de envelhecimento, à disponibilidade de tempo para realização do envelhecimento e aos custos envolvidos. Em seguida, as amostras foram submetidas aos ensaios elétricos de diagnóstico apresentados nesta seção.

4.2.1. CORRENTE DE FUGA

O ensaio de Corrente de Fuga (CF) foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.1. Os resultados das medições podem ser observados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras WO.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Corrente de fuga (μA_{pico})
Isolador de suspensão	13,0	13,7
Isolador de pino	13,0	57,7
Espaçador	21,8	77,8
Laço plástico lateral	13,5	12,9
Laço plástico de topo	13,5	10,5

Comparando as correntes de fuga das amostras WO com os resultados apresentados pelas amostras novas no mesmo ensaio (Tabela 4.1), pode-se observar um aumento de 44,5% na CF das amostras em geral. Este acréscimo pode ser atribuído à deterioração superficial dos equipamentos, que permitiu o crescimento da corrente na superfície das amostras. Destacam-se o comportamento das amostras de laço plástico lateral e de topo, que apresentaram aumentos de 89,2% e 86,3% da CF, respectivamente. O espaçador e o isolador de suspensão apresentaram variações de +27,2% e +1,6%, nessa ordem, por outro lado, a corrente de fuga do isolador de pino não apresentou variações significativas (+1,2%).

4.2.2. DESCARGAS PARCIAIS

O ensaio de descargas parciais foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.2. As médias temporais de descarga e os valores máximos são apresentados na Tabela 4.11. Os sinais de descargas parciais obtidos podem ser visualizados no Anexo B.

Tabela 4.11. Valores médios e máximos das descargas nas amostras WO.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
Isolador de suspensão	17,0	107,4	15,1
Isolador de pino	16,8	165,3	44,0
Espaçador	29,1	2.613,1	43,7
Laço plástico lateral	16,8	43,3	4,3
Laço plástico de topo	16,8	6,4	11,6

A diferença mais notável encontrada comparando-se os resultados da tabela acima com as tabelas apresentadas na Seção 4.1.2 (referente às amostras novas) diz respeito aos isoladores de pino, que apresentaram uma redução considerável do nível de descargas. Este efeito também pode ser observado comparando-se o isolador de pino na Figura B.1 com as amostras da Figura A.2 (a densidade de descargas nos picos do primeiro encontra-se significativamente atenuada). O efeito pode ser atribuído ao desgaste da superfície da amostra durante o envelhecimento, suavizando os relevos da mesma e diminuindo o efeito das descargas nas rebarbas e estampas em baixo e alto relevo apresentadas na Figura 4.2.

As amostras de isolador de suspensão, espaçador e laço plástico lateral apresentaram ocorrência de descargas parciais, no entanto, não foram detectadas descargas na amostra de laço plástico de topo.

4.2.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ

O ensaio de tensão suportável foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.3, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras WO.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Resultado
Isolador de suspensão	13,0	Aprovada
Isolador de pino	13,0	Aprovada
Espaçador	21,8	Aprovada
Laço plástico lateral	13,5	Aprovada
Laço plástico de topo	13,5	Aprovada

Todas as amostras envelhecidas em *weather-ometer* foram aprovadas no ensaio de tensão suportável em 60 Hz, indicando que o tempo de envelhecimento não foi suficiente para comprometer a capacidade isolante das amostras a ponto de causar falhas sob tensão suportável por 60 s.

4.2.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA

O ensaio de Tensão de Descarga Disruptiva (TDD) foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.4. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras WO.

Amostra	Tensão (kV_{pico})	Tensão Normalizada (kV_{pico})
Isolador de suspensão	87,6	95,2
Isolador de pino	90,4	97,7
Espaçador	70,6	76,3
Laço plástico lateral	93,4	99,8
Laço plástico de topo	139,2	148,7

Comparando-se a Tabela 4.13 com a Tabela 4.8 é possível observar, em média, uma redução na tensão de descarga disruptiva a seco das amostras envelhecidas de cerca de 15,5%. As amostras mais comprometidas pelo envelhecimento foram as dos laços plásticos laterais e de topo, que apresentaram reduções de 46,2% e 33,1%, respectivamente.

A amostra do isolador de suspensão envelhecido, ao contrário das demais submetidas ao mesmo processo de degradação, apresentou um aumento da TDD de 6,5% em relação às amostras novas. Isto pode ser atribuído à aleatoriedade das descargas *flashover*, que ocorrem por caminhos variados no ar; ou mesmo devido a alguma variação de característica intrínseca à amostra, já que as amostras envelhecidas e as amostras novas não eram as mesmas (apesar de pertencerem ao mesmo lote).

4.2.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa (TDS) foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.5. Os resultados são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14. Valores de tensão de descarga disruptiva sob névoa das amostras WO.

Amostras	Tensão (kV _{pico})	Tensão Normalizada (kV _{pico})
Isolador de suspensão	95,6	102,3
Isolador de pino	65,8	71,3
Espaçador	69,9	75,8
Laço plástico lateral	93,4	100,3
Laço plástico de topo	97,3	104,9

Comparando-se o desempenho das amostras WO com as amostras t_0 observa-se uma redução média de 6,5% na TDS. As amostras que apresentaram reduções mais significativas foram as de laços plásticos laterais e de topo (33,2% e 43,9%, respectivamente). Contudo, as amostras de isolador de suspensão e espaçador apresentaram aumentos na TDS de 15,7% e 31,7%, nessa ordem. O motivo dessas variações deve ser investigado mais profundamente, mas hipóteses foram levantadas na Seção 4.2.4. No ensaio de TDS em particular, a variação apresentada ainda pode ser atribuída à redução da hidrofobicidade das amostras, que faz com que a água aspergida e depositada na superfície das amostras forme uma película que afasta e diminui o campo elétrico, dificultando a formação do *flashover*.

A amostra de laço plástico lateral passou a pegar fogo no momento da formação do arco. O resultado foi a queima do material, conforme mostrado na Figura 4.5.

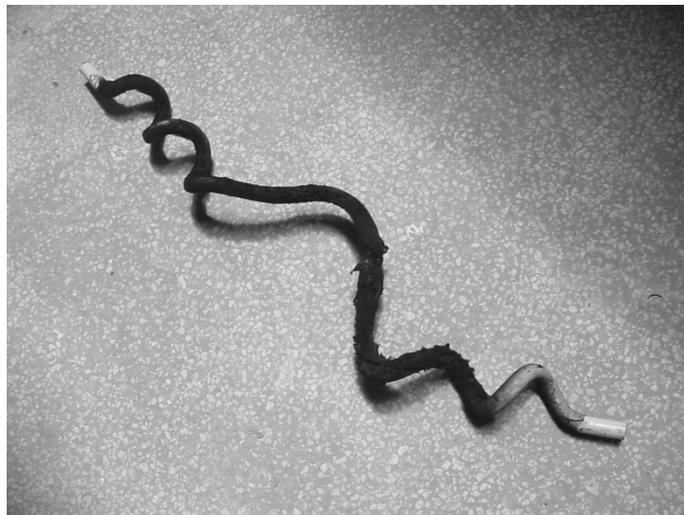


Figura 4.5. Fotografia da amostra Laço Plástico Lateral WO após ruptura sob névoa.

4.3. AMOSTRAS ENVELHECIDAS POR IMERSÃO EM ÁGUA

Duas amostras de cada equipamento, identificadas pela letra H, foram submetidas ao ensaio de envelhecimento por submersão em água. Em seguida, foram realizados os ensaios elétricos de diagnóstico apresentados nesta seção.

4.3.1. CORRENTE DE FUGA

O ensaio de corrente de fuga foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.1. Os resultados das medições podem ser observados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras H.

Amostras	Tensão aplicada (kV_{pico})	Corrente de fuga (μA_{pico})
Isoladores de suspensão	13,1 ± 0,2	12,9 ± 0,4
Isoladores de pino	13,0 ± 0,0	53,0 ± 0,9
Espaçadores	21,3 ± 0,4	79,1 ± 1,9
Laços plásticos laterais	13,3 ± 0,4	11,1 ± 0,9
Laços plásticos de topo	13,3 ± 0,4	9,5 ± 0,2

As correntes de fuga das amostras H, apresentadas acima, podem ser comparadas aos resultados da Tabela 4.1, referentes às amostras novas. Através desta comparação observa-se um aumento médio na corrente de fuga de 33,2%, com destaque para os laços plásticos laterais e de topo, que apresentaram correntes de fuga 63,3 e 68,9% superiores, respectivamente.

O aumento das correntes de fuga medidas é consequência do envelhecimento realizado, e embora as variações sejam significativas, comparativamente, são inferiores às obtidas através do envelhecimento em *weather-ometer* (Tabela 4.10). A conclusão direta desta afirmação é que, do ponto de vista da corrente de fuga, a radiação ultravioleta é mais danosa aos isolamentos estudados do que a imersão em água.

4.3.2. DESCARGAS PARCIAIS

O ensaio de descargas parciais foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.2. Os resultados numéricos do ensaio são apresentados na Tabela 4.16, e os sinais de descargas parciais podem ser visualizados no Anexo C.

Tabela 4.16. Valores médios e máximos das descargas nas amostras H.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
Isolador de suspensão H #1	17,0	300,7	15,1
Isolador de suspensão H #2	17,0	296,4	12,9
Isolador de pino H #1	16,8	4.237,2	139,7
Isolador de pino H #2	16,8	4.578,0	65,8
Espaçador H #1	29,0	2.507,4	37,8
Espaçador H #2	29,3	3.012,9	30,9
Laço plástico lateral H #1	16,5	1,8	4,6
Laço plástico lateral H #2	16,8	2,4	8,9
Laço plástico de topo H #1	16,8	0,9	4,5
Laço plástico de topo H #2	16,8	0,3	4,4

De maneira geral, os dados apresentados na Tabela 4.16 indicam elevadas médias de descargas, com valores máximos baixos. Este padrão é típico de descargas persistentes, como descargas corona ou descargas superficiais. Nas Figuras C.1 e C.3 observam-se manifestações de descargas parciais nos isoladores de suspensão e nos espaçadores. Os isoladores de pino também apresentam altos níveis de descargas (Figura C.2), embora os dois modelos de laços plásticos não apresentem descargas parciais (Figuras C.4 e C.5).

4.3.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ

O ensaio de tensão suportável foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.3, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras H.

Amostras	Tensão aplicada (kV_{pico})	Resultado
Isoladores de suspensão	13,1 ± 0,2	Aprovadas
Isoladores de pino	13,0 ± 0,0	Aprovadas
Espaçadores	21,3 ± 0,4	Aprovadas
Laços plásticos laterais	13,3 ± 0,4	Aprovadas
Laços plásticos de topo	13,3 ± 0,4	Aprovadas

Todas as amostras envelhecidas por submersão em água foram aprovadas no ensaio de tensão suportável em 60 Hz. Tal fato indica que o ensaio em questão não comprometeu a capacidade isolante das amostras a ponto de causar falhas à tensão suportável por 60 segundos.

4.3.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.4. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras H.

Amostras	Tensão (kV _{pico})	Tensão Normalizada (kV _{pico})
Isoladores de suspensão	85,3 ± 1,3	92,6 ± 1,3
Isoladores de pino	88,9 ± 0,6	96,2 ± 0,7
Espaçadores	67,8 ± 4,6	73,4 ± 5,0
Laços plásticos laterais	120,7 ± 4,5	128,9 ± 4,8
Laços plásticos de topo	184,8 ± 28,1	197,4 ± 30,0

Os dados da Tabela 4.18, quando comparados aos resultados obtidos pelas amostras t_0 (Tabela 4.8), mostram uma redução de 9,6% da TDD das amostras em geral. As amostras que apresentaram maior variação foram as de laços plásticos de topo (-30,4%). Os isoladores de suspensão, por outro lado, apresentaram aumento de 3,6%, desconsiderado devido à variação pouco significativa.

Os resultados deste ensaio sugerem ainda que, levando-se em consideração a tensão de descarga disruptiva a seco, o envelhecimento por imersão em água é menos danoso que o envelhecimento em *weather-ometer*, ratificando o resultado obtido através da comparação das correntes de fuga das amostras submetidas aos estes dois envelhecimentos.

4.3.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.5. Os resultados são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19. Resultado do ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa com as amostras H.

Amostras	Tensão (kV _{pico})	Tensão Normalizada (kV _{pico})
Isoladores de suspensão	92,7 ± 1,0	99,3 ± 1,1
Isoladores de pino	68,4 ± 0,0	74,1 ± 0,0
Espaçadores	72,6 ± 1,1	78,7 ± 1,2
Laços plásticos laterais	93,3 ± 4,7	100,2 ± 4,9
Laços plásticos de topo	110,4 ± 6,3	118,9 ± 6,8

A comparação das tensões de descarga disruptiva sob névoa das amostras H (Tabela 4.19) com a TDS das amostras t_0 (Tabela 4.9) evidencia numa redução média de 3,9% da tensão de ruptura das amostras. As amostras mais degradadas pelo envelhecimento em questão foram os laços plásticos, que apresentaram reduções na TDS de 36,4% (laço de topo) e 33,2% (modelo lateral). Isoladores de suspensão e espaçadores apresentaram aumentos de 12,2% e 36,7%, respectivamente. Hipóteses que podem justificar tal fenômeno foram propostas na Seção 4.2.5.

Mais uma vez, as amostras envelhecidas por imersão em água apresentaram desempenho superior às amostras WO (redução da TDS de 3,9% em relação a t_0 , contra 6,5% das amostras WO).

4.4. AMOSTRAS ENVELHECIDAS EM FORNO A 120°C

Devido às dimensões reduzidas do forno disponível, apenas uma amostra de espaçador, de isolador de pino e de cada um dos modelos de laço foi envelhecida por altas temperaturas. Todavia, duas amostras de isoladores de suspensão foram utilizadas. As seis amostras são identificadas pela sigla T, e nas próximas seções são apresentados os resultados dos ensaios elétricos de diagnóstico aos quais as amostras foram submetidas.

É importante ressaltar, no entanto, que após o envelhecimento as amostras de laço plástico lateral e laço plástico de topo se mostraram completamente carbonizadas, além de deformadas e quebradiças. Estas amostras se fragmentaram durante o manuseio e o transporte, inviabilizando a realização de ensaios elétricos com as mesmas.

4.4.1. CORRENTE DE FUGA

O ensaio de corrente de fuga foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.1. Os resultados das medições podem ser observados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras T.

Amostras	Tensão aplicada (kV _{pico})	Corrente de fuga (μA _{pico})
Isoladores de suspensão	13,0 ± 0,0	13,0 ± 0,2
Isolador de pino	13,3	46,9
Espaçador	21,8	79,1

A corrente de fuga média das amostras T, mostradas acima, apresentam-se 8,2% superior à corrente de fuga das amostras novas, mostradas na Tabela 4.1. Este valor é inferior ao apresentado pelas amostras WO (44,5%) e H (34,5%), entretanto, as altas médias obtidas pelos dois últimos grupos de amostras se devem à maior contribuição dos laços plásticos, que não puderam ser submetidos ao envelhecimento térmico.

As amostras de isolador de suspensão e espaçador apresentaram aumentos da CF de 12,8% e 29,4%, nessa ordem, enquanto a amostra de isolador de pino apresentou redução de 17,6%. A causa desta variação significativa e inesperada da CF do isolador de pino não foi constatada. Tal ocorrência necessita investigações posteriores, embora mais uma vez sugira características diferenciadas da amostra envelhecida em particular.

4.4.2. DESCARGAS PARCIAIS

O ensaio de descargas parciais foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.2. Resultados numéricos são apresentados na Tabela 4.21, e os sinais de descargas parciais podem ser visualizados no Anexo D.

Tabela 4.21. Valores médios e máximos das descargas nas amostras T.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
Isolador de suspensão T #1	17,0	126,3	15,1
Isolador de suspensão T #2	17,0	159,0	15,1
Isolador de pino	16,8	9.359,1	494,2
Espaçador	29,3	2.628,4	36,9

Todas as amostras apresentadas na tabela acima e no Anexo D apresentaram descargas parciais. Comparativamente, em relação aos ensaios anteriores, os níveis de descarga das amostras dos isoladores de suspensão T foram ligeiramente superiores aos das amostras WO, embora inferiores aos de H; a amostra de isolador de pino apresentou níveis de descarga notadamente superiores aos dois ensaios anteriores, e, por fim, o espaçador envelhecido através de altas temperaturas apresentou comportamento semelhante tanto às amostras envelhecidas em *weather-ometer* quanto às amostras H.

4.4.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ

O ensaio de tensão suportável foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.3. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras T.

Amostras	Tensão aplicada (kV_{pico})	Resultado
Isoladores de suspensão	13,0 ± 0,0	Aprovadas
Isolador de pino	13,3	Aprovada
Espaçador	21,8	Aprovada

Todas as amostras submetidas ao envelhecimento térmico foram aprovadas no ensaio de tensão suportável em 60 Hz, o que indica que o envelhecimento não comprometeu a capacidade isolante das amostras a ponto de causar falhas sob tensão suportável por 60 s.

4.4.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.4. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras T.

Amostras	Tensão (kV_{pico})	Tensão Normalizada (kV_{pico})
Isoladores de suspensão	87,8 ± 1,1	94,8 ± 1,2
Isolador de pino	93,6	101,1
Espaçador	71,8	77,8

As amostras de isoladores de suspensão envelhecidas termicamente apresentaram um aumento de 6,1% da TDD em relação às amostras novas; a amostra de isolador de pino apresentou uma redução de 0,8%, e, finalmente, a amostra de espaçador apresenta um aumento na TDD de 1,5%.

A variação da tensão de descarga da amostra de isolador de pino é pouco significativa e pode ser desprezada. Quanto ao resultado das outras duas amostras, hipóteses que justifiquem o aumento da TDD foram citadas na Seção 4.2.4.

4.4.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.5. Os resultados são apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24. Resultado do ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa com as amostras T.

Amostras	Tensão (kV_{pico})	Tensão Normalizada (kV_{pico})
Isoladores de suspensão	85,8 ± 3,9	86,0 ± 4,2
Isolador de pino	60,0	65,0
Espaçador	70,8	76,8

A comparação das tensões de descarga disruptiva sob névoa das amostras T (Tabela 4.24) com as TDS das amostras t_0 (Tabela 4.9) evidencia uma redução das TDS dos isoladores de suspensão e de pino de 2,8% e 11,1%, respectivamente, e um aumento na TDS da amostra de espaçador de 33,4%. Possíveis teorias que justifiquem o comportamento imprevisível da amostra de espaçador foram expostas na Seção 4.2.5.

4.5. AMOSTRAS ENVELHECIDAS POR TENSÃO ELÉTRICA

Duas amostras de cada equipamento foram submetidas ao ensaio de envelhecimento por Tensão Elétrica (TE), a exceção dos isoladores de pino, dos quais se dispunha de quatro amostras. Uma vez envelhecidas, as amostras foram utilizadas nos ensaios de diagnóstico apresentados nesta seção.

4.5.1. CORRENTE DE FUGA

O ensaio de corrente de fuga foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.1. Os resultados das medições podem ser observados na Tabela 4.25.

Tabela 4.25. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras TE.

Amostras	Tensão aplicada (kV _{pico})	Corrente de fuga (μA _{pico})
Isoladores de suspensão	12,3 ± 0,0	13,6 ± 0,4
Isoladores de pino	12,4 ± 0,1	78,9 ± 4,9
Espaçadores	21,8 ± 0,0	68,6 ± 1,4
Laços plásticos laterais	13,3 ± 0,0	11,7 ± 0,9
Laços plásticos de topo	13,3 ± 0,0	10,9 ± 0,0

A comparação dos resultados apresentados na Tabela 4.25 com os apresentados na Tabela 4.1 (amostras novas) indica um aumento médio de 46,5% na corrente de fuga das amostras. As maiores contribuições para esta elevada média são das amostras de laços plásticos laterais e de topo (71,3% e 92,7%, nessa ordem). Esta média de 46,5% é superior à obtida nos outros três envelhecimentos analisados até este ponto, indicando que, do ponto de vista da corrente de fuga, o envelhecimento por aplicação de tensão é mais prejudicial às amostras que a radiação ultravioleta (44,5%), a imersão em água (33,2%) ou as elevadas temperaturas (8,2%).

4.5.2. DESCARGAS PARCIAIS

O ensaio de descargas parciais foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.2. Resultados numéricos são apresentados na Tabela 4.26, e os sinais de descargas parciais podem ser visualizados no Anexo E.

Tabela 4.26. Valores médios e máximos das descargas nas amostras TE.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
Isolador de suspensão TE #1	16,8	162,3	15,4
Isolador de suspensão TE #2	16,8	24,6	10,3
Isolador de pino TE #1	17,0	11.252,0	98,3
Isolador de pino TE #2	17,0	5,8	14,9
Isolador de pino TE #3	17,0	1,0	14,9
Isolador de pino TE #4	17,4	383,3	14,8
Espaçador TE #1	29,3	171,6	14,7
Espaçador TE #2	29,3	22.636,0	165,4
Laço Plástico Lateral TE #1	16,8	0,0	0,0
Laço Plástico Lateral TE #2	16,8	34,4	15,4
Laço Plástico de Topo TE #1	16,8	6,1	9,9
Laço Plástico de Topo TE #2	16,8	9,7	11,5

Os valores numéricos apresentados na Tabela 4.26, assim como os sinais das Figuras E.1 a E.5, indicam níveis de descargas parciais nas amostras TE semelhantes às amostras WO, H e T. Os resultados indicam, portanto, que ou não havia bolhas no interior dos isolamentos (já que não houve aumento significativo dos níveis de descargas parciais com a aplicação de tensão) ou o tempo de envelhecimento de 500 h não foi suficiente para provocar os efeitos desejados. Uma terceira possibilidade é que possíveis cavidades no isolamento localizavam-se em regiões de baixo campo elétrico, não havendo, assim, descargas parciais.

4.5.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ

O ensaio de tensão suportável foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.3. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.27.

Tabela 4.27. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras TE.

Amostras	Tensão aplicada (kV_{pico})	Resultado
Isoladores de suspensão	12,3 ± 0,0	Aprovadas
Isoladores de pino	12,4 ± 0,1	Aprovadas
Espaçadores	21,8 ± 0,0	Aprovadas
Laços Plásticos Laterais	13,3 ± 0,0	Aprovadas
Laços Plásticos de Topo	13,3 ± 0,0	Aprovadas

Todas as amostras submetidas ao envelhecimento por tensão elétrica foram aprovadas no ensaio de tensão suportável em 60 Hz. Isto sugere que o tempo de envelhecimento não foi suficiente para comprometer a capacidade isolante das amostras a ponto de causar falhas à tensão suportável por 60 segundos.

4.5.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.4. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.28.

Tabela 4.28. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras TE.

Amostras	Tensão (kV_{pico})	Tensão Normalizada (kV_{pico})
Isoladores de suspensão	89,4 ± 3,4	96,5 ± 3,7
Isoladores de pino	89,3 ± 1,5	96,6 ± 1,6
Espaçadores	72,7 ± 0,3	78,7 ± 0,4
Laços plásticos laterais	178,7 ± 1,4	193,0 ± 1,6
Laços plásticos de topo	207,8 ± 7,1	224,8 ± 7,8

Das amostras apresentadas na Tabela 4.28, as únicas que apresentaram redução da tensão de descarga disruptiva a seco foram os isoladores de pino, que apresentaram uma variação de 5,3%. Isoladores de suspensão, espaçadores e laços plásticos laterais e de topo apresentaram aumentos de 8,0%, 2,6%, 4,2% e 1,2%, respectivamente. Logo, das 12 amostras ensaiadas, apenas os quatro isoladores de pino apresentaram redução da TDD. Prováveis explicações remetem à publicação de EPRI (2003), onde é dito que na terceira geração de polímeros, utilizada a partir do final da década de 1990, os efeitos do envelhecimento devem ser mínimos. Ainda segundo EPRI (2003), a utilização de novos enchimentos (cargas), estabilizantes e aditivos na composição dos materiais permite uma melhoria no desempenho em serviço dos equipamentos, aumentando a resistência a ultravioleta, intempéries e descargas elétricas.

Possivelmente, a tensão aplicada nos ensaios TE de envelhecimento tenha atuado como catalisador, acelerando a atuação dos aditivos e provocando um melhoramento das propriedades das amostras que não pôde ser verificado na mesma proporção com os demais envelhecimentos.

4.5.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.5. Os resultados são apresentados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29. Resultados dos ensaios de descarga disruptiva em névoa com as amostras TE.

Amostras	Tensão (kV_{pico})	Tensão Normalizada (kV_{pico})
Isoladores de suspensão	78,4 ± 12,8	84,5 ± 13,8
Isoladores de pino	67,0 ± 2,8	72,3 ± 3,1
Espaçadores	64,3 ± 0,7	69,4 ± 0,8
Laços plásticos laterais	148,0 ± 8,5	159,5 ± 9,1
Laços plásticos de topo	157,2 ± 10,7	169,3 ± 11,6

As amostras de isoladores de suspensão, isoladores de pino e laços plásticos de topo apresentaram uma redução da TDS de 4,5%, 1,2% e 9,5%, respectivamente. As amostras de espaçadores e laços plásticos laterais tiveram suas TDS aumentadas em 20,7% e 6,3%, nessa ordem. Teorias a respeito deste fenômeno foram apresentadas nas Seções 4.5.4 e 4.2.5.

4.6. AMOSTRAS ENVELHECIDAS POR TENSÃO ELÉTRICA E NÉVOA SALINA

Duas amostras de cada equipamento foram submetidas ao ensaio de envelhecimento por Tensão Elétrica e Névoa Salina (TS), a exceção dos isoladores de pino, dos quais se dispunha de quatro amostras. Uma vez envelhecidas, as amostras foram submetidas aos ensaios de diagnóstico apresentados nesta seção.

4.6.1. CORRENTE DE FUGA

O ensaio de corrente de fuga foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.1. Os resultados das medições podem ser observados na Tabela 4.30.

Tabela 4.30. Resultados da medição de corrente de fuga nas amostras TS.

Amostras	Tensão aplicada (kV _{pico})	Corrente de fuga (μA _{pico})
Isoladores de suspensão	12,4 ± 0,2	18,6 ± 5,5
Isoladores de pino	12,4 ± 0,1	78,4 ± 3,5
Espaçadores	21,8 ± 0,0	88,7 ± 45,5
Laços plásticos laterais	13,4 ± 0,2	15,1 ± 0,4
Laços plásticos de topo	13,3 ± 0,0	10,8 ± 0,4

Como o desvio padrão obtido pelas duas amostras de espaçadores foi considerável (45,5 kV), o valor das medições individuais é apresentado a seguir: a amostra Espaçador TS #1 apresentou uma corrente de fuga de 120,9 μA e a amostra Espaçador TS #2, 56,6 μA.

A comparação dos resultados apresentados na Tabela 4.30 com os apresentados na Tabela 4.1 (amostras novas) indica um aumento médio de 71,2% na corrente de fuga das amostras. As maiores contribuições para esta elevada média são das amostras de laços plásticos laterais e de topo (120,9% e 90,8%, respectivamente). Esta média de 71,2% é superior à obtida nos outros envelhecimentos analisados, sugerindo que, considerando-se exclusivamente a corrente de fuga, o envelhecimento por aplicação de tensão e névoa é mais prejudicial às amostras que a tensão elétrica exclusivamente (46,5%), a radiação ultravioleta (44,5%), a imersão em água (33,2%) ou as elevadas temperaturas (8,2%).

4.6.2. DESCARGAS PARCIAIS

O ensaio de descargas parciais foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.2. Resultados numéricos são apresentados na Tabela 4.31, e os sinais de descargas parciais podem ser visualizados no Anexo F.

Tabela 4.31. Valores médios e máximos das descargas nas amostras TS.

Amostra	Tensão aplicada (kV_{pico})	Média das Descargas (pC/s)	Valor Máximo (pC)
Isolador de suspensão TS #1	16,8	45.117,0	61,4
Isolador de suspensão TS #2	16,8	97.358,0	15,4
Isolador de pino TS #1	17,0	11.836,0	80,4
Isolador de pino TS #2	17,0	51,1	10,4
Isolador de pino TS #3	17,0	1.143,8	41,9
Isolador de pino TS #4	17,0	382.220,0	565,6
Espaçador TS #1	29,3	384,6	10,1
Espaçador TS #2	29,3	1.164,6	19,6
Laço Plástico Lateral TS #1	16,8	6,7	15,1
Laço Plástico Lateral TS #2	16,8	5,2	8,9
Laço Plástico de Topo TS #1	16,8	52,3	15,4
Laço Plástico de Topo TS #2	16,8	0,0	0,0

A partir dos resultados da Tabela 4.31 e das imagens do Anexo F, observa-se claramente uma maior incidência de descargas parciais nas amostras TS em relação a todas as demais (WO, H, T e TE). Estes altos níveis de descargas evidenciam-se principalmente nos isoladores de suspensão e de pino apresentados nas Figuras F.1 e F.2. As amostras dos demais equipamentos (espaçadores e laços plásticos) apresentam comportamentos semelhantes aos observados nos demais envelhecimentos, ou seja, pouca ou nenhuma presença de descargas parciais.

4.6.3. TENSÃO SUPORTÁVEL EM 60 HZ

O ensaio de tensão suportável foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.3. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.32.

Tabela 4.32. Resultados do ensaio de tensão suportável em 60 Hz com as amostras TS.

Amostras	Tensão aplicada (kV_{pico})	Resultado
Isoladores de suspensão	12,4 ± 0,2	Aprovadas
Isoladores de pino	12,4 ± 0,1	Aprovadas
Espaçadores	21,8 ± 0,0	Aprovadas
Laços Plásticos Laterais	13,4 ± 0,2	Aprovadas
Laços Plásticos de Topo	13,3 ± 0,0	Aprovadas

Todas as amostras submetidas ao envelhecimento por tensão elétrica foram aprovadas no ensaio de tensão suportável em 60 Hz. Isto sugere que o ensaio não comprometeu a capacidade isolante das amostras a ponto de causar falhas sob tensão suportável por 60 s.

4.6.4. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.4. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.33.

Tabela 4.33. Resultados do ensaio de tensão de descarga disruptiva a seco com as amostras TS.

Amostras	Tensão (kV_{pico})	Tensão Normalizada (kV_{pico})
Isoladores de suspensão	86,9 ± 1,0	93,8 ± 1,1
Isoladores de pino	80,0 ± 4,8	86,6 ± 5,2
Espaçadores	61,9 ± 9,6	67,0 ± 10,4
Laços plásticos laterais	173,2 ± 0,6	187,2 ± 0,6
Laços plásticos de topo	206,7 ± 3,5	222,8 ± 2,8

Das amostras apresentadas na Tabela 4.33, as amostras de isoladores de pino e espaçadores apresentaram redução da TDD de 15,1% e 12,6%, nesta ordem, enquanto as amostras de isoladores de suspensão, laços plásticos laterais e de topo apresentaram aumentos de 5,0%, 1,0% e 0,2%, respectivamente. O aumento atípico da TDD pode ser atribuído a variações estocásticas aleatórias, que poderiam ser minimizadas utilizando-se um universo amostral maior, ou talvez à utilização de aditivos na composição dos materiais, comentada na Seção 4.5.4. Deve-se considerar ainda a possibilidade de o tempo de envelhecimento não ter sido suficiente para provocar variações significativas na tensão de descarga disruptiva das amostras.

4.6.5. TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA SOB NÉVOA SALINA

O ensaio de tensão de descarga disruptiva sob névoa foi realizado conforme descrito na Seção 3.2.1.5. Os resultados são apresentados na Tabela 4.34.

Tabela 4.34. Resultados dos ensaios de descarga disruptiva sob névoa com as amostras TS.

Amostras	Tensão (kV_{pico})	Tensão Normalizada (kV_{pico})
Isoladores de suspensão	75,0 ± 13,0	80,9 ± 13,9
Isoladores de pino	72,7 ± 1,0	78,5 ± 1,1
Espaçadores	48,2 ± 1,1	52,0 ± 1,2
Laços plásticos laterais	152,1 ± 0,4	163,9 ± 0,5
Laços plásticos de topo	177,1 ± 14,0	190,8 ± 15,1

As tensões de descarga disruptiva das amostras de isoladores de suspensão e espaçadores diminuíram em 8,5% e 9,7% em relação às amostras novas, enquanto a TDS de isoladores de pino e laços plásticos aumentaram 7,3% (isoladores de pino), 9,2% (laços laterais) e 2,0% (laços de topo). Possíveis razões para as variações positivas da tensão de descarga disruptiva sob névoa salina foram apresentadas anteriormente, nas Seções 4.2.5 e 4.5.4.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudada a influência do envelhecimento nas características elétricas de isolamentos poliméricos. Através de ensaios de medição de corrente de fuga, descargas parciais, tensão suportável em 60 Hz, tensão de descarga disruptiva e tensão de descarga disruptiva sob névoa salina foi possível avaliar o fenômeno de envelhecimento por diversos fatores, a saber: radiação ultravioleta, imersão em água, altas temperaturas, tensão elétrica e tensão elétrica associada à névoa salina.

Do ponto de vista da corrente de fuga, o envelhecimento mais prejudicial às amostras foi aquele utilizando tensão elétrica e névoa salina, que proporcionou um aumento médio da corrente de fuga das amostras de 71,2%, atingindo 120,9% nas amostras de laços plásticos laterais. No entanto, a medição de corrente de fuga evidencia principalmente a deterioração superficial dos equipamentos. Para obter uma caracterização volumétrica das amostras, foi realizado o ensaio de descargas parciais.

O ensaio de descargas parciais corroborou os resultados da medição de corrente e fuga, mostrando uma incidência superior de descargas parciais nas amostras submetidas à tensão elétrica e à névoa salina. Nos envelhecimentos por altas temperaturas e por imersão em água também foram observados níveis elevados de descargas parciais.

Através de inspeções visuais associadas à medição de descargas parciais foram observadas deficiências no acabamento de equipamentos como isoladores de pino e espaçadores, assim como os efeitos prejudiciais das mesmas. A ocorrência de descargas na proximidade do condutor provoca degradação acelerada tanto do condutor quanto do equipamento, podendo vir a ocasionar o rompimento do condutor fase ou a quebra de isoladores de pino e espaçadores. Por conseguinte, medidas para minimização das descargas se fazem necessárias.

Os espaços vazios na interface condutor-equipamento podem ser reduzidos com o emprego de cabos isolados, uma vez que, devido à maior plasticidade do material isolante, os cabos se acomodariam de maneira mais adequada no equipamento. Todavia, esta solução se mostra ineficaz quanto à redução das descargas, uma vez que a permissividade do revestimento

polimérico é superior à do ar, concentrando ainda mais o campo elétrico na interface entre os meios. Assim, o nível de descargas na região poderia ser inclusive maior que na situação utilizando um condutor sem isolamento.

Conclui-se, portanto, que a solução do problema não é trivial, e exige estudos avançados, envolvendo o desenvolvimento de desenhos alternativos de espaçadores e isoladores, procurando-se minimizar o campo elétrico nas regiões críticas e tornando o acabamento das peças o mais uniforme possível. A utilização de uma sela metálica no topo de isoladores de pino, onde o condutor é apoiado, elimina o problema da divergência de campo elétrico e reduz as descargas elétricas, desde que se garanta que não haja vazios entre a sela e o isolador. Alternativamente, intervenções simples no processo de fabricação podem surtir efeito, como, a aplicação das estampas de identificação dos equipamentos em regiões mais afastadas do condutor, por exemplo, nas proximidades da ferragem aterrada.

Todas as amostras foram aprovadas no ensaio de tensão suportável em 60 Hz, apesar dos envelhecimentos. Isso aconteceu porque para que uma amostra seja reprovada no ensaio, o nível de degradação da mesma precisa ser extremamente avançado, já que a tensão aplicada é a tensão nominal para a qual o equipamento foi projetado. Logo, dos ensaios elétricos realizados no trabalho, o de tensão suportável em frequência industrial foi o menos conclusivo.

Nos ensaios de tensão de descarga disruptiva, a seco e sob névoa, o envelhecimento em câmara de ultravioleta (*weather-ometer*) mostrou-se mais danoso, com uma redução média de 15,5% da TDD e 6,5% da TDS em relação às amostras novas. Contudo, principalmente nos envelhecimentos envolvendo aplicação de tensão, foram observados aumentos na tensão de disrupção de algumas amostras em relação às novas. A explicação mais plausível refere-se à utilização de aditivos na composição dos equipamentos (isoladores de suspensão e espaçadores, principalmente), que têm sua ação acelerada pela aplicação de tensão elétrica e atuam na melhoria do desempenho dos materiais isolantes.

A queima de uma amostra de laço plástico envelhecida por radiação ultravioleta evidenciou a carência de sistemas de estabilização termo e fotooxidativos, indicando a necessidade de desenvolvimento de novas composições de isolantes, mais eficazes.

Os resultados da pesquisa ressaltam a importância do acompanhamento por parte das concessionárias das etapas de:

1. Aquisição de produtos, exigindo dos fornecedores equipamentos poliméricos bem estabelecidos, com design adequado, acabamento satisfatório e composições estabilizadas;
2. Transporte e instalação, de modo a evitar danos aos equipamentos poliméricos que venham a prejudicar seu desempenho em longo prazo, como quebra de aletas, fissuras ou trincas no polímero.
3. Operação, realizando manutenções preventivas e preditivas em intervalos otimizados, permitindo a verificação de mau-funcionamentos com antecipação, evitando que problemas como os citados no item 2 venham a acelerar a erosão dos materiais devido à ação de descargas elétricas e possam evoluir para defeitos mais severos, como exposição do núcleo, trilhamento interno, fratura frágil, etc.

Dessa forma, manutenções corretivas podem ser evitadas, e a integridade das redes de distribuição de energia pode ser mantida com medidas de realização simples e custo atrativo.

5.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Possíveis trabalhos futuros envolvem a realização de envelhecimentos de duração mais longa e com um maior número de amostras, permitindo um maior tempo de atuação dos fatores degradantes (afetando mais severamente as amostras), e diminuindo-se os erros estatísticos devido a um maior espaço amostral.

Ferramentas computacionais de cálculo de campo podem ser utilizadas para estudar e, posteriormente, desenvolver desenhos alternativos de isolamentos, que venham a diminuir a ocorrência de descargas superficiais e parciais, diminuindo o risco de falha dos equipamentos.

Outras técnicas de envelhecimento devem ser adicionadas às futuras pesquisas, como, por exemplo, o teste de roda de trilhamento, através do qual o efeito da penetração de água seria melhor evidenciado que no ensaio por imersão em água, facilitando inclusive processos de exposição e carbonização do núcleo através da aplicação concomitante de tensão.

Técnicas alternativas de diagnóstico também podem ser estudadas, como espectroscopia ou microscopia, que permitem o acompanhamento da evolução da perda de silicone dos revestimentos poliméricos. O valor desse processo reside no fato de o silicone ser o componente efetivamente responsável pela isolação elétrica, além de atribuir ao equipamento a propriedade hidrofóbica.

5.3. TRABALHOS PUBLICADOS

No decorrer do curso de mestrado foram publicados ou aceitos para publicação os seguintes artigos, relacionados com o trabalho desenvolvido:

1. COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V.; NERI, M.; QUEIROZ, I. B.; GERMANO, A. D. **Characterization of polymeric insulators using thermal and UV imaging under laboratory conditions**. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. v. 16, p. 985-992, 2009;
2. GERMANO, A. D.; FERREIRA, T. V.; COSTA, E. G.; SOUSA, F. P. F.; VILAR, P. B.; TORRES, I. S. M.; GUEDES, G. P. **Avaliação de uma técnica de diagnóstico de isoladores a partir do espectro ultra-sônico**. In: CLAGTEE 2009. Ubatuba, Brasil, 2009;
3. FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D.; VILAR, P. B.; COSTA, E. G.; BEZERRA, J. M. B. **Diagnóstico de isoladores baseado na emissão de ruídos ultra-sônicos**. In: XIII ERIAC - Encontro Regional Iberoamericano do CIGRÉ. Puerto Iguazú, Argentina, 2009;
4. COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D.; ANGELINI, J.; MENDONÇA, P. L.; MOLINA, F. H. **Effect of artificial aging on polymeric spacers**. In: 16th International Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2009. South Africa, 2009;
5. COSTA, E. G.; VILAR, P. B.; FERREIRA, T. V.; SOUSA, F. P. F.; TORRES, I. S. M.; GERMANO, A. D. **Influence of manufacturing imperfections and water drops in the electric field distribution of polymeric insulators**. In: 16th International Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2009. South Africa, 2009;
6. COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V.; VILAR, P. B.; GERMANO, A. D.; BEZERRA, J. M. B. **Estimation of insulators pollution based on spectral analysis**. In: 16th International Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2009. South Africa, 2009;
7. MENDONÇA, P. L.; ANGELINI, J. M. G.; NALLIN, F. E.; COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D. **Monitoramento de Isoladores Poliméricos em Linhas de Transmissão Através de Sensor de Corrente de Fuga**. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2010. Belém, Brasil, 2009;

8. FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D.; COSTA, E. G.; ANGELINI, J. M. G.; NALLIN, F. E. M.; MENDONÇA, P. L. **Isoladores Poliméricos Envelhecidos Naturalmente: Lavagens e Suas Conseqüências.** In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2010. Belém, Brasil, 2009;
9. FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D.; COSTA, E. G.; ANGELINI, J. M. G.; NALLIM, F. E.; MENDONÇA, P. **Naturally Aged Polymeric Insulators: Washing and its Consequences.** In: Modern Electric Power System – MEPS’10, a ser realizado em Wroclaw, Polônia, em setembro de 2010;
10. FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D.; COSTA, E. G. **Ultra-Sound and Artificial Intelligence Applied to the Diagnostic of Insulations in the Field.** In: International Conference on High Voltage Engineering – ICHVE 2010, a ser realizado em Nova Orleans, Estados Unidos, em outubro de 2010.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIN, M.; SALMAN, M. **Aging of Polymeric insulators (An Overview)**. In: Reviews on Advanced Materials Science, v.13, n.2. 2006.

AMIN, M.; AMIN, S.; ALI, M. **Monitoring of leakage current for composite insulators and electrical devices**. Pakistan: Reviews on Advanced Materials Science, v.21, n.1, 2009.

BESZTERCEY, G.; KARADY, G. G.; RUFF, D. L. **A novel method to measure the contamination level of insulators – Spot contamination measurement**. Proceedings of IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Arlington: June 1998.

BISNATH, S.; BRITTEN, A. C.; CRETCHLEY, D. H.; MUFTIC, D.; PILLAY, T.; VAJETH, R. **The Planning, Design & Construction of Overhead Power Lines**. South Africa: Crown Publications cc, 2005. 772p.

BISNATH, S.; BRITTEN, A. C.; MARSHALL, E.; PILLAY, T.; REYNDERS, J. **The Fundamentals and Practice of Overhead Line Maintenance**. South Africa: Crown Publications cc, 2006. 258p.

BOLOGNA, F. F.; MAHATHO, N.; HOCH, D. A. **Infrared and ultraviolet imaging techniques applied to the inspection of outdoor transmission voltage insulators**. Proceedings of the IEEE Africon Conference. George: October 2002.

BRADWELL, A. **Importance of preventing moisture ingress to polymeric insulators**. Electric Power Applications, IEE Proceedings B, v.131, n.6. November 1984.

BURNHAM, J. T. **Bird streamer flashovers on FPL transmission lines**, IEEE Transactions on Power Delivery, v.10, n.2, 1995.

CIGRÉ. **The measurement of site pollution severity and its application to insulator dimensioning for AC systems**. WG 33-04. Electra n.54. 1979.

CIGRÉ. **Guide for the identification of brittle fracture of composite insulator FRP rod**. Electra n. 143. August 1992.

CHO, H. G.; HAN, S. W.; LEE, U. Y. **Multi-aging technology for estimating long time performance of polymeric insulators**. 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, USA: April 2002.

CONTIN, A.; RABACH, G.; TOSATO, F. **Study of Electrical Ageing in Stator Bar Insulation by Partial Discharge Amplitude Distribution Analysis**. Procedures of the 5th ISH. Braunschweig, Germany: August 1987.

CONTIN, A.; GULSKI, E.; CACCIARI, M.; MONTANARI, G. C. **A Weibull approach to the investigation of partial discharges in aged insulation systems**. Conference record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Montreal, Quebec, Canada: June 1996.

EHSANI, M.; BORSI, H.; GOCKENBACH, E.; MORSHEDIAN, J.; BAKHSHANDEH, G. R.; SHAYEGANI, A. A. **Effect of Aging on Dielectric Behavior of Outdoor Polymeric Insulators**. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. July 2004.

EL-HAG, A. H. **Leakage current characterization for estimating the conditions of non-ceramic insulators' surfaces**. Electric Power System Research, v.77, March 2007a.

EL-HAG, A. H. **Experience with Aging Tests for Testing of Non-Ceramic Insulators**. 4th IEEE-GCC conference. Bahrain: October 2007b.

ENGELBRECHT, C. S.; BOLOGNA, F. F.; VOSLOO W. L. **Discussion on the difference between test station results and failures of in-service insulators**. Eskom International Report No. TRR/E/97/EL225. October 1997.

EPRI. **Application guide for transmission line non-ceramic insulators**. Final Report No. TR -111566. November 1998.

EPRI. **Review for the State of the Art and Application of Polymer Materials/Insulation used in Distribution Class (14-46 kV class) Substation**. November 2003.

FOURMIGUÉ, J. M.; NOEL, M.; RIQUEL, G. **Aging of polymeric housing for HV insulators: comparison between natural and artificial testing**. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1995. Annual Report. October 1995.

GARCIA, R. W. S.; TORRES, M. S.; SILVA, F. R.; GOMES, E.; BADE, S. A.; ARGOLO, J. A.; RESENDE, G. V.; PAIVA, O. L.; MEDEIROS, R. S.; OLIVEIRA, L. A.; ASSAD, L. A. X.; ANTUNES, E. P.; DOS SANTOS, J.; VARRICCHIO, M. T.; OLIVEIRA, H. A. P. **Natural and accelerated aging of composite insulators**. Symposium on Electrical Insulation, 1998. Conference Record of the 1998 IEEE International. Arlington, VA: June 1998

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. **Outdoor Insulators**. United States: Ravi S. Gorur, Inc, 1999. 262p.

HAN, S. W; CHO, H. G. **Thermal mechanical performance test on suspended insulators for transmission line**. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2004. Conference Record of the 2004. September 2004.

HOMMA, H.; TAKAHASHI, T.; TANIGUCHI, T.; IZUMI, K. **Study on surface degradation of polymer insulating materials caused by leakage current**. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Arlington, TX: 1994.

HOULGATE, R. G. **Natural testing of composite insulators at Dungeness insulator testing station**. Non-ceramic outdoor insulation international workshop. Paris: April 1993

IEC 60270. **12 High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements**. 2000.

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

IEC 60815. **Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions**. 1986.

IEC 62217. **Polymer insulators for indoor and outdoor use with a nominal voltage greater than 1000 V – General definitions, test methods and acceptance criteria**. 2005.

IEEE. **IEEE 100 - The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms**. Seventh Edition. 2000.

JIANG, X.; YUAN, J.; ZHANG, Z.; HU, J.; SUN, C. **Study on AC Artificial-Contaminated Flashover Performance of Various Types of Insulators**. IEEE Transactions on Power Delivery, v.22, n.4, October 2007.

KINDERSBERGER, J.; KUHL, M. **Effect of hidrofobicity on insulator performance**. Proceedings of the 6th International Symposium of High Voltage Engineering. New Orleans: August 1989.

LIANG, X. D.; LI, J; XUE, J. Q. **The change of surface leakage current of composite insulators in salt-fog test.** Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications. Manchester: September 1992.

MANGIAVACCHI, C.; RABACH, G. **The Degradation Processes in Highly Electrically Stressed Epoxy Resins by the Analysis of Partial Discharge Amplitude Distributions.** Procedures of the 4th ISH. Athens, Greece: September 1983.

MATSOUKA, R.; NAKASHIMA, M.; USUI, T. **Effects of test parameter on deterioration of polymer insulator housing materials by accelerated aging tests.** High Voltage Engineering Symposium. August 1999.

McGRATH, P. B.; CRUDELE, F. D.; BURNS, C. W. **Accelerated aging of polymeric insulators.** 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2002.

McGRATH, P. B.; KLAPP, D. A.; BURNS, C. W. **Laboratory aging of polymer insulators.** Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003.

McQUARRIE, T. S. **Improved dielectric and brittle fracture resistant core rods for non-ceramic insulators.** Proceedings of the World Congress on Insulator Technologies for the Year 2000 and Beyond. Barcelona: November 1999.

NAITO, K.; NISHIWAKI, S.; MATSUOKA, R.; SHINOKUBO, K. **Investigation Results of Silicone Rubber Insulators Under Wet and Contaminated Conditions.** Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Brisbane, Australia: July 1994.

NATTRASS, D. A. **Partial Discharge Measurement and Interpretation.** IEEE Electrical Insulation Magazine, v.4, n.3, 1988.

NBR 5032. **Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada.** ABNT, 2004

NBR 6936. **Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão.** ABNT, 1992.

NBR 6940. **Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão - Medição de descargas parciais.** ABNT, 1981.

NBR 10621. **Isoladores utilizados em sistemas de alta tensão em corrente alternada - Ensaio de poluição artificial.** ABNT, 2005.

RAVERA, C. N. **Specification for composite insulators**, Eskom Specification NWS 1612, September 1992.

REYNDERS, J. P. **Guide to the choice of outdoor insulators for AC systems under polluted conditions.** Proceedings of National Energy Council Seminar. Pretoria: 1992.

RICHARDS, C.; BENNER, C.; BUTLER, K.; RUSSELL, B. D. **Leakage Current Characteristics Caused by Contaminated Distribution Insulators.** Proceedings of the 31st Annual North American Power Symposium. San Luis Obispo, CA: October 11-12, 1999.

RODURFLEX. **The history of RODURFLEX® – Quite a long story covering more than 3 decades.** Disponível na internet via URL: <http://www.lappinsulator.com/downloadcenter/catalogs.asp>. Arquivo capturado em dezembro de 2005.

SHMUCK F.; TOURREIL C. de. **Brittle fracture of composite insulators: an investigation of their occurrence and failure mechanisms and a risk assessment.** Proceedings of Cigré - 4th Southern African Regional Conference. Cape Town: October 2001.

SORQVIST, T.; GUBANSKI, S. M. **Leakage Current and Flashover of Field-aged Polymeric Insulators.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v.6, n.5, October 1999.

TIAN, Z.; KAWASAKI, H.; HIKITA, M. **Degradation effect and insulation diagnosis of HV polymeric insulating materials under accelerated aging conditions.** Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating. Japan: September 1998.

TOURREIL, C. de; PARGAMIN, L.; THEVENET, G.; PRAT, S.; SIAMPIRINGUE, N. **Brittle fracture of composite insulators: the new explanation and a field case study.** Proceeding of ISH 2001. Paper 5-25. India: August 2001.

VENKATARAMAN, S.; GORUR, R. S. **Prediction of Flashover Voltage of Non-ceramic Insulators Under Contaminated Conditions.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v.13, n.4, August 2006

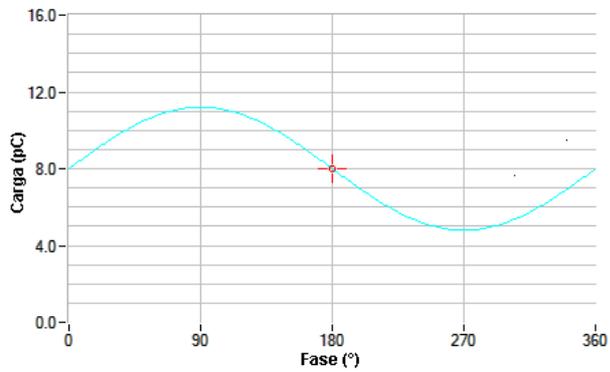
VERMA, M. P.; NIKLASCH, H.; HEISE, W.; LUXA, G. F.; LIPKEN, H.; SCHREIBER, H. **The criterion for the pollution flashover and its application to insulation dimensioning and control.** Cigré Report 33-09. 1978.

VOSLOO, W. L.; MACEY, R. E.; TOURREIL, C. de. **The Practical Guide to High Voltage Insulators.** South Africa: Crown Publications cc, 2006. 220p.

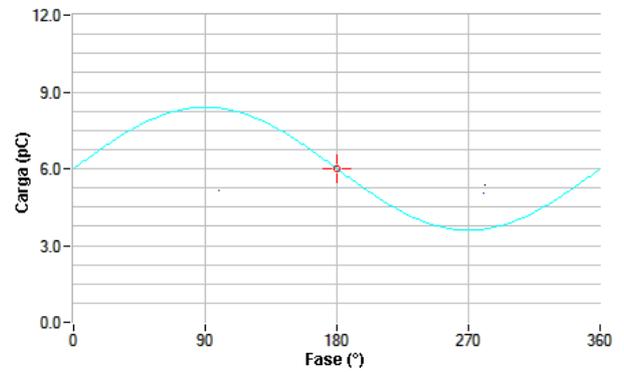
XU, G.; MCGRATH, P. B.; BURNS, C. W. **Surface Degradation of Polymer Insulators under Accelerated Aging in Weather-Ometer.** Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Montreal, Quebec, Canada: June 1996.

ANEXO A

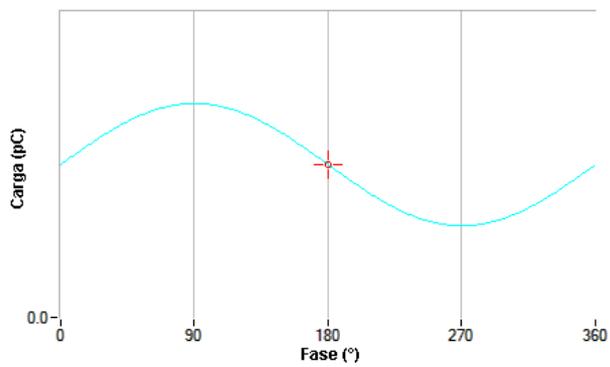
Sinais de Descargas Parciais das Amostras Novas



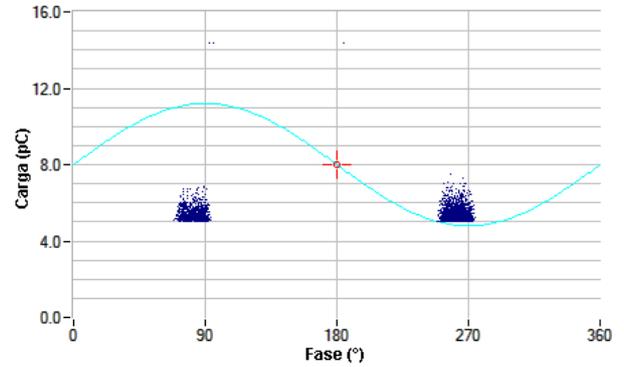
(Isolador de Suspensão #1)



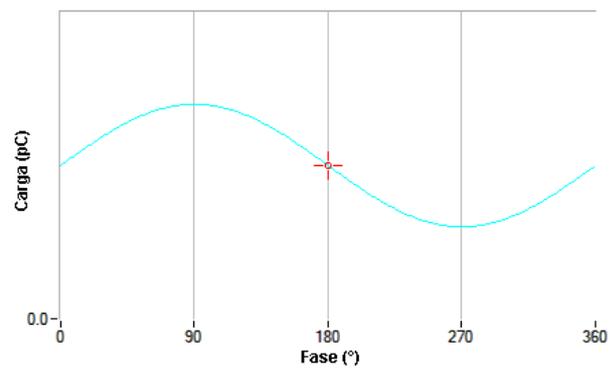
(Isolador de Suspensão #2)



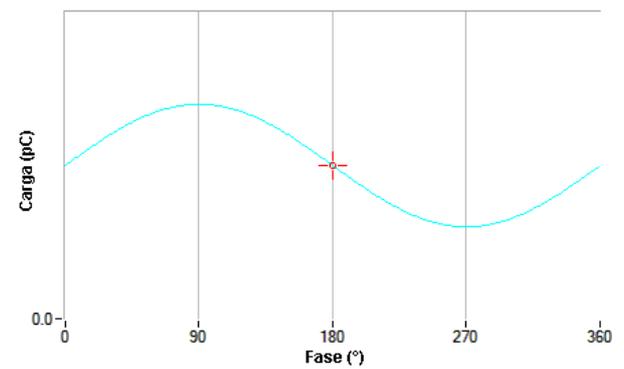
(Isolador de Suspensão #3)



(Isolador de Suspensão #4)

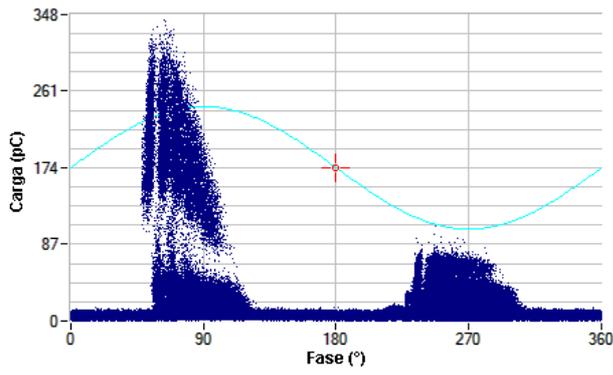


(Isolador de Suspensão #5)

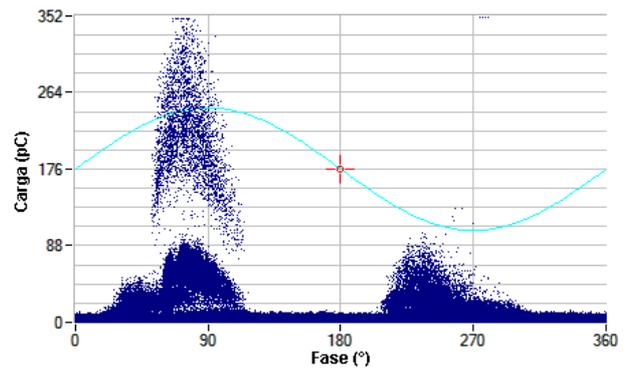


(Isolador de Suspensão #6)

Figura A.1. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de isoladores de suspensão.

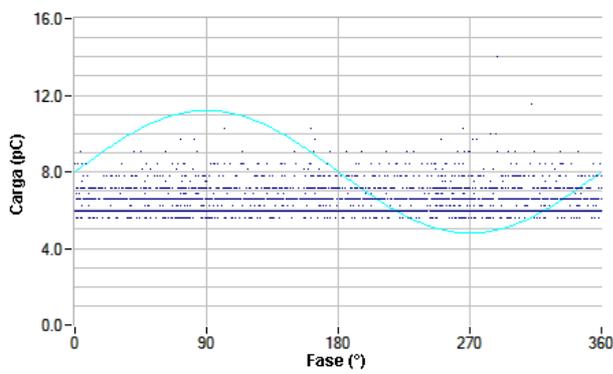


(Isolador de Pino #1)

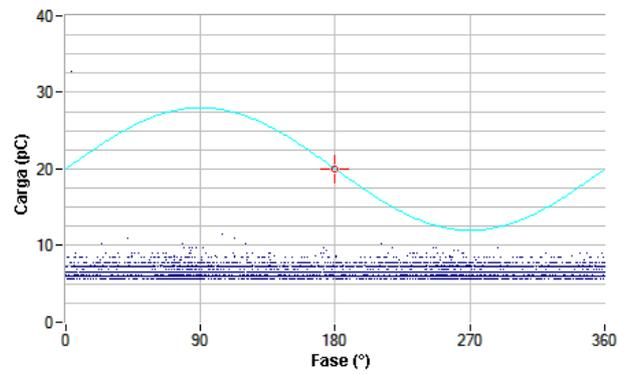


(Isolador de Pino #2)

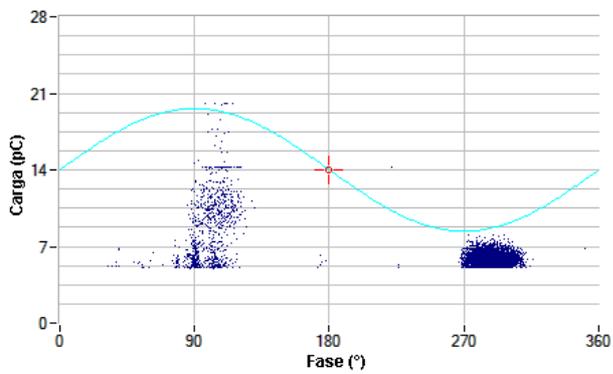
Figura A.2. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de isoladores de pino.



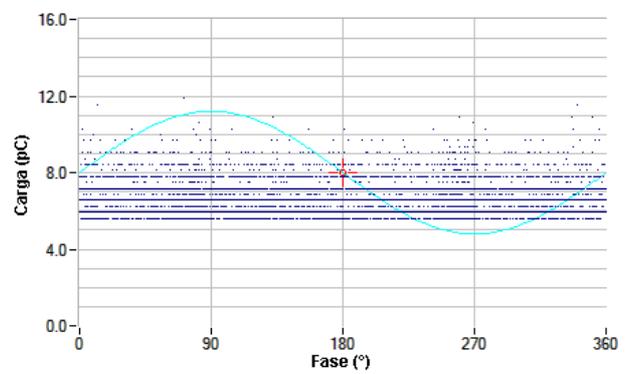
(Espaçador #1)



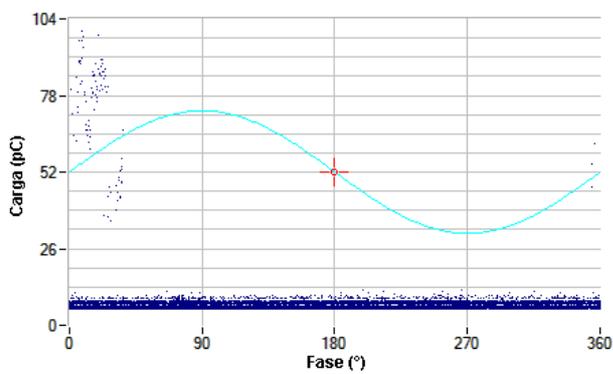
(Espaçador #2)



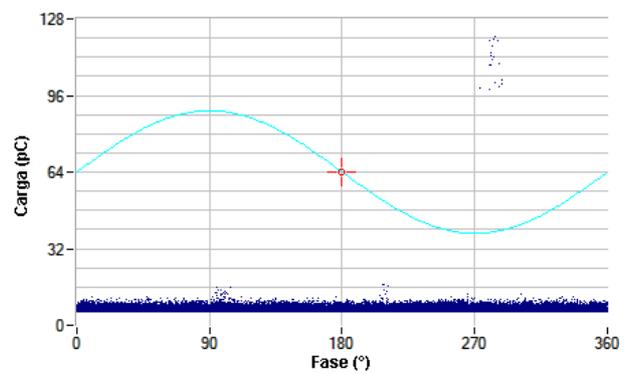
(Espaçador #3)



(Espaçador #4)

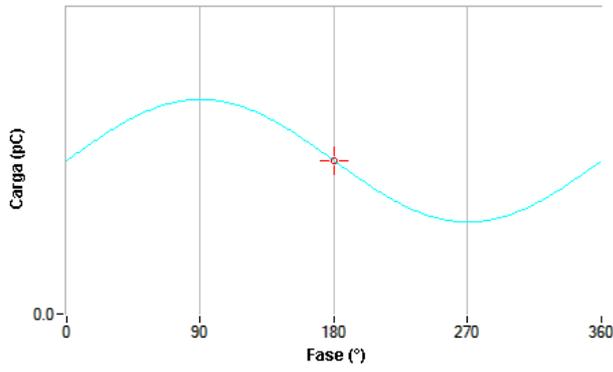


(Espaçador #5)

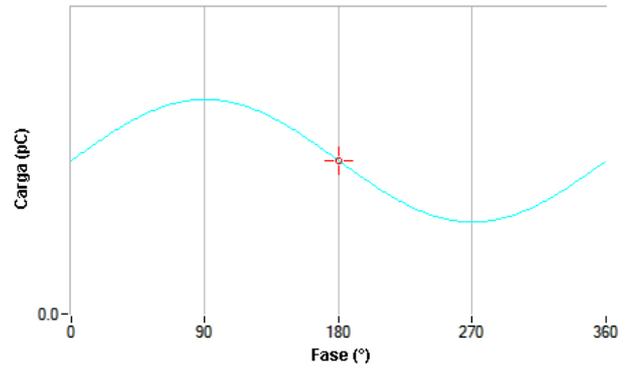


(Espaçador #6)

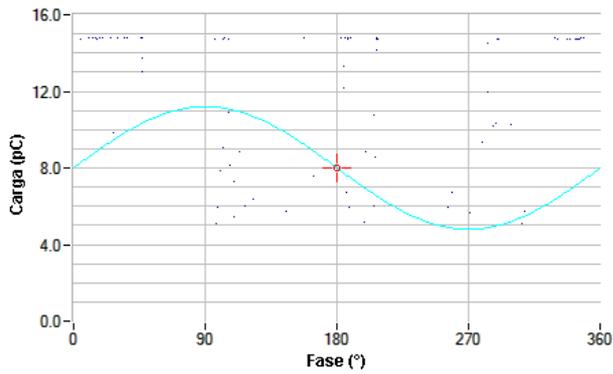
Figura A.3. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de espaçadores.



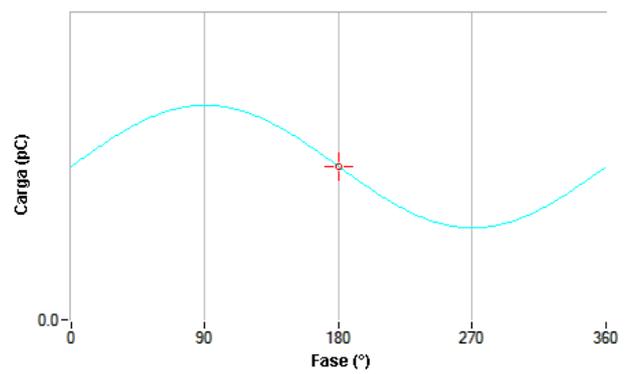
(Laço Plástico Lateral #1)



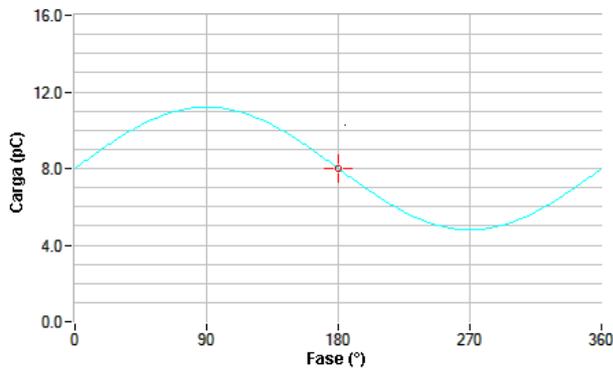
(Laço Plástico Lateral #2)



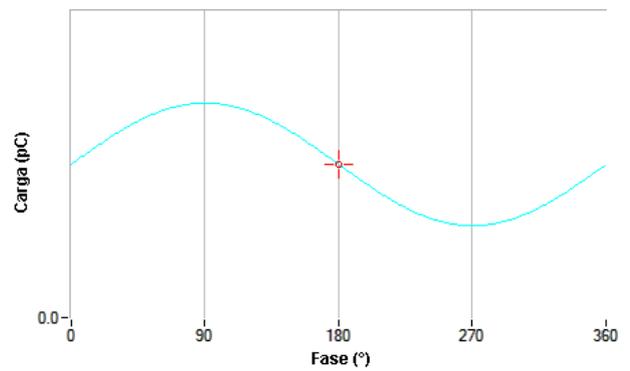
(Laço Plástico Lateral #3)



(Laço Plástico Lateral #3)

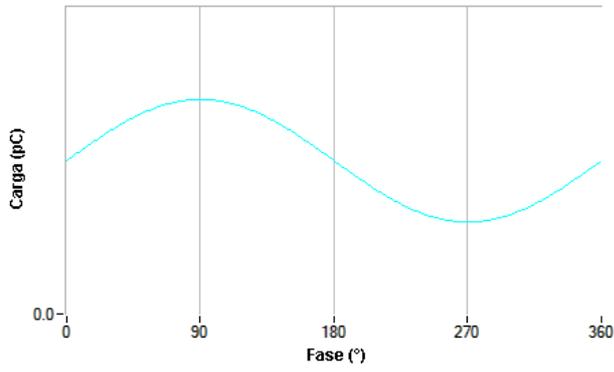


(Laço Plástico Lateral #5)

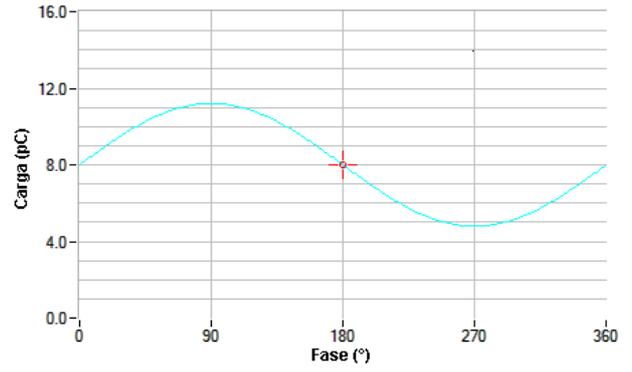


(Laço Plástico Lateral #6)

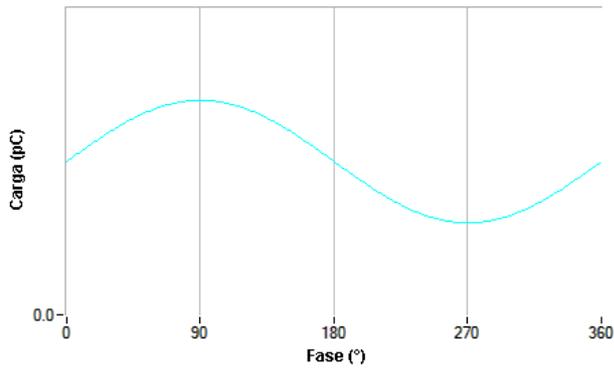
Figura A.4. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de laços plásticos laterais.



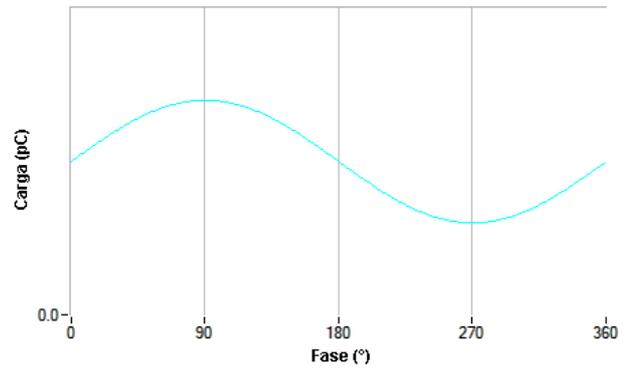
(Laço Plástico de Topo #1)



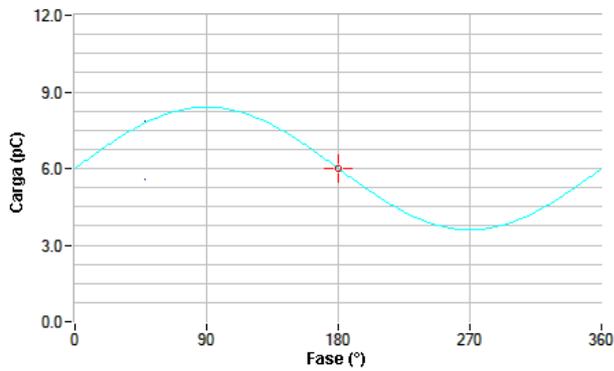
(Laço Plástico de Topo #2)



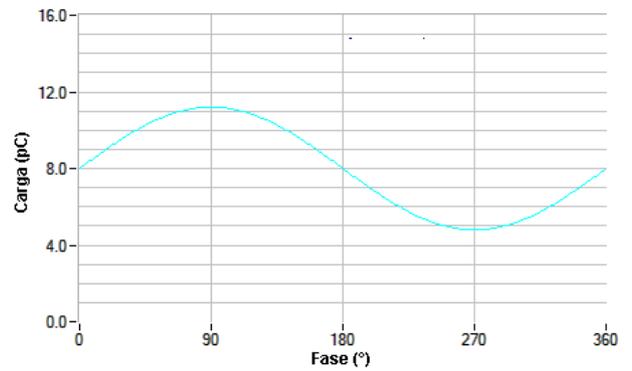
(Laço Plástico de Topo #3)



(Laço Plástico de Topo #3)



(Laço Plástico de Topo #5)



(Laço Plástico de Topo #6)

Figura A.5. Sinais de descargas parciais nas amostras t_0 de laços plásticos de topo.

ANEXO B

Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas em *Weather-Ometer*

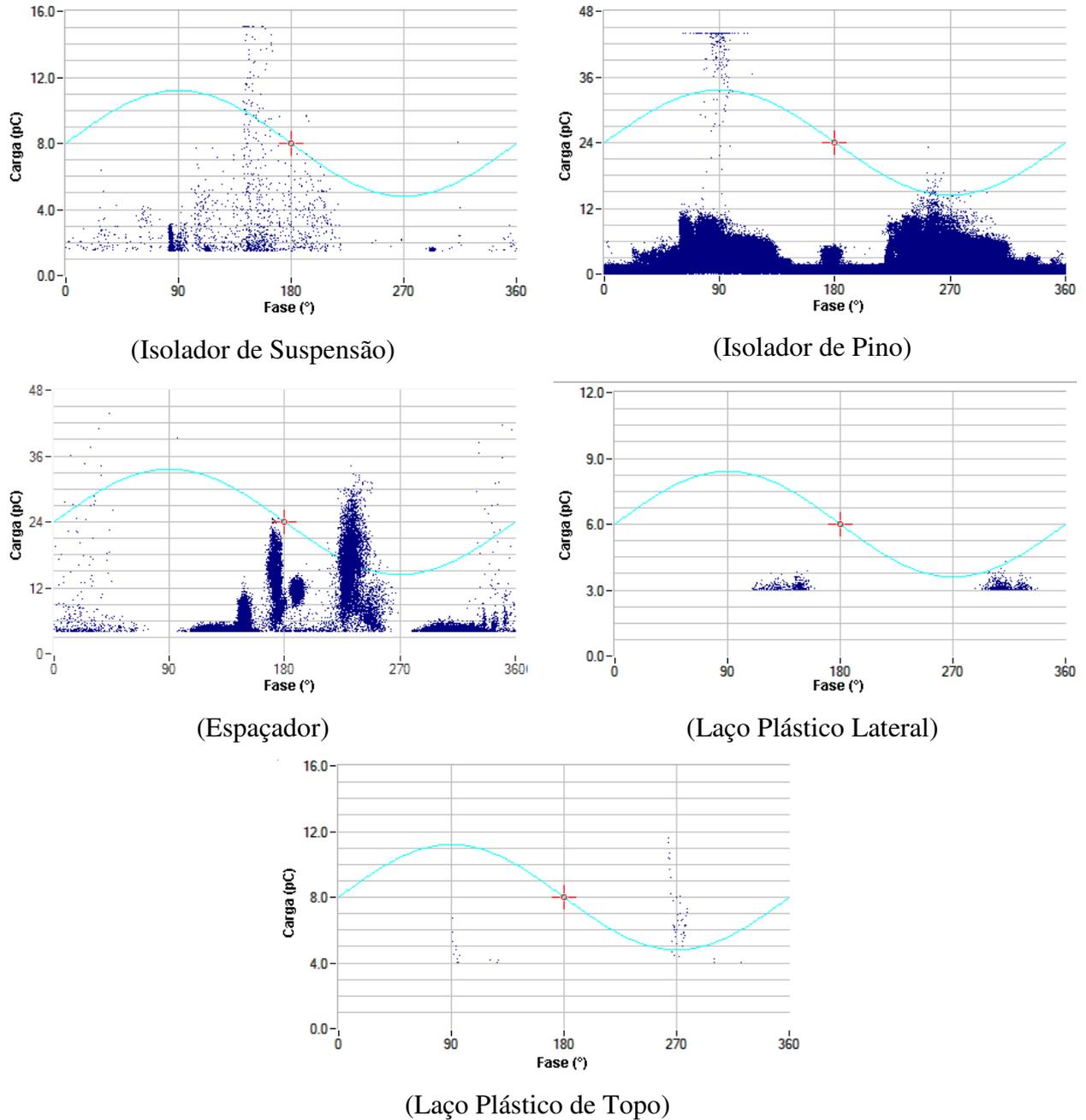
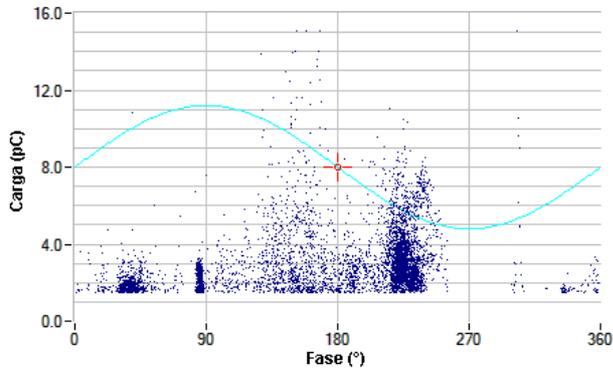


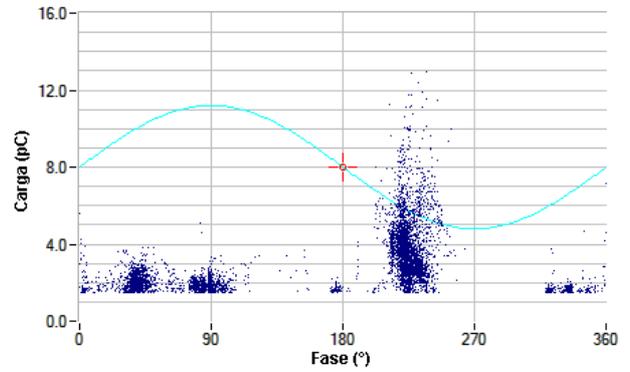
Figura B.1. Sinais de descargas parciais nas amostras WO.

ANEXO C

Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas por Imersão em Água

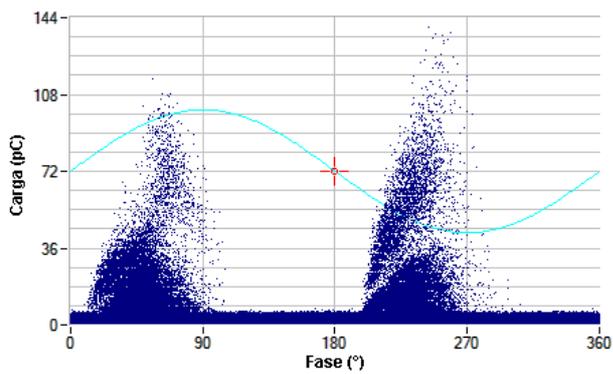


(Isolador de Suspensão #1)

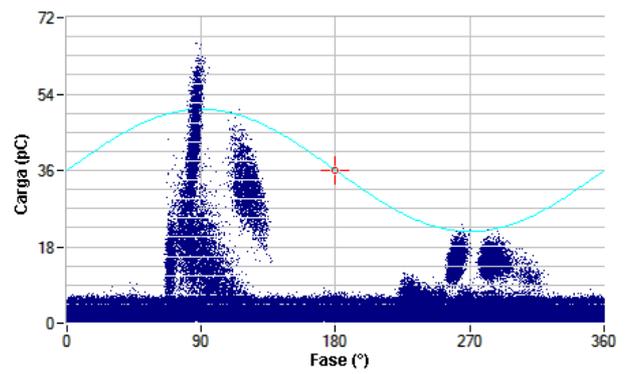


(Isolador de Suspensão #2)

Figura C.1. Sinais de descargas parciais nas amostras H de isoladores de suspensão.

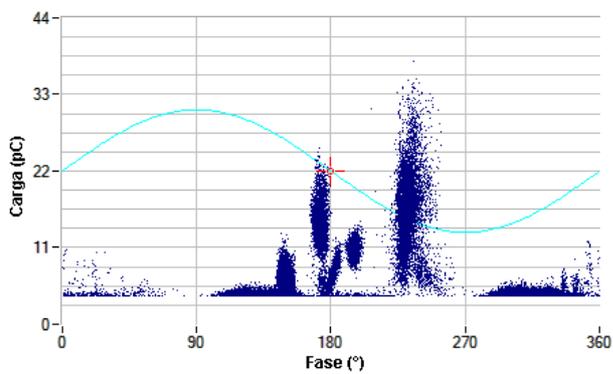


(Isolador de Pino #1)

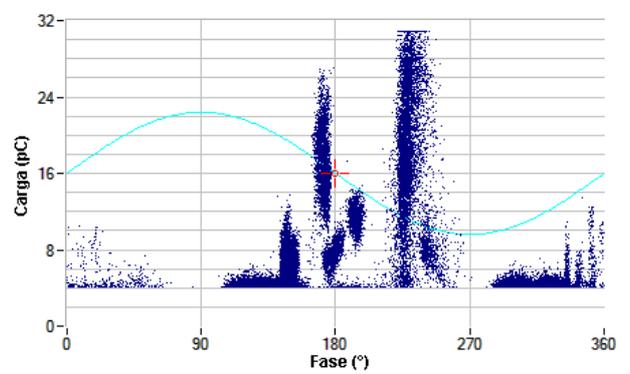


(Isolador de Pino #2)

Figura C.2. Sinais de descargas parciais nas amostras H de isoladores de pino.

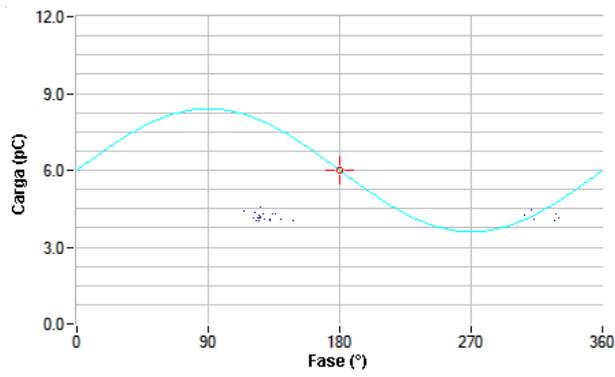


(Espaçador #1)

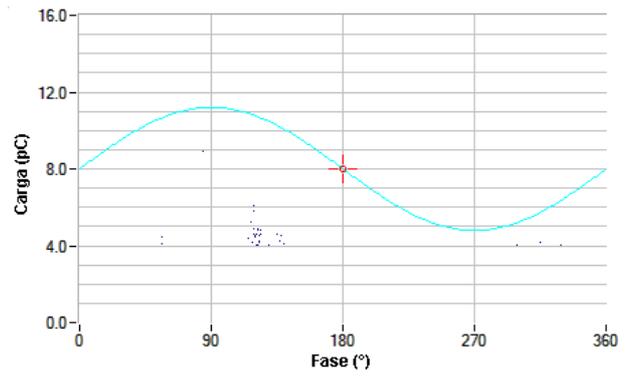


(Espaçador #2)

Figura C.3. Sinais de descargas parciais nas amostras H de espaçadores.

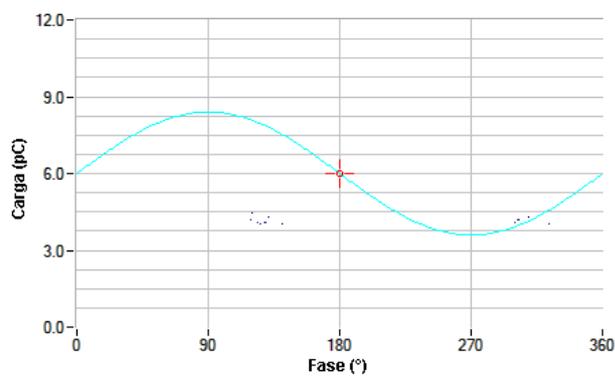


(Laço Plástico Lateral #1)

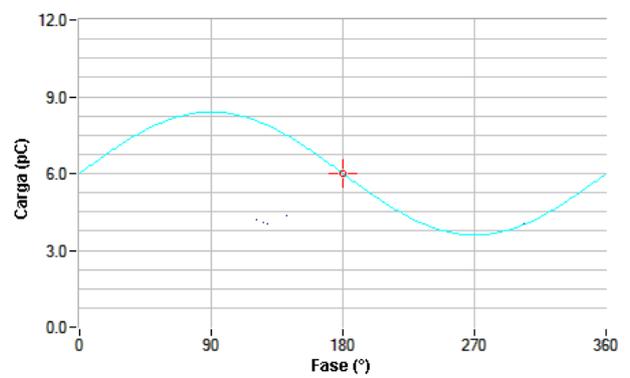


(Laço Plástico Lateral #2)

Figura C.4. Sinais de descargas parciais nas amostras H de laços plásticos laterais.



(Laço Plástico de Topo #1)



(Laço Plástico de Topo #2)

Figura C.5. Sinais de descargas parciais nas amostras H de laços plásticos de topo.

ANEXO D

Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas em Forno a 120°C

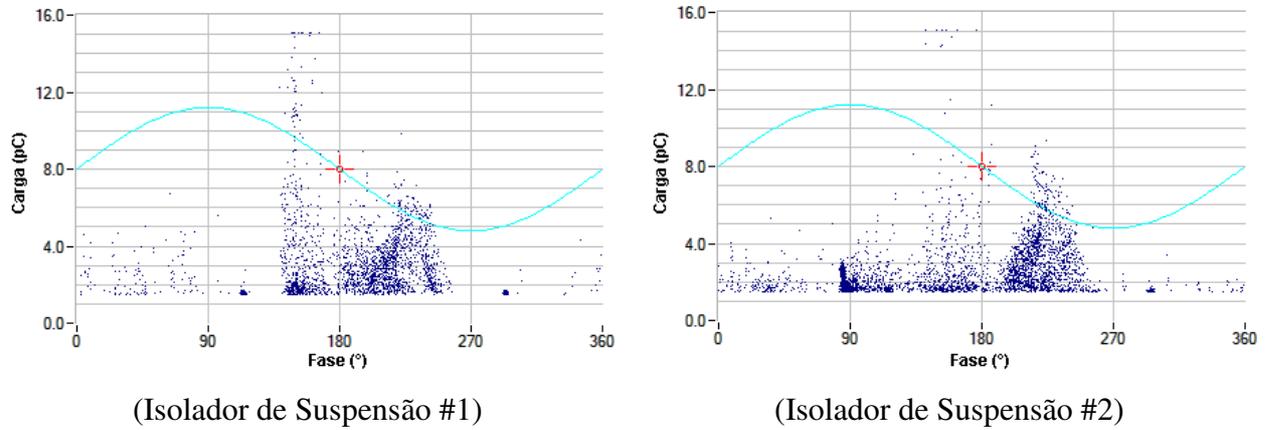


Figura D.1. Sinais de descargas parciais nas amostras T de isoladores de suspensão.

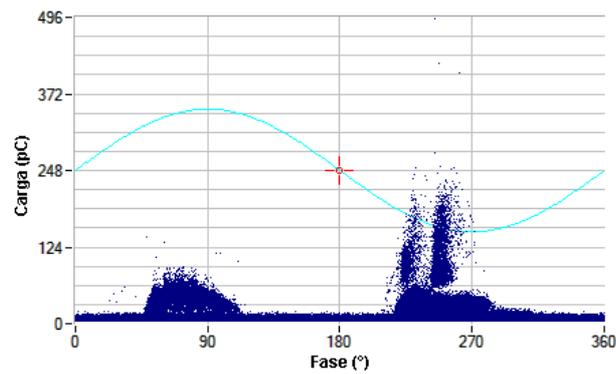


Figura D.2. Sinal de descargas parciais na amostras T de isolador de pino.

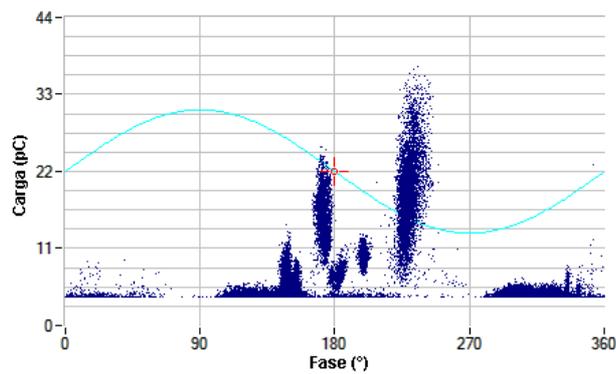
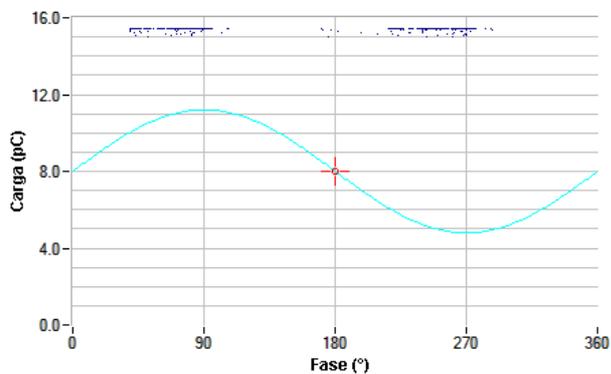


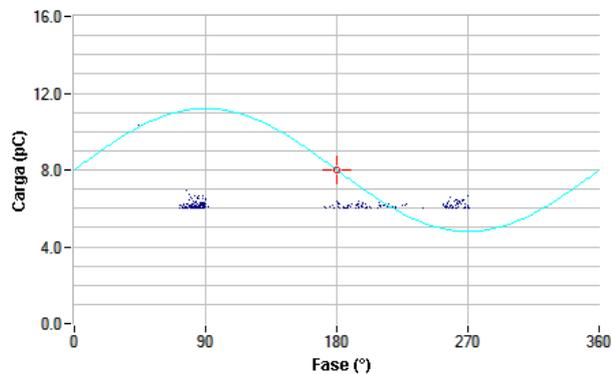
Figura D.3. Sinal de descargas parciais na amostras T de espaçador.

ANEXO E

Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas por Tensão Elétrica

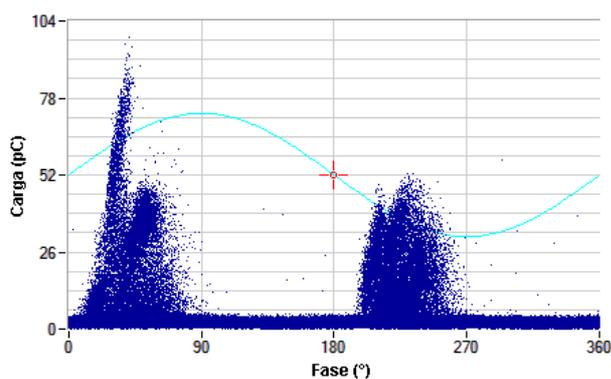


(Isolador de Suspensão #1)

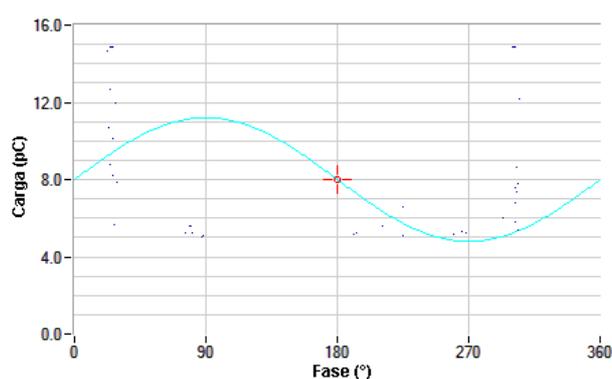


(Isolador de Suspensão #2)

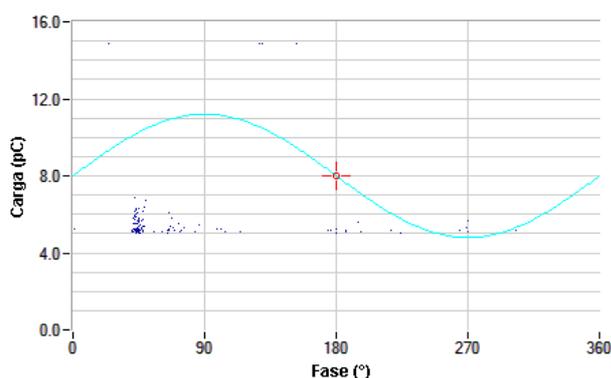
Figura E.1. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de isoladores de suspensão.



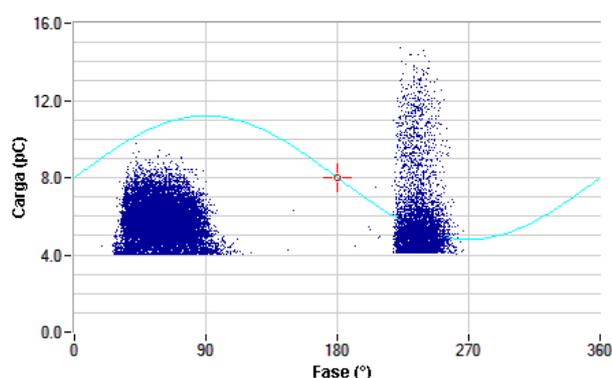
(Isolador de Pino #1)



(Isolador de Pino #2)

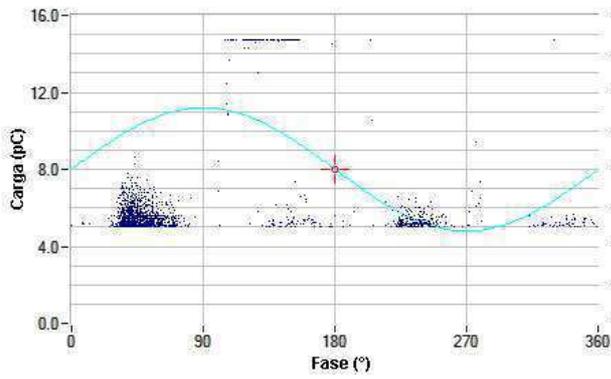


(Isolador de Pino #3)

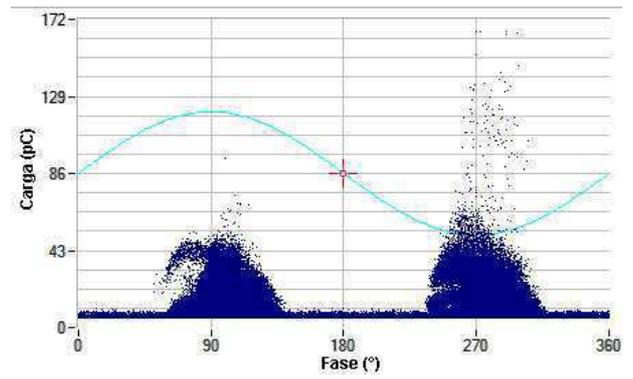


(Isolador de Pino #3)

Figura E.2. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de isoladores de pino.

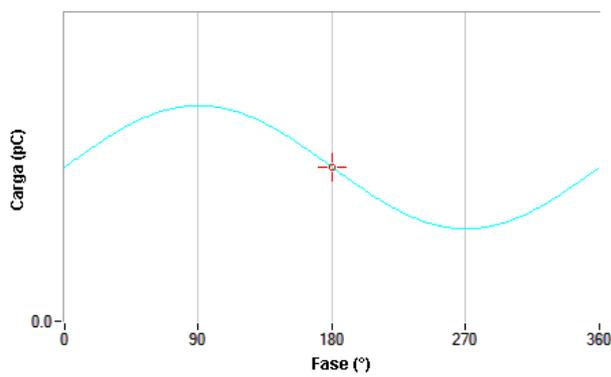


(Espaçador #1)

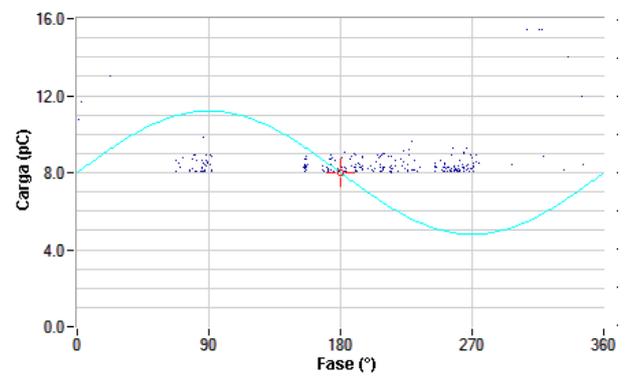


(Espaçador #2)

Figura E.3. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de espaçadores.

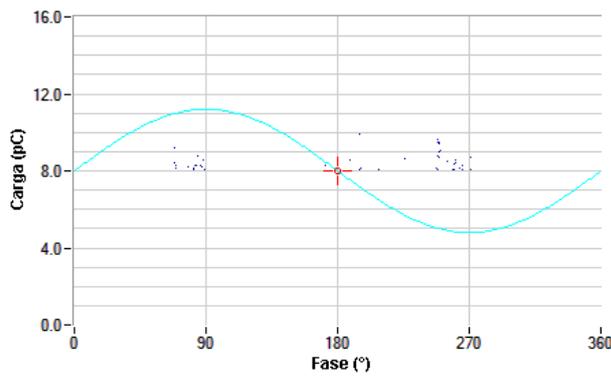


(Laço Plástico Lateral #1)

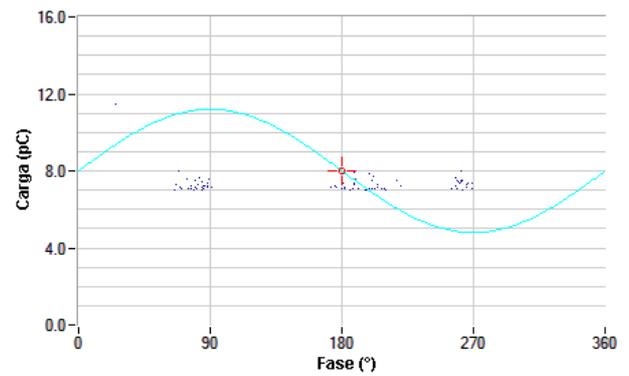


(Laço Plástico Lateral #2)

Figura E.4. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de laços plásticos laterais.



(Laço Plástico de Topo #1)

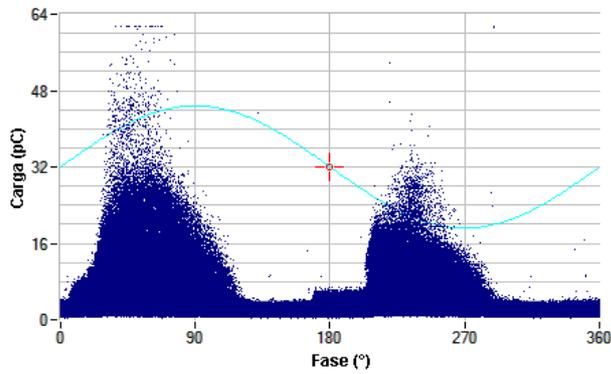


(Laço Plástico de Topo #2)

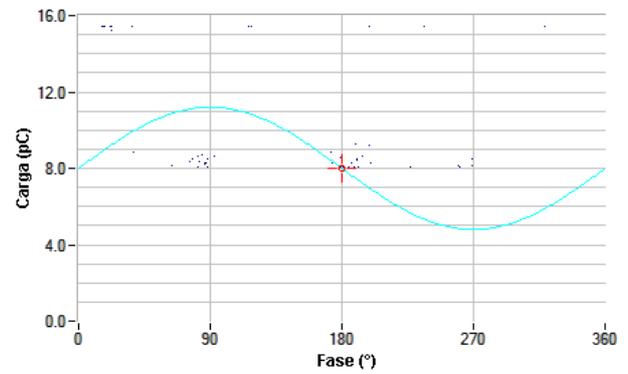
Figura E.5. Sinais de descargas parciais nas amostras TE de laços plásticos de topo.

ANEXO F

Sinais de Descargas Parciais das Amostras Envelhecidas por Tensão Elétrica e Névoa Salina

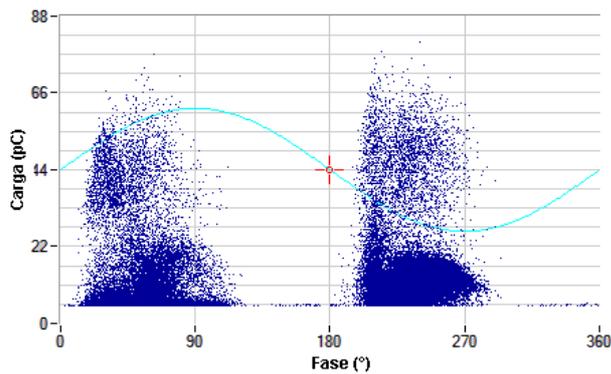


(Isolador de Suspensão #1)

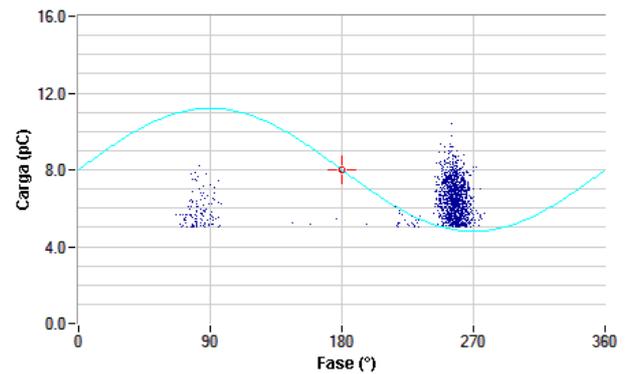


(Isolador de Suspensão #2)

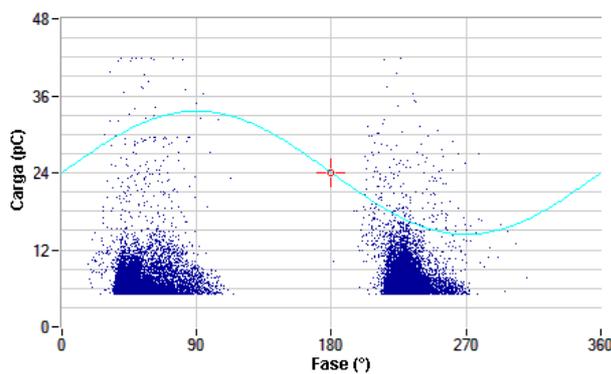
Figura F.1. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de isoladores de suspensão.



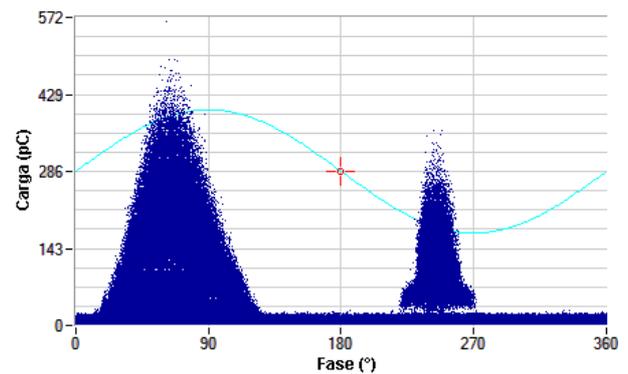
(Isolador de Pino #1)



(Isolador de Pino #2)

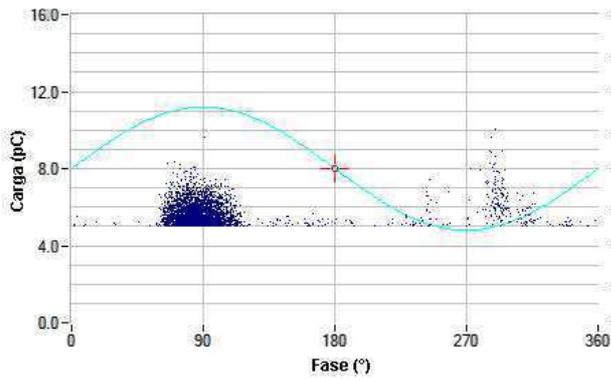


(Isolador de Pino #3)

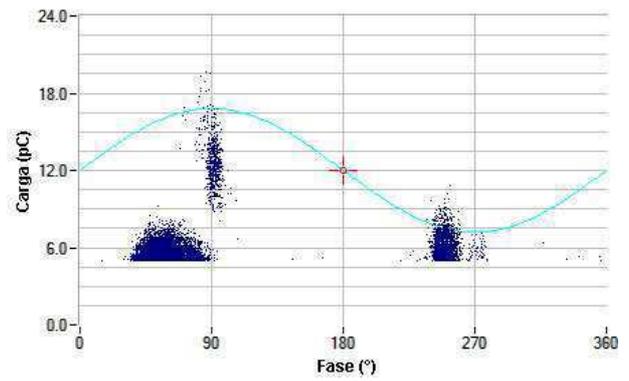


(Isolador de Pino #4)

Figura F.2. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de isoladores de pino.

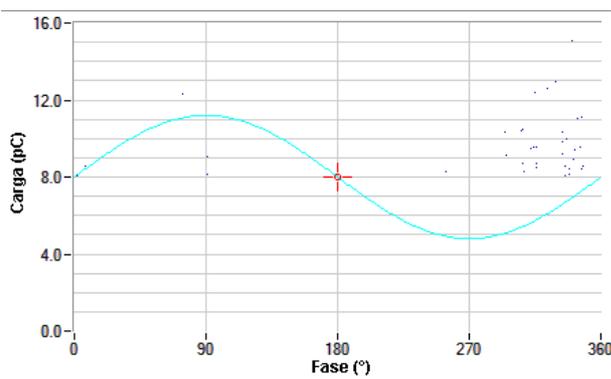


(Espaçador #1)

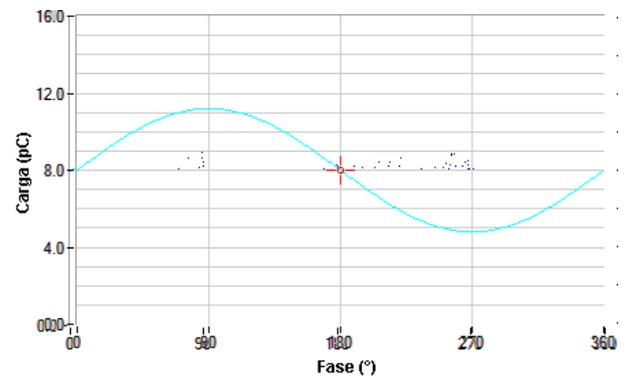


(Espaçador #2)

Figura F.3. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de espaçadores.

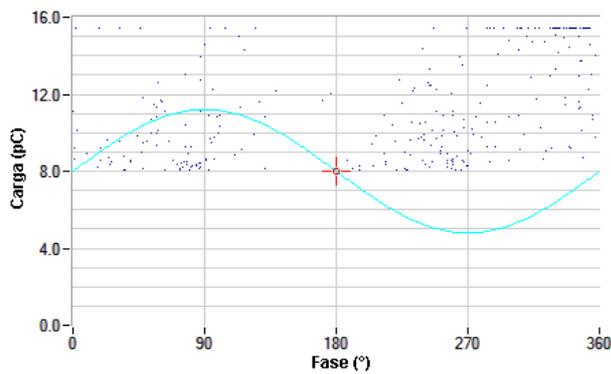


(Laço Plástico Lateral #1)

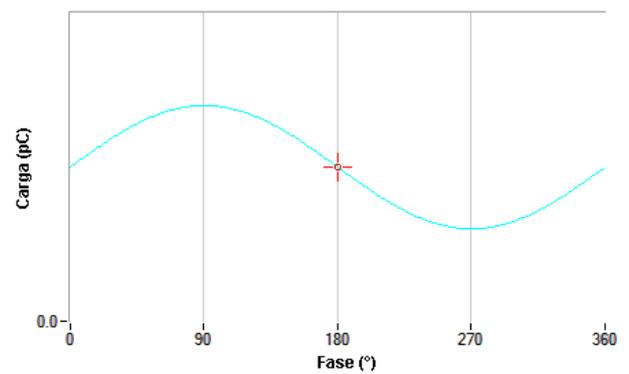


(Laço Plástico Lateral #2)

Figura F.4. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de laços plásticos laterais.



(Laço Plástico de Topo #1)



(Laço Plástico de Topo #2)

Figura F.5. Sinais de descargas parciais nas amostras TS de laços plásticos de topo.