

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIAGNÓSTICO DE FALHAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS  
EM ISOLADORES COMPÓSITOS DE CLASSE DE TENSÃO  
DE 69KV ATRAVÉS DE RADIOGRAFIA  
COMPUTADORIZADA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE  
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE  
POR

PHILLIP LUIZ DE MENDONÇA

Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara

RECIFE, JANEIRO / 2013

Catálogo na fonte

Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

M539d      Mendonça, Phillip Luiz de.

Diagnóstico de falhas elétricas e mecânicas em Isoladores Compósitos de classe de tensão de 69KV através de radiografia computadorizada / Phillip Luiz de Mendonça – Recife: O Autor, 2013.

92f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Isoladores de Compósitos. 3. Radiografia Computadorizada. 4. Fratura Frágil sob Tensão. 5. Disrupção Elétrica Interna. 6. Processamento de radiografia Digital. I. Shinohara, Armando Hideki (Orientador) II. Título.

621 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2013 / 302

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA  
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

*Phillip Luiz de Mendonça*

**“DIAGNÓSTICO DE FALHAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS EM  
ISOLADORES COMPÓSITOS DE CLASSE DE TENSÃO DE 69KV ATRAVÉS DE  
RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO

“DIAGNÓSTICO DE FALHAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS EM ISOLADORES COMPÓSITOS  
DE CLASSE DE TENSÃO DE 69 KV ATRAVÉS DE RADIOGRAFIA  
COMPUTADORIZADA”

PHILLIP LUIZ DE MENDONÇA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE  
EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

---

Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

---

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO  
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA (UFPE/PPGEM)

---

Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA (UFPE/PPGEM)

---

Prof. Dr. CARLOS KENICHI SUZUKI (UNICAMP/FEM)

---

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, em particular a minha mãe, minha eterna mestre, pelo crédito e incentivo depositado ao longo de toda minha vida.

À minha esposa pelo companheirismo e apoio incondicional, principalmente nas horas mais difíceis.

À minha filha que pelo simples fato de existir veio abrilhantar cada momento da minha vida, tornando este sempre infinito.

Ao professor Armando Hideki Shinohara pelo apoio, companheirismo, instrução e por ter me dado à oportunidade de conhecer um excelente ser humano, como ele é.

À companhia Energética de Pernambuco – Celpe, pela minha disponibilização para assistir às aulas ao longo do curso, sacrificando assim algumas atividades desta instituição.

À Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

Aos amigos do programa de pós-graduação em engenharia mecânica, em especial ao Alexandre Douglas Araújo de Moura pela força, incentivo e solidariedade na condução das diversas atividades no decorrer do curso.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu atingisse este patamar tão importante na minha vida acadêmico-profissional.

---

“A IMAGINAÇÃO É MAIS IMPORTANTE QUE O CONHECIMENTO.  
CONHECIMENTO AUXILIA POR FORA, MAS SÓ O AMOR SOCORRE POR DENTRO.  
CONHECIMENTO VEM, MAS A SABEDORIA TARDA.” Albert Einstein.

---

## RESUMO

O Isolador de compósito de classe de tensão de 69kV é um dos itens de maior utilização nas linhas de subtransmissão e distribuição de energia elétrica. Na Celpe, como em outras concessionárias de distribuição do Brasil e do mundo, há algum tempo, tem se intensificado o uso deste tipo de material. O conhecimento mínimo acerca desta tecnologia tem exigido investimentos interessantes na sua condição de operação ou até mesmo na sua forma de falhar, pois consequências de proporções relevantes podem ocorrer quando uma falha vem a surgir, principalmente, devido à parcela variável.

Em termos de sua importância para pesquisa, sabe-se que numa nova construção de linhas de subtransmissão ou de distribuição, o seu impacto no custo é de no máximo 5%, mas quando estas entram em operação, os isoladores ficam responsáveis por mais de 70% do custo de manutenção. Portanto, são dispositivos extensivamente investigados em todo mundo. Dentre as falhas mais importantes neste componente, destacam-se as elétricas e as mecânicas. Saber as causas que levam a estas falhas é de grande interesse científico e tecnológico.

Neste trabalho de dissertação de mestrado são apresentados resultados de uma pesquisa que objetivou usar uma nova metodologia de monitoramento e diagnóstico da integridade de isoladores de compósito de classe de tensão de 69kV. Trata-se da técnica de radiografia digital de alta resolução denominada de Radiografia Computadorizado – RC. Dos casos avaliados, foi dado ênfase àqueles que geraram maior repercussão ao sistema elétrico, como o caso da “Fratura Frágil” e da “Disrupção Dielétrica Interna”. Isoladores de 69kV que sofreram tais falhas foram analisados com a técnica de RC no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos do DEMEC/UFPE. As imagens radiográficas digitais foram obtidas para os dois casos de falhas, analisadas e interpretadas. Ainda para comprovação da eficácia da técnica procedeu-se também a avaliação em um isolador com integridade preservada e ainda em operação.

*Palavras chaves: isoladores de compósito, radiografia computadorizada, fratura frágil sob tensão, disrupção elétrica interna, processamento de radiografia digital.*

---

## **ABSTRACT**

The composite insulator voltage class of 69kV is one of the most used items in subtransmission lines and electricity distribution. At Celpe, as in other distribution utilities in Brazil and the world, for some time, has intensified the use of this type of material. The minimum knowledge about this technology have demanded interesting investments in its operating condition or even on its way to fail because of relevant proportions consequences can occur when a fault has to emerge, mainly due to the variable portion.

In terms of its importance to research, it is known that a new construction of transmission lines or distribution, its impact on cost is at most 5%, but when they come into operation, isolators are responsible for over 70% maintenance cost. Therefore, they are devices extensively investigated worldwide. Among the most important flaws in insulators, there are the electrical and mechanical. Learn the causes of these failures is of great scientific and technological interest.

In this dissertation work are presented results of a research aimed to use a new methodology for diagnosis and monitoring the integrity of composite insulators for voltage class of 69kV. This is the technique of high-resolution digital radiography called Computerized Radiography - CR. Of the cases evaluated, emphasis was given to those who generated greater impact to the electrical system, as the case of "brittle Fracture" and "Internal Electric Breakdown". Insulators of 69KV which suffered such failures were analyzed with the technique of RC in a Laboratory of Nondestructive Testing of DEMEC / UFPE. The digital radiographic images were obtained for the two cases of failures and analyzed and interpreted. Even for proving the efficacy of the technique was also undertaken to evaluate in an insulator with integrity preserved and still in operation.

*Keywords: composite insulators, computerized radiography, brittle fracture under stress, internal electrical disruption, digital radiography processing.*

---

## SUMÁRIO

|          |                                                             |           |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                      | <b>11</b> |
| 1.1      | JUSTIFICATIVA.....                                          | 12        |
| 1.2      | OBJETIVOS DO TRABALHO.....                                  | 12        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                          | <b>13</b> |
| 2.1      | PRINCIPIO DA RADIOGRAFIA .....                              | 13        |
| 2.1.1    | <i>O fóton.....</i>                                         | <i>13</i> |
| 2.1.2    | <i>O Efeito Fotoelétrico.....</i>                           | <i>13</i> |
| 2.1.3    | <i>O Efeito Compton.....</i>                                | <i>15</i> |
| 2.1.4    | <i>Produção de Raios-X.....</i>                             | <i>15</i> |
| 2.1.5    | <i>Intensidade de um feixe de Raios-X.....</i>              | <i>17</i> |
| 2.1.6    | <i>Atenuação .....</i>                                      | <i>17</i> |
| 2.2      | RADIOGRAFIA INDUSTRIAL.....                                 | 19        |
| 2.2.1    | <i>Princípio de Inspeção por Meio da Radiografia.....</i>   | <i>20</i> |
| 2.2.2    | <i>Parâmetros Para Obtenção de Radiografias .....</i>       | <i>21</i> |
|          | 2.2.2.1 Energia do Feixe.....                               | 21        |
|          | 2.2.2.2 Contraste da Imagem .....                           | 21        |
|          | 2.2.2.3 Resolução Espacial.....                             | 22        |
|          | 2.2.2.4 Dimensão do Foco da Fonte de Raios-X.....           | 23        |
|          | 2.2.2.5 Dispositivos de Carga Acoplada.....                 | 24        |
| 2.3      | POLÍMEROS.....                                              | 24        |
| 2.3.1    | <i>Histórico e Evolução .....</i>                           | <i>24</i> |
| 2.3.2    | <i>Introdução.....</i>                                      | <i>25</i> |
| 2.3.3    | <i>Fissuramento em Materiais Poliméricos .....</i>          | <i>28</i> |
| 2.4      | ISOLADORES COMPÓSITOS.....                                  | 31        |
| 2.4.1    | <i>Introdução.....</i>                                      | <i>31</i> |
| 2.4.2    | <i>Breve Histórico .....</i>                                | <i>31</i> |
| 2.4.3    | <i>Teoria Básica.....</i>                                   | <i>32</i> |
| 2.4.4    | <i>Problemas Ambientais.....</i>                            | <i>33</i> |
| 2.4.5    | <i>Detalhe Construtivo.....</i>                             | <i>33</i> |
|          | 2.4.5.1 O Núcleo.....                                       | 33        |
|          | 2.4.5.2 O Revestimento .....                                | 34        |
|          | 2.4.5.3 As Ferragens .....                                  | 35        |
| 2.4.6    | <i>Algumas Técnicas de Inspeção.....</i>                    | <i>35</i> |
|          | 2.4.6.1 Inspeção Termográfica .....                         | 35        |
|          | 2.4.6.2 Inspeção por Detecção de Radiação Ultravioleta..... | 36        |
|          | 2.4.6.3 Inspeção por Detecção de Ultrassom.....             | 39        |

---

|           |                                                                |           |
|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.7     | <i>Distribuição do Campo Elétrico</i> .....                    | 40        |
| 2.4.7.1   | Anel de Equalização .....                                      | 41        |
| 2.4.7.2   | Projeto e Montagem do Isolador.....                            | 43        |
| 2.4.7.3   | Perfil do Revestimento Polimérico .....                        | 43        |
| 2.5       | PROCESSO DE FALHA EM ISOLADORES COMPÓSITOS .....               | 44        |
| 2.5.1     | <i>Por Disrupção Dielétrica Interna</i> .....                  | 44        |
| 2.5.1.1   | Descargas Parciais.....                                        | 45        |
| 2.5.1.1.1 | Princípio da Detecção de Descargas Parciais.....               | 46        |
| 2.5.1.1.2 | Detecção de Descargas Parciais por métodos elétricos.....      | 46        |
| 2.5.1.1.3 | Condições para Ocorrência de Descargas Parciais Internas ..... | 48        |
| 2.5.1.1.4 | Influência do Campo Elétrico Total .....                       | 48        |
| 2.5.1.1.5 | Geração de elétrons iniciais .....                             | 50        |
| 2.5.1.2   | Trilhamento Elétrico.....                                      | 50        |
| 2.5.1.3   | Reações dos Polímeros aos Campos Elétricos.....                | 51        |
| 2.5.2     | <i>Por Fratura Frágil</i> .....                                | 54        |
| 2.5.2.1   | O processo de Fratura Frágil .....                             | 55        |
| 2.5.2.1.1 | O cenário do ácido nítrico.....                                | 56        |
| 2.5.2.1.2 | O cenário do ácido carboxílico.....                            | 56        |
| 2.5.2.2   | A Fratura Frágil em campo .....                                | 57        |
| 2.5.2.2.1 | Detecção da presença de ácido nítrico.....                     | 57        |
| 2.5.2.2.2 | Detecção da presença de ácido carboxílico.....                 | 58        |
| 2.5.2.3   | Análise da Fratura Frágil em campo .....                       | 60        |
| <b>3</b>  | <b>MATERIAIS E METODOLOGIA DE INSPEÇÃO</b> .....               | <b>62</b> |
| 3.1       | MATERIAL.....                                                  | 62        |
| 3.2       | METODOLOGIA DE INSPEÇÃO .....                                  | 66        |
| 3.2.1     | <i>Princípio de Funcionamento do Imaging Plate</i> .....       | 68        |
| <b>4</b>  | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                            | <b>71</b> |
| 4.1       | FALHA POR DISRUPÇÃO DIELÉTRICA INTERNA.....                    | 71        |
| 4.2       | ANÁLISE EM ISOLADOR “BOM” PARA CONSTATAÇÃO DE DEFEITOS.....    | 78        |
| 4.3       | FALHA POR FRATURA FRÁGIL .....                                 | 80        |
| <b>5</b>  | <b>CONCLUSÕES</b> .....                                        | <b>83</b> |
|           | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                          | 90        |
|           | TRABALHOS PUBLICADOS.....                                      | 91        |
|           | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                | 93        |

---

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Efeito fotoelétrico. Com o eletrodo 1 iluminado com luz monocromática de intensidade constante, uma corrente $I$ é medida como uma função da diferença de potencial $V_1$ .....                                                                                               | 14 |
| Figura 2 - Gráfico da corrente $i$ em função da voltagem $V$ para o efeito fotoelétrico. ....                                                                                                                                                                                            | 14 |
| Figura 3 - Tubo de Raios-X. Ao se aquecer o filamento do cátodo, pela passagem de uma corrente, elétrons são emitidos e acelerados em direção ao ânodo(alvo) pela diferença de potencial $V$ . Raios-X são emitidos do alvo quando os elétrons são acelerados ao atingi-lo.....          | 15 |
| Figura 4 - Características dos Raios-X: (a) Espectro contínuo. (b) Intensidade de Raios-X produzidos quando elétrons de 30 keV incidem em um alvo de Mo em função do comprimento de onda. ....                                                                                           | 16 |
| Figura 5 - O processo de bremsstrahlung responsável pela produção do espectro contínuo de Raios-X. ....                                                                                                                                                                                  | 17 |
| Figura 6 - Feixe de Raios-X com seção transversal $A$ atingindo um material de espessura $x$ . ....                                                                                                                                                                                      | 18 |
| Figura 7 - Coeficiente de atenuação de massa, $\mu/\rho$ , e o coeficiente de absorção de massa-energia, $\mu_{en}/\rho$ em função da energia do fóton para o ar e para o polietileno puro.....                                                                                          | 19 |
| Figura 8 - Representação de um ensaio para radiografia com filme.....                                                                                                                                                                                                                    | 20 |
| Figura 9 - Indicador de Qualidade de Imagens (IQI). ....                                                                                                                                                                                                                                 | 22 |
| Figura 10 - Representação do efeito penumbra na radiografia.....                                                                                                                                                                                                                         | 23 |
| Figura 11 - Representação esquemática mostrando o entrelaçamento das cadeias.....                                                                                                                                                                                                        | 27 |
| Figura 12 - Modelo de estrutura cristalina para materiais poliméricos. ....                                                                                                                                                                                                              | 29 |
| Figura 13 - Constituição de um isolador polimérico (Rodurflex, 2004). ....                                                                                                                                                                                                               | 34 |
| Figura 14 - (a) imagem com visualização de pontos quentes e (b) exemplo de termovisor.....                                                                                                                                                                                               | 36 |
| Figura 15 - Espectro típico de uma descarga corona no ar (LINDNER et al., 1999). ....                                                                                                                                                                                                    | 37 |
| Figura 16 - O detector de corona dispõe de um sistema de contagem das ocorrências de descargas, podendo quantificar a intensidade de descargas corona numa determinada região. Esta contagem de ocorrência de descargas pode ser utilizada no trabalho como parâmetro de avaliação. .... | 38 |
| Figura 17 - (a) imagem com visualização de pontos de UV e (b) equipamento detector de UV. ....                                                                                                                                                                                           | 39 |
| Figura 18 - Ilustração do funcionamento do sistema de detecção de ultra-som. Fonte: BIDDLE (1990). ....                                                                                                                                                                                  | 40 |
| Figura 19 - (a) equipamento detector de ultrassom (b) sinal de ultrassom capturado de um isolador. ....                                                                                                                                                                                  | 40 |
| Figura 20 - (a) Distribuição do campo elétrico num isolador polimérico; (b) Distribuição do potencial elétrico num isolador polimérico. ....                                                                                                                                             | 41 |
| Figura 21 - Comparação de campo elétrico máximo para o sistema com e sem anel corona. ....                                                                                                                                                                                               | 42 |
| Figura 22 - Isolador polimérico com dois anéis anti-corona. ....                                                                                                                                                                                                                         | 42 |
| Figura 23 - Desenhos Típicos de isoladores poliméricos. (a) Interfaces com conexão estreita arredondada; (b) Interfaces com montagem em uma curta distância; (c) Interfaces com montagem                                                                                                 |    |

---

|                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| final arredondado completamente coberto por borracha de silicone; (d) Interface com coxidão estreita. ....                                                                                             | 43 |
| Figura 24 - Descargas elétricas internas e externas em isoladores. ....                                                                                                                                | 44 |
| Figura 25 - Representação de eletrodo metálico com ponta aguda gerando descarga corona. ....                                                                                                           | 47 |
| Figura 26 - Descargas parciais em uma cavidade visualizadas em osciloscópio de base elíptica (TEIXEIRA, 1984). ....                                                                                    | 48 |
| Figura 27 - Evolução da rigidez dielétrica no ar em função da pressão (PICOT, 2003). ....                                                                                                              | 49 |
| Figura 30 - Fratura frágil em isolador (CHESF, 2008). ....                                                                                                                                             | 54 |
| Figura 31 - Fatores que levam a degradação de um isolador polimérico tipo bastão e causam a fratura frágil. ....                                                                                       | 55 |
| Figura 32 - Identificação de ácido nítrico. ....                                                                                                                                                       | 58 |
| Figura 33 - Identificação de ácido nítrico sobre a superfície de fratura de amostra 34. ....                                                                                                           | 58 |
| Figura 34 - Identificação do ácido carboxílico na fratura. ....                                                                                                                                        | 59 |
| Figura 35 - Ácido identificado caboxílico na fratura. ....                                                                                                                                             | 60 |
| Figura 36 - Isolador polimérico tipo bastão. ....                                                                                                                                                      | 63 |
| Figura 37 - Fonte de Raios-X. ....                                                                                                                                                                     | 66 |
| Figura 40 - Comparação da linearidade dos detetores IP e filme de Raios-X quando expostos à radiação beta de $^{32}\text{P}$ por um período de 18 h, (FONTE: FUJIFILM). ....                           | 69 |
| Figura 41 - Sequência de processamento do Imaging Plate para recuperar imagem digital na gamagrafia. ....                                                                                              | 70 |
| Figura 42 - Sequência de processamento do Imaging Plate. ....                                                                                                                                          | 70 |
| Figura 43 - Isolador tipo bastão de 69kV que veio a falhar por Disrupção Dielétrica Interna. ....                                                                                                      | 71 |
| Figura 44 - Detalhe do Isolador tipo bastão de 69kV que veio a falhar por Disrupção Dielétrica Interna. É fácil verificar a perda de material polimérico tanto no lado fase quanto no lado terra. .... | 72 |
| Figura 45 - Imagens radiográficas do isolador com falha por disrupção dielétrica interna. ....                                                                                                         | 72 |
| Figura 46 - Imagem radiográfica do isolador onde constata-se a perda de material polimérico. ....                                                                                                      | 73 |
| Figura 47 - Detalhe das cavidades localizadas junto as ferragens. ....                                                                                                                                 | 74 |
| Figura 50 - Detalhe do Isolador onde verifica-se várias cavidades de forma longilínea. ....                                                                                                            | 75 |
| Figura 51 - Detalhe do Isolador tipo bastão de 72,5kV onde verifica-se a falta de aderência entre o revestimento polimérico e o núcleo de fibra de vidro. ....                                         | 76 |
| Figura 52 - Detalhe do Isolador onde verifica-se cavidades nos lados fase e terra, respectivamente. ....                                                                                               | 77 |
| Figura 53 - Detalhe do Isolador onde verifica-se falhas de fabricação através da presença de cavidades. ....                                                                                           | 77 |
| Figura 54 - Detalhe do Isolador onde verifica-se diversos pontos por onde pode ter ocorrido a penetração de umidade. ....                                                                              | 78 |
| Figura 55 - Isolador aparentemente íntegro que foi submetido à análise para constatação de possíveis defeitos. ....                                                                                    | 78 |
| Figura 56 - Imagem radiográfica do isolador aparentemente íntegro onde constata-se a existência de bolhas. ....                                                                                        | 79 |

---

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 57 - Detalhe do Isolador aparentemente íntegro onde verifica-se a presença de cavidades e trincas.....                                           | 79 |
| Figura 60 - Imagem radiográfica do isolador onde verifica-se a diminuição da espessura do revestimento polimérico. ....                                 | 81 |
| Figura 61 - Imagem radiográfica com detalhe da espessura do isolador. ....                                                                              | 82 |
| Figura 62 - Detalhe do isolador onde verifica-se o afinamento da espessura do revestimento polimérico e a falta de aderência do núcleo com o mesmo..... | 82 |

---

## ***LISTA DE TABELAS***

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Alguns exemplos de macromoléculas. ....                                       | 26 |
| Tabela 2 - Temperatura de transição vítrea de alguns polímeros. ....                     | 28 |
| Tabela 3 - Resultado da análise de concentração de ácidos. ....                          | 61 |
| Tabela 4 - Características do isolador tipo bastão polimérico padronizado na Celpe. .... | 63 |

---

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais isolantes aplicados pelas concessionárias de energia elétrica necessitam de especial atenção no que diz respeito aos parâmetros de suportabilidade às solicitações elétricas, as quais estão submetidos em condições normais de uso.

Embora os meios isolantes empregados, como a cerâmica, o óleo, e o ar, já estejam consolidados quanto aos seus comportamentos, à necessidade de novas tecnologias em isolantes com qualidades mais aprimoradas se estabelece como fator primordial para obtenção de níveis de excelência de confiabilidade de materiais e equipamentos.

Dentro deste vasto leque de conhecimento que é a área dos meios isolantes, pode-se destacar como solução bastante promissora os materiais compósitos. Tais produtos conferem ao material e ao equipamento inúmeras vantagens em relação aos produtos tradicionais de vidro ou cerâmicas, como por exemplo: baixo peso, alta resistência mecânica, melhor resistência ao vandalismo, melhor resistência às condições de poluição e melhor performance elétrica.

Apesar de estarem tomando grande fatia do mercado de componentes elétricos, os materiais compósitos ainda estão em constante evolução e necessitam de investimentos em duas vertentes: confecção da matéria prima e técnicas de monitoramento e ensaios.

Como o uso do produto se sobressaiu ao seu conhecimento, a descoberta de técnicas de ensaio e monitoramento se apresenta como prioridade, pelo menos para aquelas áreas do setor elétrico que convivem com estes materiais em operação.

O monitoramento se resume na detecção da principal causa de falha em produtos compósitos: a existência de vazios na estrutura dos materiais utilizados na fabricação. Estes vazios podem ser originados pela formação de bolhas de ar durante o processo de injeção do polímero, pela presença de trincas ocasionadas pela fadiga frente aos estresses mecânicos e térmicos em operação, ou ainda, pela formação de bolhas de ar nas interfaces.

A ação do campo elétrico aplicado e a existência de condições adequadas, como a pressão do gás no interior do vazio e a penetração de umidade, permitem a ocorrência de descargas parciais. A repetição destas descargas no interior desses defeitos forma caminhos condutivos no polímero conhecidos como arborescência elétrica, no sentido do campo elétrico aplicado, os quais levam o material à ruptura dielétrica.

---

## **1.1 Justificativa**

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de aplicar os conceitos vistos no decorrer do curso de mestrado em engenharia mecânica do programa de pós-graduação da UFPE numa situação real e assim contribuir para o desenvolvimento da organização a qual proporciona uma ocasião oportuna de unir teoria e prática, resultando num maior aprendizado e crescimento profissional e, sobretudo, a oportunidade de melhorar os processos de especificação e monitoramento de isoladores do tipo compósito através de técnicas preditivas sofisticadas.

## **1.2 Objetivos do Trabalho**

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo apresentar uma metodologia de investigação de falhas em isoladores do tipo compósito de classe de tensão de 69KV em linhas de subtransmissão através da técnica de radiografia digital de alta resolução, denominada de Radiografia Computadorizado – RC. Entender o processo de desencadeamento das falhas bem como identificar suas causas de origem é parte integrante da pesquisa e tem esforços centrados nos tipos falhas de maior dificuldade de análise em isoladores desta composição, pelo menos para as técnicas convencionais, que são aquelas por “Fratura Frágil” e aquelas por “Disrupção Dielétrica Interna”.

---

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PRINCIPIO DA RADIOGRAFIA

Este capítulo aborda os principais conceitos referentes à interação dos fótons com a matéria e os princípios da radiografia. Mesmo sendo matéria bastante explorada em livros e artigos, optou-se por escrever sobre esses conceitos fundamentais à produção de Raios-X com o intuito de introduzir ao leitor não especialista o assunto.

#### 2.1.1 O fóton

Em 1905, Max Planck (1879 - 1955) propôs que a radiação eletromagnética seria quantizada e chamada de fóton. Segundo Einstein, um quantum de luz de frequência  $f$  tem uma energia dada por  $E = hf$ , onde  $h$  é a chamada constante de Planck, que tem o valor igual a  $6,63 \times 10^{-34}$  J.s =  $4,14 \times 10^{-15}$  eV.s.

A menor energia que uma onda luminosa de frequência  $f$  pode possuir é  $hf$ . Se a onda possui energia maior, esta deve ser um múltiplo inteiro de  $hf$ .

Einstein propôs ainda que sempre que a radiação é absorvida ou emitida por um corpo, esta absorção ou emissão ocorre nos átomos do corpo. Quando um fóton de frequência  $f$  é absorvido por um átomo, a energia  $hf$  do fóton é transferida da luz para o átomo. Este evento implica a aniquilação de um fóton. Quando um fóton de frequência  $f$  é emitido por um átomo, uma energia  $hf$  é transferida do átomo para a radiação. Este evento implica a criação de um fóton.

#### 2.1.2 O Efeito Fotoelétrico

Em 1886 e 1887, Heinrich Hertz realizou as experiências que, pela primeira vez, confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell sobre a propagação da luz. Hertz descobriu que uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorre mais facilmente quando se faz incidir sobre um deles luz ultravioleta. A emissão de elétrons de uma superfície, devido à incidência de luz sobre essa superfície, é chamada efeito fotoelétrico.

A figura 1 pode ser utilizada para ilustrar este efeito experimentalmente. A luz incidente monocromática entra num tubo de vidro, que está em vácuo, através de uma janela de quartzo (que permite passar apenas luz ultravioleta) e colide com o eletrodo metálico 1 fornecendo

energia para que os fotoelétrons sejam ejetados. A corrente  $I$  que flui durante a incidência da luz pode ser medida como uma função da variável diferença de potencial  $V_{21}$  aplicada entre os eletrodos 1 e 2.

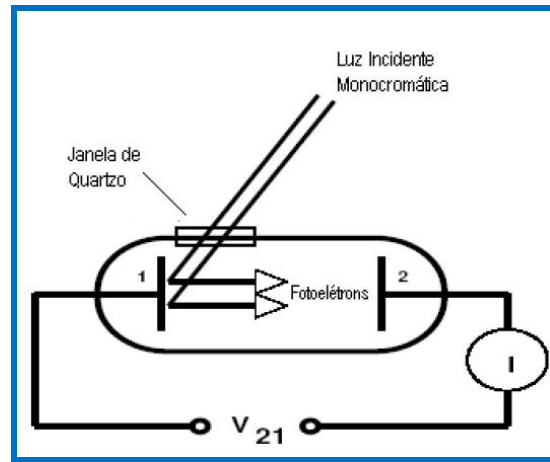


Figura 1 - Efeito fotoelétrico. Com o eletrodo 1 iluminado com luz monocromática de intensidade constante, uma corrente  $I$  é medida como uma função da diferença de potencial  $V_{21}$  (Johns, 1983).

As curvas a e b na figura 2 são gráficos da corrente fotoelétrica, num aparelho em função da diferença de potencial  $V$ . Se  $V$  é muito grande, a corrente atinge um certo valor limite (ou de saturação) no qual todos os fotoelétrons emitidos por 1 são coletados por 2.

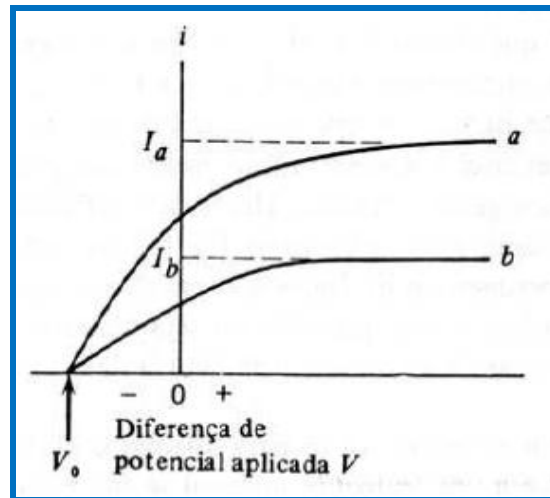


Figura 2 - Gráfico da corrente  $i$  em função da tensão  $V$  para o efeito fotoelétrico (Eisberg e Resnick, 1988).

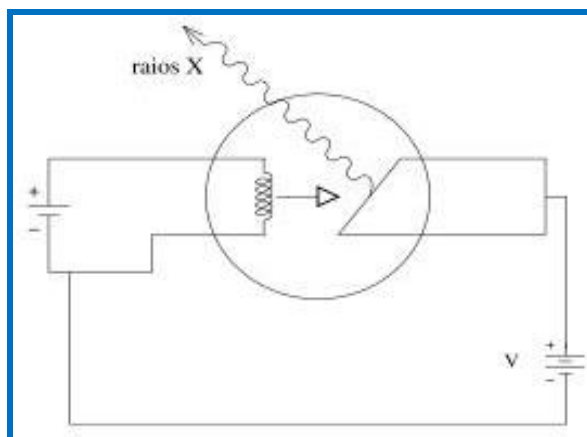
Se o sinal de  $V$  é invertido, a corrente fotoelétrica não cai imediatamente a zero, o que sugere que os elétrons são emitidos com alguma energia cinética. O valor  $V_0$  é chamado potencial limite ou de corte.

### 2.1.3 O Efeito Compton

Compton pode confirmar em 1923 a natureza corpuscular da radiação. Ele fez com que um feixe de Raios-X incidisse sobre um alvo de grafite. Mediu-se então a intensidade dos Raios-X espalhados como função de seu comprimento de onda, para vários ângulos de espalhamento.

### 2.1.4 Produção de Raios-X

Os Raios-X, denominados assim por sua natureza então desconhecida quando o físico alemão Wilhelm Conrad Rontgen no dia 8 de novembro de 1895 fez suas primeiras observações, são produzidos no alvo de tubo como o ilustrado na figura 3. Quando um feixe de elétrons de alta energia, acelerados por uma diferença de potencial de alguns milhares de volts, é freado ao atingir um alvo metálico, causa a emissão de um espectro contínuo de radiação eletromagnética.



*Figura 3 - Tubo de Raios-X. Ao se aquecer o filamento do cátodo, pela passagem de uma corrente, elétrons são emitidos e acelerados em direção ao ânodo(alvo) pela diferença de potencial V. Raios-X são emitidos do alvo quando os elétrons são acelerados ao atingi-lo (Wilhelm Rontgen, 1985).*

O choque do feixe de elétrons, que saem do cátodo com energia da ordem de 30keV, com o ânodo (alvo), produz um espectro contínuo, que resulta da desaceleração do elétron durante a penetração no ânodo. Pode-se falar em Raios-X característico do material do ânodo também. Assim cada espectro de Raios-X é a superposição de um espectro contínuo e de uma série de linhas espectrais características do ânodo.

O espectro contínuo é uma curva de contagens por segundo versus comprimento de onda do Raios-X.

Um fóton de radiação, com frequência  $f$ , transporta uma energia  $hf = hc/\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação. Portanto, o Raios-X emitido deverá ter energia máxima igual à energia do elétron incidente. Assim, o espectro contínuo é limitado por este valor. Na figura 4a, têm-se vários espectros contínuos em função do potencial acelerador. Essas curvas foram obtidas com um alvo de tungstênio. É fácil compreender, a partir das relações  $E = hf = hc/\lambda$ , que o comprimento de onda (ou a frequência) inferior (ou superior) deve diminuir (ou aumentar) com o potencial acelerador. O comprimento de onda mínimo é  $\lambda_{\min} = 1,24 \times 10^{-4} \text{ A}^\circ$ .

Substituindo-se o alvo de tungstênio ( $Z=74$ ) por um de molibdênio ( $Z=42$ ), e mantendo-se as outras condições experimentais constantes, obtém-se o resultado ilustrado na figura 4b.

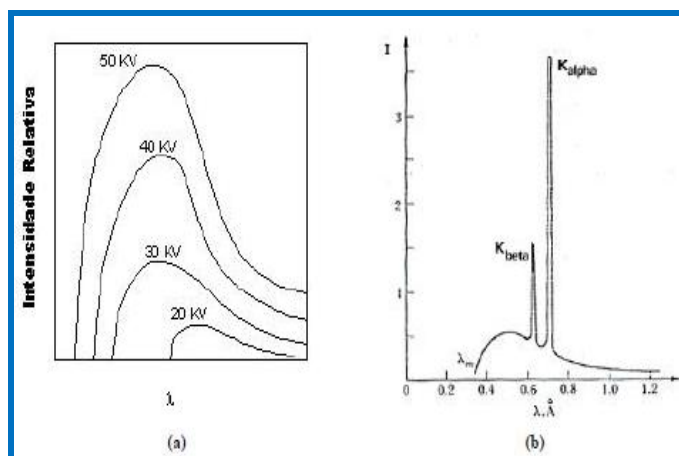


Figura 4 - Características dos Raios-X: (a) Espectro contínuo. (b) Intensidade de Raios-X produzidos quando elétrons de 30 keV incidem em um alvo de Mo em função do comprimento de onda (<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/raiosx/rxconc.html>, 2005).

Observa-se que as principais diferenças entre as figuras 4a e 4b são os picos existentes na 4b, em torno de  $0,6 \text{ A}^\circ$  e  $0,7 \text{ A}^\circ$ . Levando-se em conta que a única diferença entre uma medida e outra foi a substituição do alvo, é razoável admitir que os picos são devidos ao ânodo de molibdênio. Estes picos constituem o espectro de Raios-X característico do molibdênio.

A figura 5 ilustra o processo elementar de produção de Raios-X. Um elétron de energia cinética inicial  $K_1$  é desacelerado pela interação com um núcleo pesado do alvo. A energia que este elétron perde aparece na forma de radiação como um fóton de Raios-X. A massa do núcleo em relação ao elétron é tão grande que a energia que ele adquire durante a colisão pode ser completamente desprezada. A energia do fóton pode ser dada por,  $E = h\nu = K_1 - K_2$ , onde

$K_2$  é a energia cinética do elétron após a colisão. O comprimento de onda do fóton de Raios-X é dado por,  $hc/\lambda = K_1 - K_2$ .

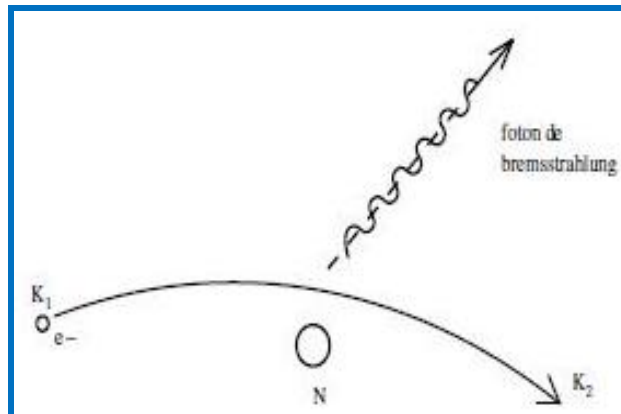


Figura 5 - O processo de bremsstrahlung responsável pela produção do espectro contínuo de Raios-X.

#### 2.1.5 Intensidade de um feixe de Raios-X

A intensidade de um feixe de Raios-X é uma função do número de fótons. Três unidades são frequentemente utilizadas para indicar a dose absorvida de Raios-X: o R (roentgen), o rad (radiation absorbed dose) e o Gy (gray).

A razão pelo qual o Raios-X é denominado de radiação ionizante tem como princípio que ele possui energia suficiente para causar a ionização dos átomos. A grandeza exposição foi a primeira grandeza definida para fins de radioproteção. Esta grandeza é uma medida da habilidade ou capacidade dos Raios-X em produzir ionizações no ar. Ela mede a carga elétrica total produzida por Raios-X em um quilograma de ar. A unidade atual da grandeza exposição é o coulomb por quilograma (C/kg) em condições normais de temperatura e pressão.

A unidade antiga é o roentgen (R) que equivale a  $2,58 \times 10^{-4}$  C/kg (1 atm,  $25^\circ$  C). A unidade rad define a quantidade de radiação absorvida. Um rad significa que 0,01 J de energia é absorvida por 1 kg de material (1 Gy = 100 rad). Diferentes materiais têm diferentes características de absorção de Raios-X.

#### 2.1.6 Atenuação

Quando o feixe de Raios-X atinge um material, sua energia diminui devido à interação dos fótons com a matéria como visto anteriormente. Assuma que o feixe de Raios-X tem uma intensidade  $I$  e uma seção transversal de área  $A$  conforme mostra a figura 6. Assuma também que os átomos no material são idênticos e todos possuem seção transversal  $\sigma$  com uma

densidade de  $n$  átomos por unidade de volume. Então, o número total de átomos encontrado pelo feixe de Raios-X é dado por  $An$  e a área ocupada pelos átomos no feixe incidente é  $An \sigma$ . Assim a probabilidade para que um fóton interaja com um átomo é  $An \sigma / A = n \sigma$ . A energia dos Raios-X removida numa espessura  $dx$  do material é  $dI = -n \sigma I dx$ . Rearranjando a equação e fazendo  $\mu = n \sigma$  que é a fração de energia removida por unidade de espessura por unidade de intensidade e integrando obtém-se  $I = I_0 e^{-\mu x}$ , onde  $I$  é a intensidade de Raios-X em  $x$ ,  $I_0$  é a intensidade incidente no material,  $\mu$  é definido como sendo o coeficiente de atenuação linear em  $\text{cm}^{-1}$ , e  $x$  é o comprimento de propagação do feixe no material. Esta é conhecida como a lei de Beer-Bauguer e é válida somente para um feixe monoenergético.

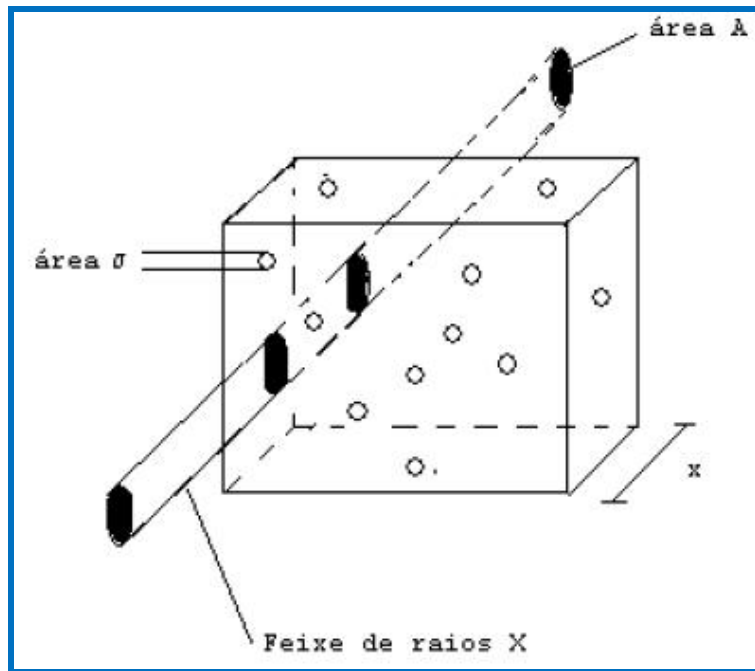


Figura 6 - Feixe de Raios-X atingindo um material (Shung, Smith e Tsui, 1992).

O coeficiente de atenuação de massa é definido como a razão do coeficiente linear de atenuação  $\mu$  pela densidade do material  $\text{cm}^2/\text{g}$ . A unidade do coeficiente de atenuação de massa é  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Este é muito útil porque indica a propriedade de atenuação da matéria independente do seu estado físico. Por exemplo, o coeficiente de atenuação linear da água líquida, do gelo e do vapor de água é  $0,214 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0,196 \text{ cm}^{-1}$  e  $0,00013 \text{ cm}^{-1}$ , respectivamente, a 50 keV. Entretanto o coeficiente de atenuação de massa é o mesmo para os três estados da água ( $0,214 \text{ cm}^2/\text{g}$ ).

A figura 7 mostra a curva do coeficiente de atenuação de massa,  $\mu/\rho$ , e o coeficiente de massa de absorção de energia,  $\mu_{en}/\rho$  como função da energia do fóton para dois materiais (ar e polietileno puro).

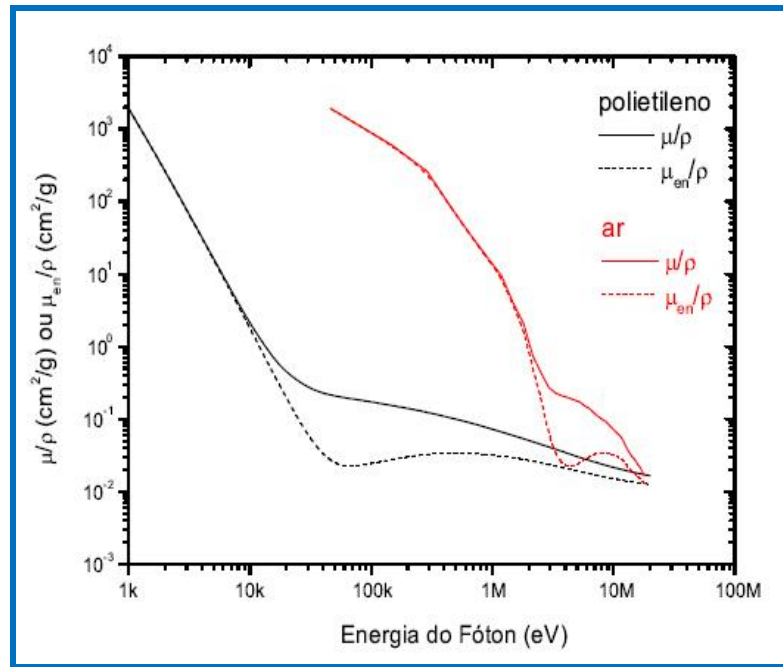


Figura 7 - Coeficiente de atenuação de massa,  $\mu/\rho$ , e o coeficiente de absorção de massa-energia,  $\mu_{en}/\rho$  em função da energia do fóton para o ar e para o polietileno puro  
(<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ComTab/polyethylene.html>, 2004)

## 2.2 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), no Brasil, as aplicações industriais de radiações ionizantes são realizadas em cerca de 900 indústrias, nas quais são manuseadas em torno de 3.000 fontes radioativas. A radiografia industrial representa 14% desse total, com 217 equipamentos de Raios-X cadastrados e 287 irradiadores para gamagrafia industrial, que é uma técnica similar à radiografia e visa ao controle de qualidade de peças metálicas ou de estruturas de concreto.

Apesar do número reduzido de indústrias brasileiras que fornecem serviços em radiografia, esta técnica vem crescendo neste setor dada as suas vantagens, como: controle de qualidade do produto, redução de riscos operacionais de equipamentos e componentes, desenvolvimento de sistemas de inspeção radiográficos mais baratos e de grande área de detecção e automatização do sistema de inspeção etc.

### 2.2.1 Princípio de Inspeção por Meio da Radiografia

O princípio de inspeção radiográfica baseia-se no fato de que as radiações incidentes na peça ensaiada são modificadas pela passagem em descontinuidades ou defeitos que possam estar presentes, provocando alteração na intensidade da radiação emergente da peça ensaiada, aonde alterações de espessura e presença de descontinuidades são visualizadas por diferenças de contraste nas imagens obtidas. A radiação que atravessa a peça é então detectada por um filme ou ainda por sistemas com intensificadores de imagens acoplados a sistemas CCDs.

Em radiografia industrial coloca-se a peça a ser ensaiada entre uma fonte emissora de radiação (Raios-X ou  $\gamma$ ) e um detector (filme ou cintilador). Imagens de Raios-X tradicionais são baseadas no contraste de absorção das partes de um objeto. Progressos no aumento da qualidade dos detectores têm sido feito, tais como, placas de imagens (image plates), módulos de imagens (flat panels) com detectores que possuem matriz CCDs a base de Si amorfo, câmeras CCDs, etc. Nas fontes também existem progressos, tais como a microfoco. A figura 8 mostra um arranjo para a realização de uma radiografia convencional. A intensidade do feixe de Raios-X que atinge o filme radiográfico ou sensor num determinado ponto depende da atenuação sofrida pelo feixe no caminho percorrido.

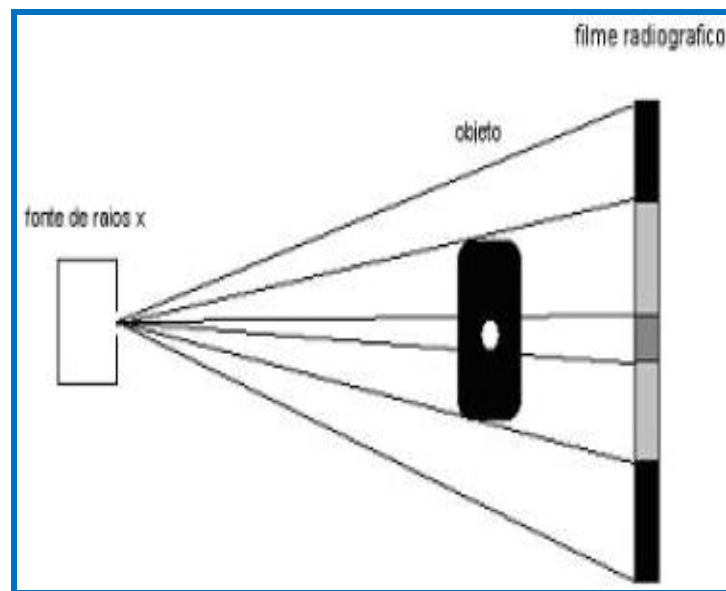


Figura 8 - Representação de um ensaio para radiografia com filme (Walmor Godoi, 2005).

---

## 2.2.2 Parâmetros Para Obtenção de Radiografias

### 2.2.2.1 Energia do Feixe

O primeiro parâmetro a ser observado para a realização de uma radiografia é a energia do feixe de Raios-X ou  $\gamma$ . Conforme visto no capítulo anterior, o coeficiente de absorção de um material é dependente da energia e em geral decresce quando a energia aumenta.

Na radiografia industrial a energia escolhida deve ser suficiente para atravessar o objeto e emergir com uma intensidade suficiente para sensibilizar o detector e, também, gerar um contraste satisfatório para visualização do defeito.

### 2.2.2.2 Contraste da Imagem

Tipicamente, os sensores são capazes de discretizar os valores de uma cena em um intervalo que vai de  $L_{min}$  a  $L_{max}$ . Contraste (ou modulação) depende da diferença de tom entre duas regiões vizinhas de uma imagem e é determinado pela expressão

$$C(\%) = \frac{L_2 - L_1}{L_{max} - L_{min}} 100\%$$

onde  $C$  é o contraste da imagem,  $L_1$  a intensidade da imagem na região 1,  $L_2$  a intensidade da imagem na região 2,  $L_{max}$  a intensidade máxima da imagem e  $L_{min}$  a intensidade mínima da imagem.

Em imagens digitais de 8 bits existem 256 tons de cinza, sendo que  $L_{min} = 0$  corresponde ao preto e  $L_{max} = 255$ , corresponde ao branco. Já em imagens de 12 bits, como as fornecidas pelo SISTEMA RDP mostrado no capítulo 7, têm-se 4096 níveis de cinza. Estes parâmetros estão relacionados à resolução em profundidade dos pixels e também pela saída digital do equipamento utilizado para adquirir as imagens.

Na figura 9 ilustra-se um exemplo de IQI (Indicador de Qualidade de Imagens). Estes são utilizados para se obter uma medida do contraste e da definição da imagem obtida.



Figura 9 - Indicador de Qualidade de Imagens (IQI) (<http://octarine.adfa.edu.au:8080/~kks/NDI/chap6-rad.rtf>, 2004)

#### 2.2.2.3 Resolução Espacial

A resolução de um dispositivo ou sistema representa sua capacidade de apresentar fielmente pequenos detalhes ou variações de uma imagem. A resolução pode ser expressa em diversas unidades: pixels/mm, pixels/polegada, pares de linha/mm, etc. Existem dois tipos de resolução de alto contraste e resolução de baixo contraste.

A resolução de alto contraste representa a capacidade de um sistema de representar fielmente imagens com grandes variações de intensidades. Um método comumente empregado para determinar a resolução de alto contraste de um dispositivo consiste em observar a imagem de uma sequência de linhas escuras e claras alternadas, de forma a produzir altos valores de contraste.

A resolução de baixo contraste representa a capacidade de um sistema de apresentar detalhes com pequenas variações de intensidades. Em radiografia e tomografia, este parâmetro é a capacidade de mostrar pequenas variações de coeficientes de atenuação. A resolução de baixo contraste deve ser expressa em termos do tamanho do menor detalhe e do contraste em relação ao meio (por exemplo, 1 mm a 1%).

Um método comum para determinar a resolução de baixo contraste de um sistema de radiografia é a utilização de um phantom com diversos furos de diferentes diâmetros.

#### 2.2.2.4 Dimensão do Foco da Fonte de Raios-X

Outro parâmetro importante para obtenção de uma boa radiografia é a dimensão da fonte de radiação (spot size). O fato de que a fonte de Raios-X não é uma fonte pontual e apresenta uma dimensão  $f$ , faz com que vários raios passem pela borda do objeto formando o efeito penumbra com dimensão  $p$ . Na figura 10 é mostrada uma representação esquemática do efeito penumbra o qual gera uma baixa definição das bordas do objeto ou do defeito em análise.

Das relações geométricas pode-se determinar a dimensão da penumbra na imagem conforme,

$$p = f \left( \frac{D_{fd}}{D_{fo}} - 1 \right)$$

onde  $p$  é a dimensão linear da penumbra formada na imagem,  $f$  é a dimensão linear da fonte de Raios-X,  $D_{fd}$  é a distância da fonte ao detector e  $D_{fo}$  é a distância da fonte ao objeto.

Pela análise da equação acima, pode-se verificar que o principal fator para reduzir a penumbra formada na imagem é a dimensão da fonte  $f$ . Assim, é comum utilizar fontes de Raios-X com dimensões focais na ordem de dezenas de micrometros (“microfoco”). Também, é possível otimizar os fatores geométricos do arranjo, como aumentar a distância da fonte ao detector e a distância da fonte ao objeto.

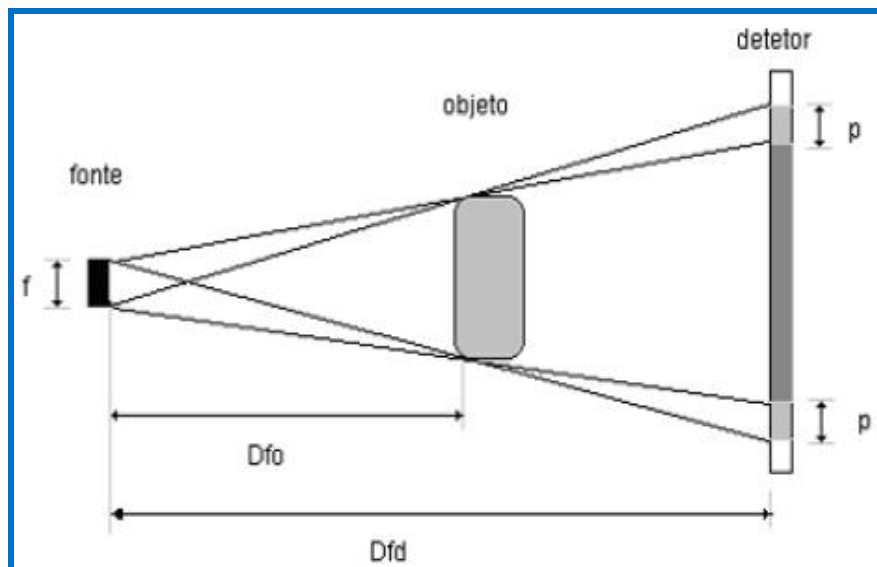


Figura 10 - Representação do efeito penumbra na radiografia (Walmor Godoi, 2005).

---

#### 2.2.2.5 Dispositivos de Carga Acoplada

Os dispositivos de carga acoplada (CCDs) foram inventados em 1970 e atualmente são utilizadas em vários sistemas de visão de máquina. O coração das câmeras CCDs é a matriz de estado sólido. Ela converte a intensidade de luz em sinais de tensão. Apesar das câmeras serem popularmente chamadas de “Câmeras CCDs” elas podem conter ainda dispositivos de injeção de carga (CIDs) ou semicondutores metal-óxido (MOS).

### 2.3 POLÍMEROS

#### 2.3.1 Histórico e Evolução

Os materiais poliméricos estão presentes em nosso cotidiano há muito tempo. O consumo do amido, por exemplo, data de tempos pré-históricos. O algodão, formado pelo polímero mais abundante na natureza, a celulose, já era usado no final do último Período Glacial, há cerca de 150 mil anos. A produção artificial de materiais poliméricos, entretanto, só começou a ser dominada a partir da segunda metade do século XIX, período em que surgiram polímeros modificados, a partir de macromoléculas naturais. Somente no início do século XX, os processos de polimerização tornaram-se viáveis em grande escala, permitindo a síntese de polímeros a partir de suas unidades monoméricas. Esses processos estão sendo aperfeiçoados desde então, possibilitando a obtenção de polímeros cada vez mais sofisticados e baratos, graças a uma engenharia molecular cada vez mais complexa.

A adição de partículas nanométricas (argila, metais ou nanotubos) aos polímeros, além de trazer inúmeras vantagens - como melhoria de suas propriedades mecânicas e térmicas, aumento das propriedades de barreira, resistência a solventes, redução de sua capacidade inflamável, entre outras - possibilita uma série de novas opções para a utilização de polímeros. Outras partículas nanométricas vêm sendo pesquisadas. Os nanocompósitos poliméricos, tanto de macromoléculas sintéticas como naturais, começam a ser aplicados nos mais diferentes setores, por exemplo, automotivo, aeronáutico, eletroeletrônico, telecomunicações, aeroespacial, de embalagens, de tecidos, médico, de engenharia, informática, criando novas perspectivas para os materiais poliméricos no futuro.

---

### 2.3.2 Introdução

De acordo com a definição da IUPAC (International Union for Pure and Applied Chemistry), um polímero é uma substância composta por moléculas que se caracterizam pela repetição múltipla de uma ou mais espécies de átomos ou grupos de átomos (unidades constitucionais) ligados uns aos outros em quantidades suficientes para produzir um conjunto de propriedades que não variam significativamente com a adição ou remoção de umas poucas unidades constitucionais.

Os termos macromolécula e cadeia polimérica são utilizados para denominar as longas moléculas que compõem um polímero. A unidade constitucional, também denominada de unidade de repetição, é a menor unidade cuja repetição descreve completamente a estrutura da macromolécula.

Os polímeros podem ser de origem natural ou sintética. Os polímeros de origem natural, tais como a celulose, as proteínas e a borracha natural, são produzidos pelo organismo de seres vivos. Os polímeros de origem sintética são aqueles sintetizados pelo homem, tais como o polietileno, o nylon e os silicones.

Os materiais de partida para a obtenção dos polímeros são denominados de monômeros. Através da reação de polimerização, os monômeros são unidos entre si através de ligações covalentes, de forma encadeada, gerando as macromoléculas. A estrutura molecular das unidades de repetição na macromolécula gerada, geralmente guarda alguma relação com a estrutura do monômero que lhe deu origem.

A Tabela 1 mostra alguns exemplos de macromoléculas, sua respectivas unidades de repetição e o monômero de origem. No caso do polietileno, do poliestireno e do poliisopreno, as unidades de repetição e os respectivos monômeros são praticamente iguais. No caso do poli(hexametileno adipamida) e do poli(dimetil siloxano) são utilizados dois monômeros que reagem entre si, gerando a macromolécula. Neste caso, a unidade de repetição é constituída pela condensação dos dois monômeros. Finalmente, no caso da policaprolactama, a unidade de repetição apresenta estrutura um pouco diferente daquela apresentada pelo composto cíclico que lhe deu origem.

Tabela 1 - Alguns exemplos de macromoléculas (Luis Bonfim , 2003).

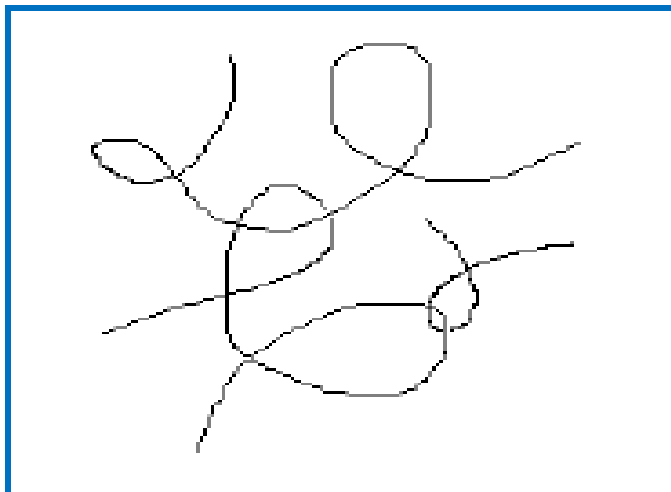
| Polímero                     | Unidade de repetição                                                                                           | Monômeros                                                                                                       |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Polietileno                  | $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$                                                                                    | $\text{CH}_2=\text{CH}_2$                                                                                       |
| Poliestireno                 | $-\text{CH}_2-\text{CH}-$<br> | $\text{CH}_2=\text{CH}-$<br> |
| Poliisopreno                 | $-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}-\text{CH}_2-$                                                    | $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}=\text{CH}_2$                                                       |
| Poli(hexametileno adipamida) | $\text{NH}(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{C}(=\text{O})-(\text{CH}_2)_4-\text{C}(=\text{O})-$                  | $\text{NH}_2-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2$<br>e<br>$\text{HCOOC}-(\text{CH}_2)_4-\text{CCCH}$                    |
| Policaprolactama             | $-\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{C}(=\text{O})-$                                                              | $\text{NH}-\text{CH}_2-(\text{CH}_2)_4-\text{C}(=\text{O})$                                                     |
| Poli(dimetil siloxano)       | $-\text{Si}(\text{CH}_3)_2-\text{O}-$                                                                          | $(\text{CH}_3)_2\text{Si}-\text{Cl}_2$<br>e<br>$\text{H}_2\text{O}$                                             |

O peso molecular elevado das macromoléculas, tipicamente entre 10<sup>4</sup> e 10<sup>6</sup> g/mol, é em grande parte responsável pelas propriedades incomuns apresentadas pelos polímeros. Considere-se, por exemplo, as parafinas, que são compostos de baixo peso molecular e que apresentam a mesma composição química do polietileno. As parafinas são sólidos moles, com pouca resistência mecânica, ao passo que o polietileno apresenta alta tenacidade e resistência mecânica relativamente alta. Em geral, as propriedades de um material dependem da natureza e magnitude das forças de atração existentes entre as moléculas que o constituem.

No caso do polietileno, a resultante das forças de atração entre uma macromolécula e sua vizinhança é muito maior do que a força resultante entre uma pequena molécula da parafina e sua vizinhança. Além disso, em virtude de sua estrutura de longas cadeias, as macromoléculas podem entrelaçar-se uma nas outras, tal como o fazem pedaços de barbante num emaranhado. A Figura 11 mostra através de uma representação esquemática o entrelaçamento entre macromoléculas, o qual funciona como pontos de amarração, tendendo a mantê-las unidas entre si.

---

Em geral, as propriedades que são influenciadas pelas forças de atração intermoleculares e pelo entrelaçamento de cadeias são incrementadas à medida que o peso molecular se eleva. Entre as propriedades dos polímeros, que devem ser alteradas pelo aumento no peso molecular, cabe destacar a temperatura de transição vítrea, o índice de fluidez, a viscosidade, o módulo de elasticidade e a resistência mecânica em geral. Entre as propriedades que são essencialmente independentes do peso molecular, estão o índice de refração, dureza, condutividade elétrica e densidade.



*Figura 11 - Representação esquemática mostrando o entrelaçamento das cadeias (Luis Bonfim , 2003).*

Quando um polímero amorfo é aquecido acima de uma temperatura característica, ele sofre uma mudança de estado que altera drasticamente suas propriedades físicas e mecânicas. A temperatura na qual esta transformação ocorre é denominada de temperatura de transição vítrea, normalmente denotada por  $T_g$ .

Abaixo da  $T_g$ , o polímero é duro e rígido como um vidro, sofrendo fratura frágil na ruptura. Na  $T_g$ , o polímero sofre uma transformação mais ou menos brusca, tornando-se mais mole e flexível. O módulo elástico do material pode sofrer uma redução de até 1000 vezes em relação ao seu valor inicial, quando a temperatura passa pela  $T_g$ . Outras propriedades que podem sofrer alteração brusca na temperatura de transição vítrea incluem o coeficiente de expansão térmica, a capacidade térmica, o índice de refração, o amortecimento mecânico, as propriedades elétricas, a resistência à tração e a elongação na ruptura.

A Tabela 2 mostra as temperaturas de transição vítreas de alguns polímeros para fins de comparação. Polímeros como o poli(cloreto de vinila) e o poliestireno, que possuem altas  $T_g$ s, são materiais duros e rígidos à temperatura ambiente.

Polímeros como a borracha de silicone e o poliisopreno, que são essencialmente amorfos e possuem baixas temperaturas de transição vítrea, apresentam comportamento borrachoso. Finalmente, polímeros como o polietileno e do polipropileno, que possuem baixas  $T_g$ s, mas ao mesmo tempo apresentam alto grau de cristalinidade, apresentam consistência semi-rígida.

*Tabela 2 - Temperatura de transição vítrea de alguns polímeros (Luis Bonfim , 2003).*

| Polímero                     | $T_g$ , °C |
|------------------------------|------------|
| Borracha de silicone         | -123       |
| Poliisopreno                 | -70        |
| Poli(fluoreto de vinilideno) | -39        |
| Poli(cloreto de vinila)      | 82         |
| Poliestireno                 | 100        |
| Polietileno                  | -120       |
| Polipropileno                | -18        |
| Nylon                        | 47         |

### 2.3.3 Fissuramento em Materiais Poliméricos

Materiais poliméricos submetidos a esforços mecânicos multiaxiais podem sofrer danos quando em contato com determinados fluidos. O fenômeno, denominado de environmental stress cracking, se caracteriza pelo aparecimento de fissuras no material, devido à ação combinada do esforço mecânico e o contato com um fluido específico.

A ocorrência de stress cracking pode ser explicada, tomando-se como ponto de partida, a microestrutura dos materiais poliméricos. A Figura 12 apresenta um modelo para descrever a microestrutura de materiais poliméricos semicristalinos, onde regiões cristalinas se alternam com regiões amorfas. As regiões cristalinas são produzidas pelo empacotamento ordenado de cadeias moleculares, gerando estruturas na forma de lamelas. Dentro destas regiões a resistência mecânica é bastante alta, pois as interações entre os átomos são bastante fortes. Em contrapartida, dentro das regiões amorfas as cadeias moleculares encontram-se num estado totalmente desordenado, como num emaranhado de fios de lã, onde as interações entre os átomos são fracas. Conseqüentemente, quando o material sofre uma solicitação mecânica, a

deformação ocorrerá principalmente nas regiões amorfas, por meio de um processo de estiramento e deslizamento entre cadeias.

Para que não ocorra a desagregação do material, durante a solicitação mecânica, é importante que existam cadeias moleculares que façam a amarração entre lamelas adjacentes. Cadeias de amarração apresentam extremidades contidas em lamelas adjacentes, enquanto que o segmento central se localiza na região amorfa interposta entre as lamelas. Na prática, muitas cadeias apresentam segmentos contidos em apenas uma lamela e por isso, não funcionam como elementos de amarração. O número de cadeias de amarração depende principalmente do peso molecular, da distribuição de peso molecular e do grau de cristalinidade. Quanto maior for o peso molecular, maior será o comprimento das cadeias moleculares, aumentando assim as chances de formação de amarrações. Em contrapartida, quanto maior o grau de cristalinidade, menor serão as chances de formação de amarrações, pelo fato de haver menor fração de material amorfo. A distribuição de peso molecular por sua vez, pelo fato de influenciar o grau de cristalinidade (quanto maior a distribuição de peso molecular, menor o grau de cristalinidade), também afeta a formação de amarrações.

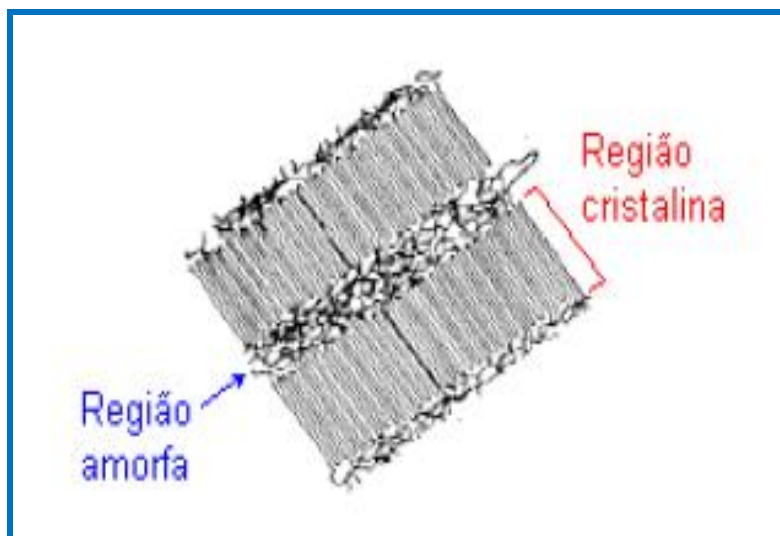


Figura 12 - Modelo de estrutura cristalina para materiais poliméricos (Luis Bonfim , 2003).

Quando um material polimérico é submetido a uma carga mecânica de baixa magnitude por período prolongado, tal como no ensaio de fluência, não há deformação significativa em curto prazo. Ao invés disso, há um gradativo processo de desemaranhamento, seguido de relaxação de tensão, das cadeias de amarração.

---

À medida que o processo de relaxação de tensão prossegue a carga imposta ao material fica cada vez mais concentrada nas cadeias de amarração que ainda não relaxaram. Finalmente, atinge-se um ponto em que as poucas cadeias de amarração remanescentes não podem mais suportar a carga imposta e o resultado é que o material sofre fratura frágil, que se caracteriza por súbita ruptura. É interessante notar que, mesmo os polímeros dúcteis, como o polietileno, estão sujeitos a este tipo de ocorrência.

No fenômeno do environmental stress cracking, o fissuramento do material ocorre através do mecanismo descrito acima, mas de forma acelerada, devido ao contato com um determinado fluido. Por exemplo, na moldagem pelo processo de extrusão ou injeção, é muito comum a superfície da peça moldada resfriar mais rapidamente que o interior, dando origem a tensões residuais multiaxiais. Se estas tensões não forem adequadamente aliviadas, pode haver o fissuramento do material devido ao contato eventual com algum fluido. A norma ASTM D 1693 descreve um método para avaliar a resistência de polietilenos ao fissuramento pelo contato com determinados fluidos, a qual é normalmente descrita em tabelas como ESCR (Environmental Stress Cracking Resistance). No caso do polietileno, os fluidos mais comuns que provocam o fissuramento são o metanol, óleos de silicone e surfactantes.

Na especificação de materiais poliméricos para a moldagem de artigos, o projetista deve levar em consideração o balanço entre diversas propriedades, incluindo o ESCR. Por exemplo, caso o projetista especifique um polietileno com densidade alta, com o objetivo de garantir maior rigidez ao produto, deverá fazer uma avaliação do ESCR do material, pois polietilenos de alta densidade apresentam maior cristalinidade e, portanto, são mais suscetíveis ao fissuramento, uma vez que possuem menor quantidade de cadeias de amarração (vide explicação acima). Um outro exemplo da necessidade de se considerar o balanço de propriedades, diz respeito ao peso molecular. Caso o projetista selecione um polietileno de peso molecular elevado, com o objetivo de se ter um material com alto ESCR, deverá se lembrar que polímeros com alto peso molecular apresentam viscosidades elevadas, o que leva necessariamente à redução na velocidade de processamento, ou seja, aumenta o ciclo de moldagem.

Além da ação dos fluidos, outro parâmetro que acelera o processo de fratura frágil é a temperatura. A grosso modo, pode-se supor que a velocidade de propagação de uma trinca dobra a cada incremento de 7°C na temperatura. Ou seja, artigos moldados que apresentarem

---

tensões residuais, poderão sofrer fissuramento, quando submetidos a temperaturas acima da temperatura ambiente.

## **2.4 ISOLADORES COMPÓSITOS**

### **2.4.1 Introdução**

Isoladores ou dielétricos são materiais com alta capacidade de resistir ao fluxo de corrente elétrica. Estes materiais têm os elétrons fortemente ligados aos núcleos dos seus átomos, sendo assim necessária uma grande energia para retirar e movimentar os elétrons em materiais isolantes.

Os isoladores em engenharia elétrica têm a finalidade de isolar eletricamente um corpo condutor de outros corpos condutores ou não. Os tipos mais usados de isoladores são os cerâmicos, vítreos e poliméricos.

Esses isoladores têm ligação direta com os índices de seguranças nas redes de transmissão elétrica, podendo influenciar diretamente nestes índices: DEC (Duração da Interrupção Equivalente em Horas) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção), usados pelas companhias elétricas para medir o índice de qualidade.

Alguns materiais tais como o vidro ou o Teflon são isoladores elétricos muito bons. Uma classe muito maior de materiais, por exemplo, borracha e a maioria dos plásticos é ainda boa suficiente para isolar a fiação e cabos elétricos mesmo que possam ter uma resistividade mais baixa que a maioria. Estes materiais podem servir como isoladores práticos e seguros para baixas e moderadas tensões (centenas, ou mesmo milhares, de Volts).

### **2.4.2 Breve Histórico**

As primeiras tentativas de isolar fios de uma rede elétrica foram feitos com estacas de madeira, porém estes isoladores não apresentaram bons resultados conforme cresciam as linhas de transmissão e as voltagens entre seus fios. Com a expansão dos telégrafos e conseqüentemente o crescimento das linhas para levarem estes sinais os isoladores ganharam uma grande importância e vários modelos.

Os primeiros isoladores a serem fabricados foram os cerâmicos, fabricados no Reino Unido a partir de 1840 por Stiff Doulton. Com a invenção de isoladores para suspensão logo foi possível a transmissão de energia em alta tensão, com o aumento ainda maior da utilização de isoladores e uma variedade cada vez mais crescente de materiais e formas para isoladores.

---

No Brasil, o grande precursor dos isoladores foi o barão de Capanema que instalou muitas linhas de telégrafos no país e contribuindo para a evolução dos isoladores ao inventar um isolador mais apropriado e resistente ao clima e a umidade brasileira.

### 2.4.3 Teoria Básica

Polímeros são compostos químicos de elevada massa molecular e de grandes cadeias. Os polímeros são então macromoléculas formadas por unidades básicas os monômeros, em si os polímeros são vários monômeros ligados formando uma longa cadeia que se repete.

Existem polímeros naturais (encontrados na natureza) e polímeros artificiais. Como exemplo de polímeros naturais encontramos o DNA e RNA (presentes na maioria das células do nosso corpo), temos também a borracha retirada das seringueiras.

Já os polímeros artificiais ou sintéticos são formados por reações de polimerização, que são reações onde as moléculas menores (monômeros) se combinam por valências principais para formar as moléculas mais longas, mais ou menos ramificadas, porém com as mesmas composições centesimais.

Os polímeros também podem ser divididos em termoplásticos, elastômeros, e termorrígidos.

Termoplásticos são os mais comuns em nosso dia a dia sendo encontrados em vários objetos, estes formam a maioria dos plásticos conhecidos. Eles recebem esse nome, pois em altas temperaturas eles apresentam uma alta viscosidade podendo facilmente ser moldados. Através destas características estes polímeros podem ser facilmente recicláveis ao contrario dos termorrígidos.

Os termorrígidos são uns tipos de polímeros que apresentam uma alta estabilidade a variações de temperatura, no entanto se expostos a temperaturas muito elevadas será promovido a decomposição do material sendo assim muito difíceis de serem remodelados gerando uma grande dificuldade de reciclagem destes materiais.

Elastômeros são uma classe intermediária entre os tipos apresentados anteriormente eles não são fusíveis, mas apresentam uma alta elasticidade, em temperaturas ambiente podendo ser esticados a duas ou até três vezes seu tamanho inicial retornando rapidamente ao seu tamanho inicial após retirada a tração. Estes são comumente conhecidos como as borrachas.

Materiais poliméricos são cada vez mais utilizados para as mais diversas tarefas, pois apresentam uma grande durabilidade. Os plásticos dominam o mercado mundial de

---

mercadorias, por serem resistentes e especialmente muito mais leves que outros materiais como metais e madeiras. Eles também são ótimos isoladores térmicos e elétricos. Um exemplo disto é que antigamente os fios elétricos eram revestidos com cerâmicas e hoje são revestidos com plásticos uma vez que os plásticos são mais flexíveis que as porcelanas e mantendo um mesmo nível de isolamento o que é imprescindível.

#### 2.4.4 Problemas Ambientais

Os isoladores poliméricos não apresentam um sério risco para a natureza, mas também não contribuem para a reciclagem completa dos materiais poliméricos.

Lembrando que os polímeros são em sua maioria inertes e como as camadas de polímeros nos isoladores são em sua maioria de silício e de polímeros do tipo elastômeros, estes são materiais não totalmente recicláveis pois apresentam características de rompimento antes da fusão. Isso se torna um problema, pois técnicas mais avançadas tem que ser aplicadas para a recuperação das estruturas que compõem os polímeros para a reutilização destes materiais.

Se deixados na natureza eles demoram centenas de anos para se decompor, pois são altamente inertes o que levaria um acúmulo de material não biodegradável na natureza.

Isoladores poliméricos já são um avanço entre seus rivais, pois apresentam grandes vantagens como o peso e maior resistência a tração, no entanto os pesquisadores apostam em uma grande evolução nos tipos de silicone para apresentarem uma melhor resistência ao tempo e um material que seria uma borracha auto limpante para evitar o acúmulo de materiais que podem danificar os polímeros como a poluição.

Estes são os avanços no campo de isoladores, mas em diversas áreas os polímeros se destacam cada vez mais, existem pesquisas para a produção de polímeros emissores de luz para fabricação de monitores, como músculos artificiais de polímeros, e também polímeros para células de combustível.

#### 2.4.5 Detalhe Construtivo

##### 2.4.5.1 O Núcleo

O núcleo é composto de uma haste de fibra de vidro reforçada (FRP – Fiber Reinforced Plastic Rod), constituída de fibra de vidro e uma resina plástica impregnante, que pode ser poliéster, vinil ou epóxi. O núcleo deve suportar os esforços mecânicos impostos pelo peso do

cabo, vibrações eólicas, etc., sem afetar suas propriedades elétricas isolantes. Na Figura 13 pode ser visto um isolador com parte do núcleo aparente.

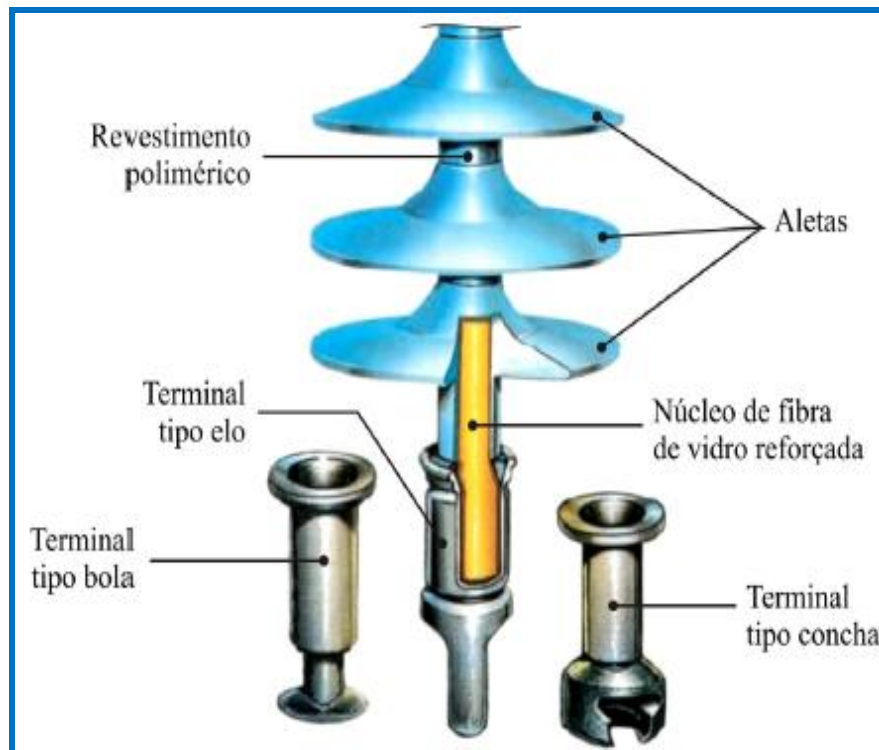


Figura 13 - Constituição de um isolador polimérico (Rodurflex, 2004).

#### 2.4.5.2 O Revestimento

Um composto especial de borracha é aplicado sobre o núcleo do isolador, com o intuito de protegê-lo contra agentes externos (umidade, contaminadores químicos, radiação ultravioleta, etc.), assegurando a inviolabilidade do núcleo. Também fazem parte do revestimento, as aletas que são encarregadas de suprir as distâncias elétricas de escoamento necessárias para um bom desempenho nas condições normais de operação, principalmente em ambientes poluídos e úmidos.

Durante o desenvolvimento da tecnologia dos isoladores, foram testados pelos fabricantes vários materiais na constituição das aletas, vários projetos construtivos, e vários métodos de construção. Os materiais básicos utilizados nas aletas do polímero são borracha de: silicone (silicone rubber - SIR), etileno-propileno-metileno (EPM), etileno-propileno-dieno-metileno (EPDM), epóxi cicloalifática (CE), acetato de vinil-etileno (EVA) e politetrafluoretileno (PTFE) (ZHAO; BERNSTORF, 1998; HALL, 1993). Para se obter as

---

propriedades elétricas e mecânicas desejadas, estes materiais básicos são combinados com os vários enchimentos. O enchimento também proporciona a redução dos custos de um isolador.

No processo construtivo, alguns fabricantes dão forma a uma bainha que envolve a haste, depois deslizam as aletas na bainha e então as vulcanizam. Outros fabricantes usam um processo contínuo do molde para dar forma a um invólucro contínuo na haste de fibra de vidro, já incluindo as aletas. Em todos os métodos, ao final do processo, há presença de rebarbas indesejáveis de material polimérico. Tais rebarbas concentram campo elétrico e podem ocasionar erros de diagnóstico em inspeções de infravermelho e ultravioleta (NERI, 2005).

#### 2.4.5.3 As Ferragens

As ferragens terminais são os componentes metálicos do isolador, cuja função é transmitir ao núcleo os esforços mecânicos do condutor, fazendo as interligações condutor/isolador e isolador/estrutura. O formato da ferragem também é importante para equalizar o campo elétrico em torno do mesmo, evitando possíveis descargas corona ou estresse elétrico no material. Anéis equalizadores de campo elétrico são vastamente utilizados em conjunto com as ferragens para tornar a distribuição de campo mais uniforme, principalmente em isoladores utilizados em linhas de subtransmissão com classe de tensão nominal igual ou superior a 69kV.

#### 2.4.6 Algumas Técnicas de Inspeção

##### 2.4.6.1 Inspeção Termográfica

A inspeção termográfica (termografia) é uma técnica não destrutiva que utiliza os raios infravermelhos para medir temperaturas ou observar padrões diferenciais de distribuição de temperatura, com o objetivo de propiciar informações relativas à condição operacional de um componente, equipamento ou processo. A termografia se apresenta como uma técnica de inspeção extremamente útil, uma vez que permite realizar medições sem contato físico com a instalação, verificar equipamentos em pleno funcionamento e inspecionar grandes superfícies em pouco tempo.

O equipamento utilizado nas inspeções termográficas é o termovisor, que é capaz de representar graficamente a emissão de radiação infravermelha de objetos. Após a coleta das imagens termovisivas, realiza-se a comparação entre imagens de equipamentos perfeitos e

equipamentos que apresentam gradientes de temperatura suspeitos, podendo detectar assim os defeitos. Existem softwares desenvolvidos para a posterior análise das informações termográficas obtidas, permitindo que os dados sejam empregados em análises preditivas (FLIR, 2006).

Um aspecto importante na realização de inspeções termovisivas é a emissividade do material. Trata-se da relação entre o poder emissivo de um corpo qualquer e a de um corpo negro, podendo ter um máximo igual à unidade (corpo negro), e um mínimo igual a zero (WANDERLEY NETO et al., 2006). Um ajuste de emissividade equivocado no termovisor pode levar a conclusões equivocadas, prejudicando a tomada de decisão. A figura 14 mostra um exemplo de imagem termográfica e de um aparelho de termovisão.

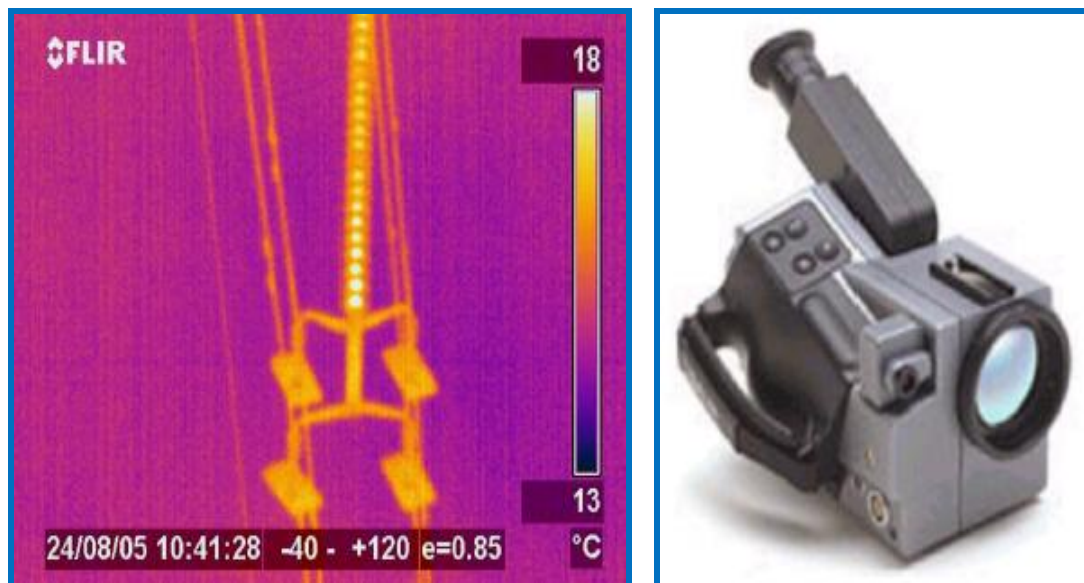


Figura 14 - (a) imagem com visualização de pontos quentes e (b) exemplo de termovisor (Tarso Ferreira , 2007).

#### 2.4.6.2 Inspeção por Detecção de Radiação Ultravioleta

As descargas corona ocorrem em torno de um eletrodo energizado, quando a energia do campo elétrico criado pelo mesmo ultrapassa a energia de ionização do meio isolante (gás). As descargas corona podem provocar a degradação das características do material. Elas geram ondas de ultra-som, radiação ultravioleta, ozônio, oxigênio, erosão mecânica da superfície, ondas eletromagnéticas na faixa de radio recepção, entre outros fenômenos (BARTNIKAS and McMAHON, 1979). Existem diversas maneiras de detectar a descarga corona através de suas diversas manifestações, supracitadas. É possível identificar, com exatidão e sem uso de equipamentos detectores, o local onde ocorrem as descargas corona pela emissão de luz e pelo

seu ruído, entretanto, tal procedimento restringe-se a ambientes silenciosos e com pouca luminosidade, e a descargas relativamente intensas. Para detectar visualmente descargas de pequena intensidade é necessário utilizar um equipamento especial, o detector de ultravioleta (detector de corona).

A visão humana é sensível à radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 400 e 700 nm. Este intervalo é o da luz visível. Os comprimentos de onda mais curtos correspondem à luz violeta, e os mais longos à vermelha (TIPLER, 1995). A faixa do espectro que corresponde à radiação ultravioleta se localiza entre 380 nm e 1 nm. (WIKIPEDIA, 2007a).

As descargas corona emitem radiação entre 230 e 405 nm no ar. Na Figura 15 apresenta-se um gráfico típico da emissão de radiação eletromagnética produzido pela descarga corona no ar. É importante notar que a intensidade relativa encontra-se multiplicada por 100, na faixa de 200 a 290 nm. O detector de corona capta radiação de 240 até 280 nm, apesar de ser uma faixa em que a intensidade da emissão é relativamente menor que na faixa de 280 a 400 nm. Na faixa de 240 a 280 nm a radiação solar não consegue atingir a superfície da terra, devido à camada de ozônio. Assim o detector de corona pode detectar descargas corona durante o dia (LINDNER et al., 1999). Entretanto, as medições de corona em ambientes chuvosos são fortemente influenciadas, devendo ser evitada (De NIGRIS, 2004). As medições de corona também são prejudicadas pela presença da névoa.

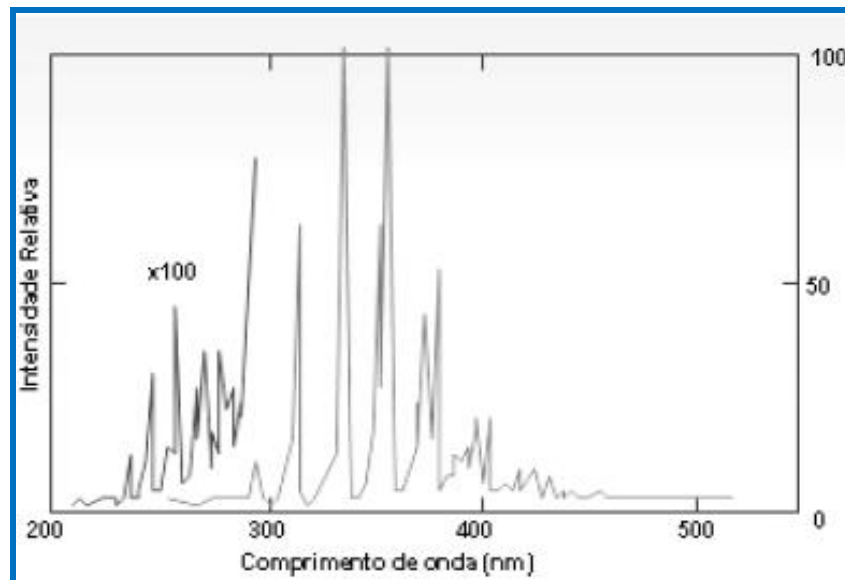


Figura 15 - Espectro típico de uma descarga corona no ar (LINDNER et al., 1999).

O detector de corona possui duas câmeras acopladas, uma câmera comum e outra para captar as imagens na faixa de ultravioleta, na qual ocorre a emissão de sinais de descarga corona. Os sinais são processados separadamente por processadores digitais. As câmeras são alinhadas para que registrem a mesma imagem e gerem dois sinais de vídeo (PAL ou NTSC). Os sinais podem ser exibidos separadamente ou de forma composta, permitindo a perfeita localização do ponto onde ocorre o corona (LINDNER et al., 1999). Na Figura 16 é possível observar um diagrama esquemático que ilustra o princípio de funcionamento do detector de corona. A imagem ultravioleta passa por um filtro de radiação solar de faixa estreita e vai diretamente para o detector de ultravioleta, enquanto a imagem visível é refletida pelos espelhos E1 e E2 e finalmente captada pela câmera de vídeo convencional. O filtro de radiação solar é utilizado para assegurar que os sinais luminosos fora da faixa de 240 a 280 nm não serão detectados, eliminando assim a sensibilidade à radiação solar. A alta filtragem da luz visível permite intensificar a imagem ultravioleta até que se consiga observar individualmente os fótons (LINDNER et al., 1999). A figura 17 mostra o equipamento de detecção de UV e a imagem detectada por este.

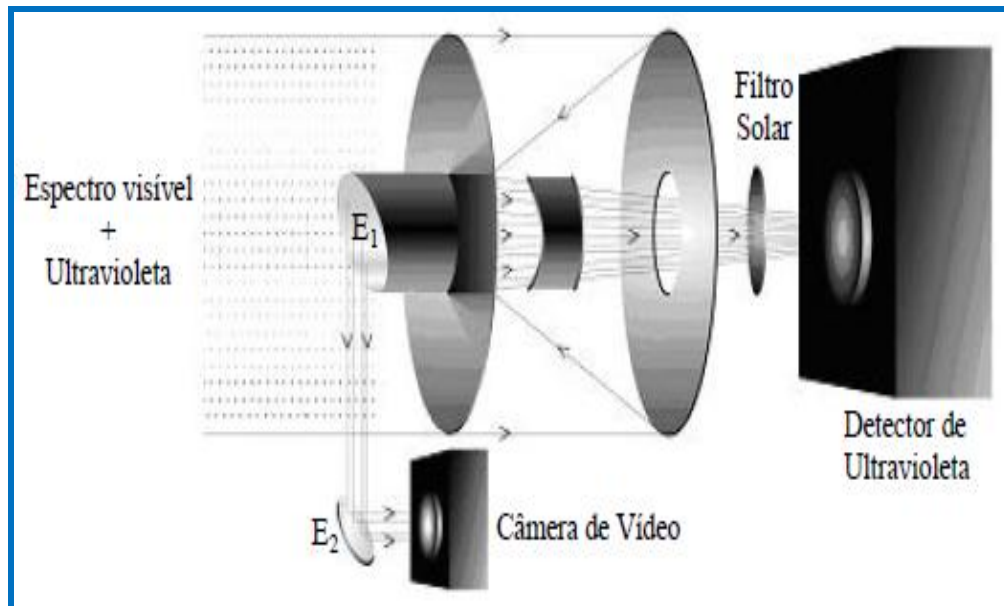


Figura 16 - O detector de corona dispõe de um sistema de contagem das ocorrências de descargas, podendo quantificar a intensidade de descargas corona numa determinada região. Esta contagem de ocorrência de descargas pode ser utilizada no trabalho como parâmetro de avaliação (Tarso Ferreira , 2007).



Figura 17 - (a)imagem com visualização de pontos de UV e (b)equipamento detector de UV (Tarso Ferreira , 2007).

#### 2.4.6.3 Inspeção por Detecção de Ultrassom

Consiste de um instrumento o qual possui um indicador e um alto-falante, conectado a um sensor-transdutor de ultra-som para som audível, tubo detector direcional, dispositivo de concentração do som e adaptador para fixação do alto-falante à cabeça ou digitalizador. Na Figura 18, adaptada a partir do catálogo BIDDLE (1990), é ilustrado o sensor a ser utilizado, na qual o tubo detector indicado amplifica os sinais internos ao tubo de captação e rejeita os externos. O transdutor de ultra-som é sensível a uma faixa de frequência de 35 a 45 kHz e faz a conversão dos sinais captados para sons audíveis, que são transmitidos para o digitalizador. Este mesmo transdutor é muito pouco sensível a sons audíveis, permitindo o seu uso em áreas com alta intensidade de ruídos de fundo na última faixa de frequência. O medidor de saída, para indicar a intensidade do ultra-som, é calibrado numa escala linear de 0 a 10, apresentando nível relativo. O diâmetro focal do tubo de captação é 30 cm, possuindo um alcance de 10 m. A figura 19 a e b mostra um equipamento detecção de ultrassom e um sinal típico capturado de um isolador, respectivamente.

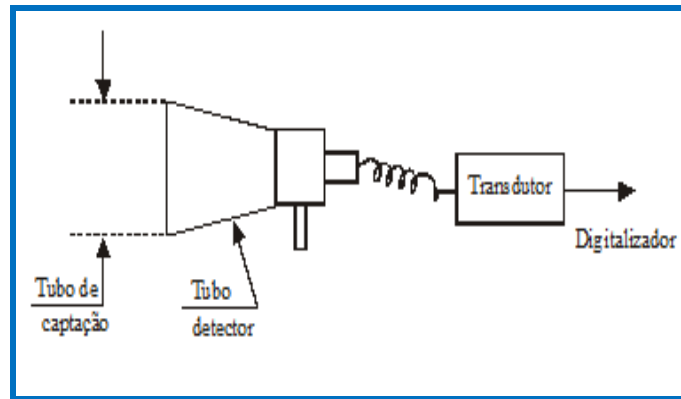


Figura 18 - Ilustração do funcionamento do sistema de detecção de ultra-som (Biddle, 1990).

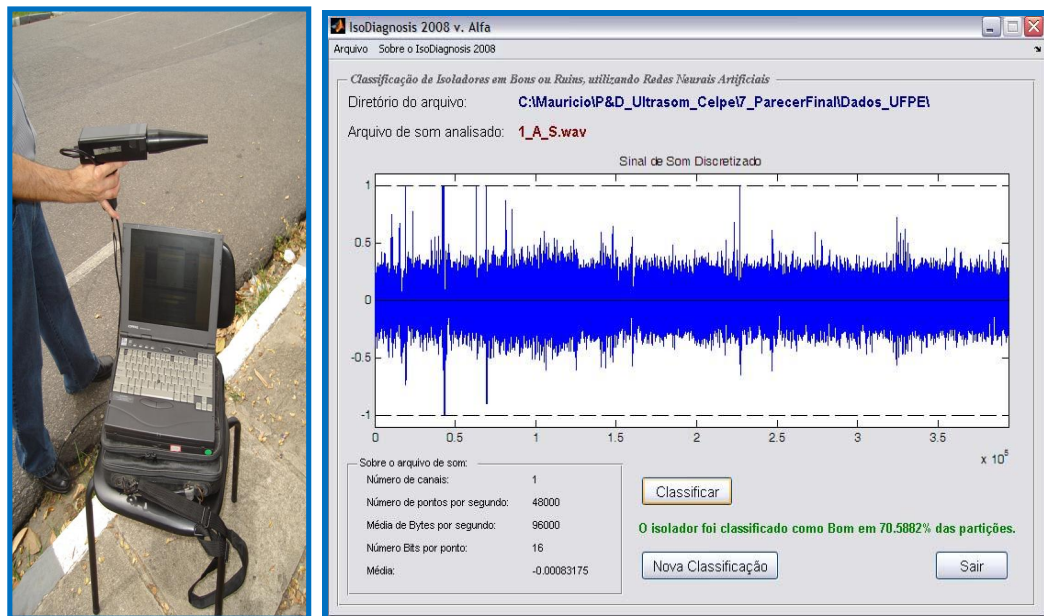


Figura 19 - (a) equipamento detector de ultrassom (b) sinal de ultrassom capturado de um isolador.

#### 2.4.7 Distribuição do Campo Elétrico

É bem entendido que os campos elétricos elevados podem conduzir a coroa e a atividade de descarga de superfície, o que pode contribuir para a degradação prematura do material de isolamento. Controle de altos campos elétricos em isoladores poliméricos, particularmente próximo de ambos isolantes terminais, é extremamente importante para minimizar esses efeitos indesejáveis, garantindo desempenho satisfatório durante o período de serviço. A figura 20 mostra o perfil típico de distribuição de campo elétrico e potencial elétrico num isolador polimérico.

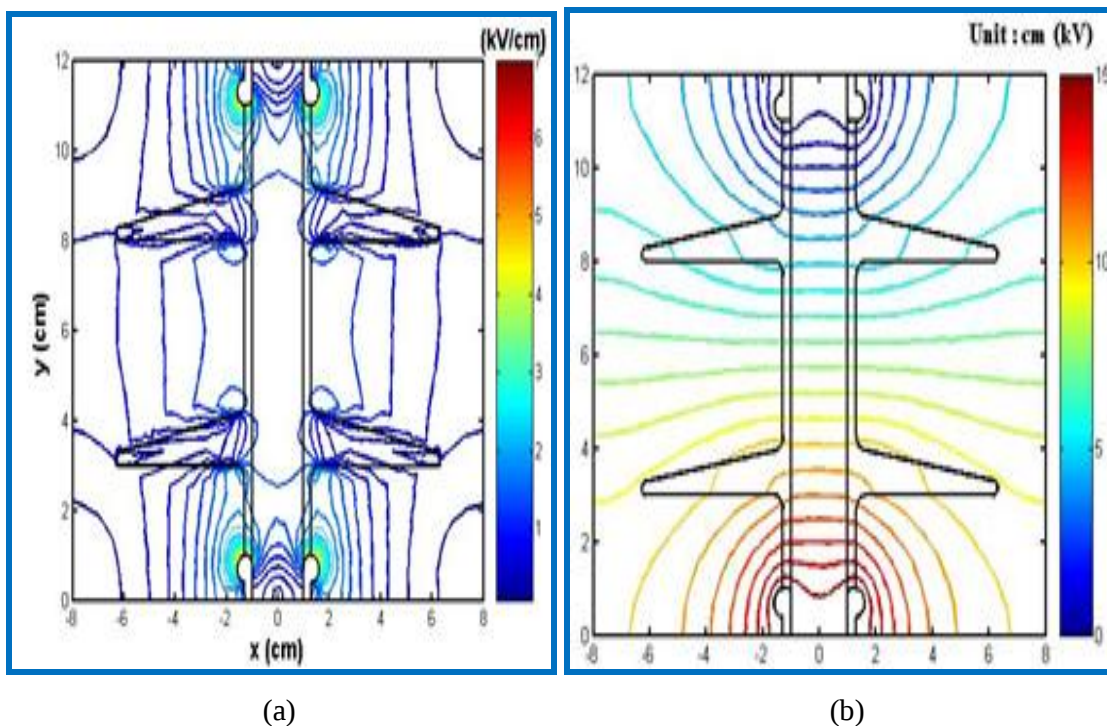


Figura 20 - (a) Distribuição do campo elétrico num isolador polimérico; (b) Distribuição do potencial elétrico num isolador polimérico.

#### 2.4.7.1 Anel de Equalização

O anel de equalização é um dispositivo comum usado para controlar o estresse do campo na alta tensão e os terminais de terra. Instalação em isoladores pode efetivamente reduzir campos de alta intensidade em áreas críticas sobre a superfície de isolamento e os terminais metálicos. O anel com bordas arredondadas suaves diminui a magnitude do campo abaixo do limiar de início de coroa, e minimiza a possibilidade de ruptura em tensões mais elevada. Além disso, a presença do anel de equalização pode também deslocar o campo elevado a uma curta distância a partir da área vulnerável em torno da junção tripla, metal-ar-dielétrico. A Figura 21 indica claramente significativas reduções de campo para uma gama de tensões quando se utiliza o anel de equalização. Alguns autores sugerem que uma única coroa de anel na extremidade de alta tensão seja suficiente para um sistema de energia de até 220 kV. No entanto, anéis adicionais em ambas as extremidades do isolador são necessários para os sistemas que operam a 400 kV ou superior.

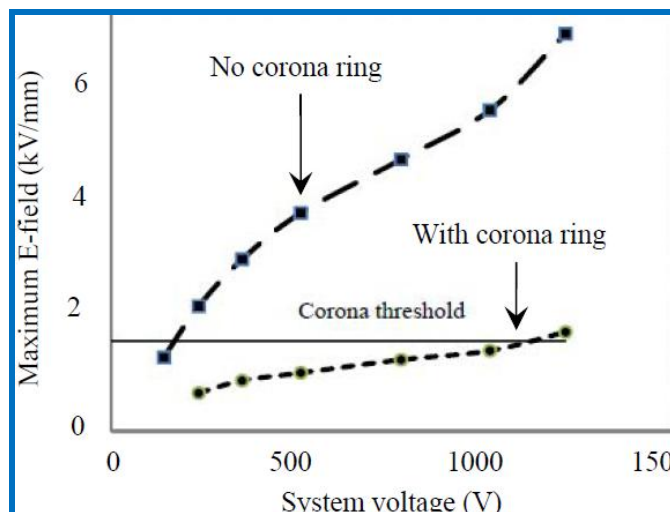


Figura 21 - Comparação de campo elétrico máximo para o sistema com e sem anel corona.

Potenciais elétricos e distribuições de campo sobre a superfície do isolador, especialmente perto dos terminais podem ser regulados por meio de parâmetros de concepção do anel diferentes, tais como a secção transversal diâmetro do raio do anel, e a distância entre os conectores. Alguns trabalhos publicados mostram que um tubo de secção transversal grande contribui para a redução do campo eléctrico na área da junção tripla. O aumento no diâmetro do anel e a distância a partir de grupos de topo também resultam em melhorias de campo para certas medidas nestas regiões de alto campo. A figura 22 mostra um isolador polimérico com dois anéis anti-corona.

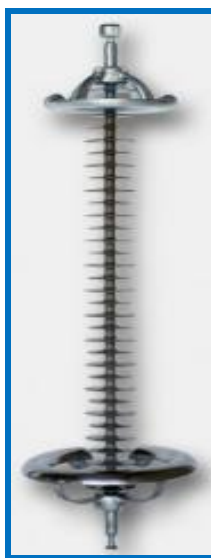


Figura 22 - Isolador polimérico com dois anéis anti-corona.

#### 2.4.7.2 Projeto e Montagem do Isolador

Um projeto e uma montagem adequados podem proporcionar uma efetiva redução do campo elétrico em torno dos eletrodos metálicos. Bordas lisas e arredondadas no terminal ajuda a concentrar o campo, semelhante para o efeito obtido pelo anel de corona. A Figura 23 mostra exemplos de final de montagem e desenho com as formas de saliência perto do invólucro de isolamento que são comumente utilizados. A redução do campo elétrico na superfície do isolador pode ser intensificada através do aumento do raio do invólucro polimérico.

#### 2.4.7.3 Perfil do Revestimento Polimérico

Diferente do desenho final apropriado, a forma geométrica do invólucro polimérico injetado é igualmente importante no controle da distribuição de campo do isolador. O campo elétrico ao longo do comprimento axial do invólucro é usualmente ampliada no ponto de intersecção nas superfícies onde existem arestas afiadas na curvatura. As regiões que estão perto do encontro eletrodo de metal tem o maior impacto na intensidade do campo. A redução do impacto a estas junções críticas podem ser alcançados através da utilização de invólucro polimérico com um grande arco de raio. Isto resulta na redistribuição das linhas equipotenciais sobre uma área de superfície maior, reduzindo assim os picos de tensão e de campo. Se o raio é suficientemente grande, os arcos entre duas aletas do isolador irão fundir para formar uma superfície arredondada nas regiões de haste.

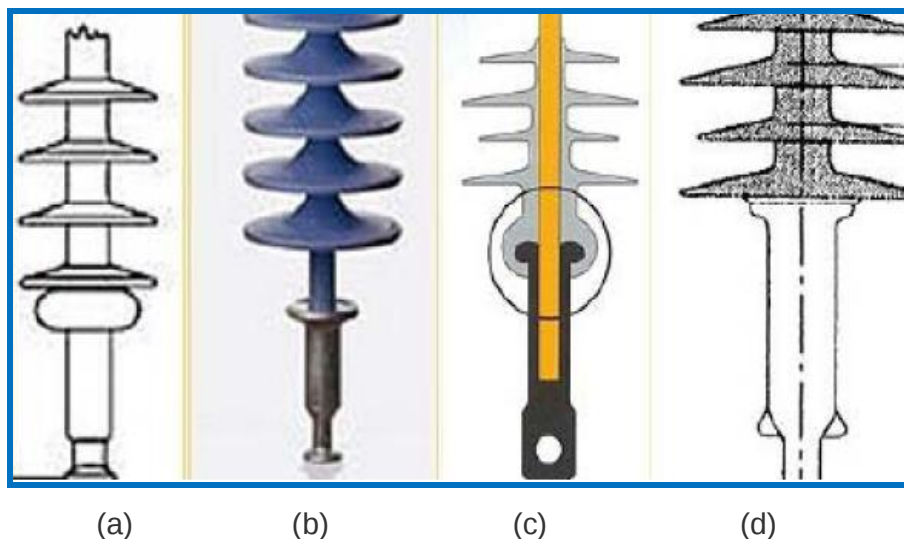


Figura 23 - Desenhos Típicos de isoladores poliméricos. (a) Interfaces com conexão estreita arredondada; (b) Interfaces com montagem em uma curta distância; (c) Interfaces com montagem final arredondado completamente coberto por borracha de silicone; (d) Interface com conexão estreita.

---

Chakravorti et al. realizou extensos estudos paramétricos para investigar o efeito de parâmetros de projeto de isoladores, como ângulo de inclinação injeção, diâmetro, comprimento do raio do núcleo e raio do arco. Os resultados dos cálculos numéricos mostraram o efeito do alívio do estresse ao aumentar comprimento axial do isolador, bem como a abertura do raio das aletas. No entanto, o aumento do raio do núcleo provoca um aumento do campo na superfície do isolador.

## 2.5 PROCESSO DE FALHA EM ISOLADORES COMPÓSITOS

### 2.5.1 Por Disrupção Dielétrica Interna

Embora indesejável a disrupção dielétrica em isoladores compostos é um fenômeno relativamente comum e apresenta as mais variadas causas. Seu surgimento se dá de forma externa e interna. Este primeiro apresenta diversas causas e é mais fácil de detectar e controlar. As circunstâncias ambientais são os principais aspectos que levam ao início do seu acontecimento. Fatores como a condição do isolador e os esforços elétricos e mecânicos também podem contribuir seja de forma isolada ou conjunta. Já o segundo na maioria das vezes não apresenta sinais algum e só é percebido quando se tem a perda definitiva do isolador. Diversos estudos têm sido feitos nas várias regiões do mundo e indicam que seu surgimento se dá devido a falhas de fabricação as quais permitem penetração de umidade nas interfaces, sejam elas entre a ferragem e o revestimento polimérico e revestimento polimérico e o núcleo de fibra de vidro. Progressivamente estas descargas vão dando origem a caminhos carbonizados que diminuem a rigidez dielétrica do isolador até sua completa falha. A figura 24 mostra exemplos de descargas elétricas internas e externas.

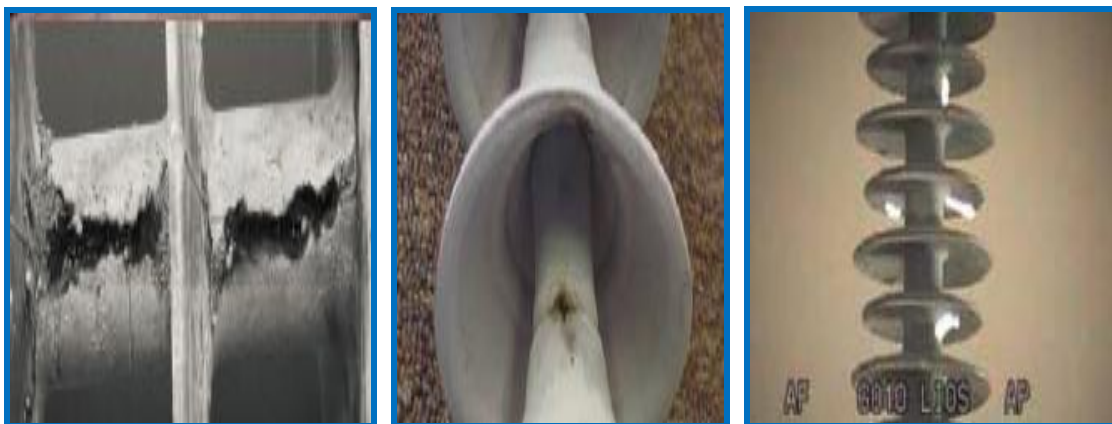


Figura 24 - Descargas elétricas internas e externas em isoladores. (Tarso Ferreira et al, 2007).

---

#### 2.5.1.1 Descargas Parciais

A descarga parcial é uma descarga elétrica que ocorre em uma região do espaço sujeita a um campo elétrico, cujo caminho formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa (KREGUGER, 1989). A ocorrência de uma descarga depende da existência de cargas livres (elétrons e ou íons positivos) numa determinada região do espaço e um campo elétrico intenso o suficiente para acelerar as cargas livres como energia necessária para iniciar um processo de avalanche. As descargas parciais podem ser classificadas como: descarga parcial interna, descarga parcial superficial e descarga corona (SWINKA;IEC270, 1881; SILVA, 2005).

As internas ocorrem no interior de vazios ou inclusões de material dielétrico, onde um vazio está totalmente circunda pelo dielétrico ou na interface entre o dielétrico e um eletrodo. A inclusão é formada por caminhos condutores como arborescência elétrica como mostra a figura 25, sendo canais preenchidos por materiais com propriedades condutoras, em geral, carbono resultante das reações químicas das moléculas do polímero sob ação das descargas e vazios preenchidos com gases também resultantes dessas reações. Dento desses vazios também ocorrem descargas parciais que aceleram o processo de crescimento da arborescência levando o maerial à ruptura dielétrica (SWINKA, 2000; SILVA, 2005).

Na descarga parcial superficial a descarga ocorre na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo de um eletrodo para a superfície. Quando o campo elétrico paralelo à superfície excede certo valor crítico, inicia-se o processo de descraga superficial (KREUGER, 1989). Assim como as descargas internas, as descargas superficiais ocasionam alterações na superfície iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Estes caminhos condutores conhecidos como trilhamento também podem levar o isolamento à ruptura total.

No efeito corona as descargas parciais ocorrem no ar e partindo de pontas agudas (partes com pequenos raios de curvatura) em eletrodos metálicos. Em eletrodos de alta tensão como pontas agudas, criam regiões na vizinhança do condutor com campo elétrico elevado, o qual ultrapassa o valor crítico, dando origem a descargas parciais (KREUGER, 1989; KUFFEL, 1990; SWINKA, 2000; SILVA, 2005). Quando a tensão aplicada é alternada com forma senoidal, a descarga parcial corona pode ser facilmente identificada devido a sua ocorrência inicial localizar-se no máximo do semi-ciclo negativo da tensão aplicada. Isto se

---

deve ao fato de um eletrodo metálico disponibiliza elétrons no ar na região próxima do eletrodo (nuvem eletrônica).

#### 2.5.1.1.1 Princípio da Detecção de Descargas Parciais

Por dar origem a uma série de fenômenos físicos e químicos, as descargas parciais podem ser detectadas utilizando alguns métodos apresentados a seguir:

- Fenômenos Elétricos (perdas dielétricas e implusos elétricos);
- Radiação Eletromagnética;
- Luz;
- Calor;
- Ruído Acústico;
- Pressão de Gases;
- Transformações Químicas.

Dentre os fenômenos citados, é utilizado com mais frequência na detecção de descargas parciais o fenômeno elétrico, por sua maior sensibilidade, mas em qualquer dos métodos de detecção é necessário determinar a ausência ou a presença de descargas parciais, medindo sua magnitude onde é necessária uma calibração do sistema de medição, buscando a determinação do local de ocorrência de descargas parciais, o qual pode ser utilizado o método de propagação de pulsos de descargas parciais e determinar o perigo produzido pelas descargas parciais, avaliando a vida útil em função das mesmas, não sendo todavia esta uma tarefa fácil (TEIXEIRA, 1984).

#### 2.5.1.1.2 Detecção de Descargas Parciais por métodos elétricos

A detecção dos pulsos de descargas parciais através de métodos elétricos é muito utilizada. Existe uma grande variedade de circuitos de detecção destas descargas. A configuração destes circuitos deve favorecer a propagação do pulso e otimizar a sua detecção. Esses circuitos são baseados em um modelo, que é mostrado na figura 25 (SWINKA, 2000; TEIXEIRA, 1984).

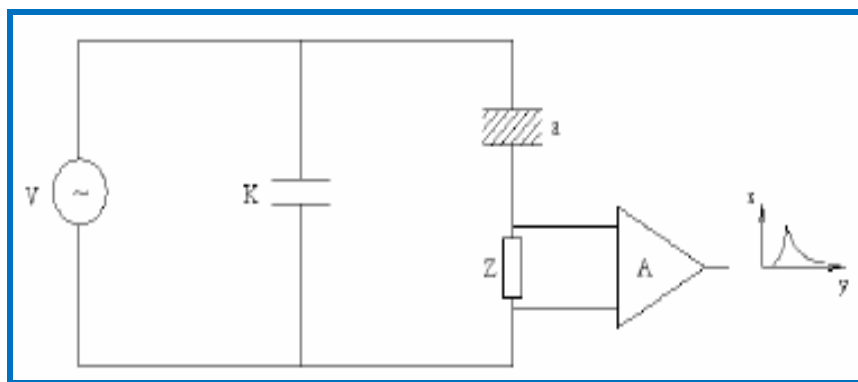


Figura 255 - Representação de eletrodo metálico com ponta aguda gerando descarga corona (Swink et al , 2000).

No circuito é utilizada uma fonte de alta tensão alternada  $V$  fornecendo alimentação para o circuito. Em geral as fontes de alimentação de alta tensão utilizam transformadores elevadores de tensão e estes apresentam alta impedância para pulsos de alta frequência. Para que o pulso de corrente devido a descarga parcial possa se propagar e ser detectado na impedância de medição  $Z$ , um capacitor de acoplamento  $K$  é colocado em paralelo com a capacitância  $a$  da amostra. Desta forma, o circuito série formado por  $K$ ,  $a$  e  $Z$  é um caminho de baixa impedância para o pulso de descarga. O pulso desenvolvido na impedância de medição  $Z$  gerará uma queda de tensão que será amplificada pelo amplificador  $A$  cuja escolha da banda de passagem depende da configuração da impedância de medição utilizada (SWINKA, 2000; TEIXEIRA, 1984).

A ocorrência de descargas parciais dentro de um vazio causa uma rápida transferência de cargas entre as superfícies opostas do vazio, na direção do campo elétrico aplicado. Esta transferência de cargas implica em um novo arranjo das cargas na amostra como um todo e, como consequência, aparece um pulso de corrente no circuito externo do qual a amostra faz parte. Em geral o pulso de corrente apresenta uma largura média na ordem de dezenas de nanosegundos e a frente do pulso com tempos de subida na ordem de picosegundos (SWINKA, 2000; TEIXEIRA, 1984; SILVA, 2005).

Uma outra variação deste circuito de detecção é colocar a impedância de medição em série com o capacitor de acoplamento. Esta configuração é mais utilizada para medidas em equipamentos com operação contínua, quando não é possível desconectar o condutor de aterramento (SWINKA, 2000; TEIXEIRA, 1984).

Através do sistema de análise de descargas parciais é possível localizar e identificar a origem dos pulsos. É conhecido que as descargas parciais internas em uma cavidade ocorrem

em regiões particulares da onda de impulso senoidal, com formações entre as regiões de maior ingremidade da onda de tensão, ou seja, na região em torno de 0 e de 180 graus elétricos.

Nos detectores atuais é possível sincronizar os pulsos de DP com a tensão aplicada ao objeto de teste, permitindo assim mais um recurso na identificação da ocorrência das DP. Em psciloscópio de base elíptica as descargas parciais internas a uma cavidade no dielétrico segue um padrão como mostra a figura 26 (TEXEIRA, 1984).

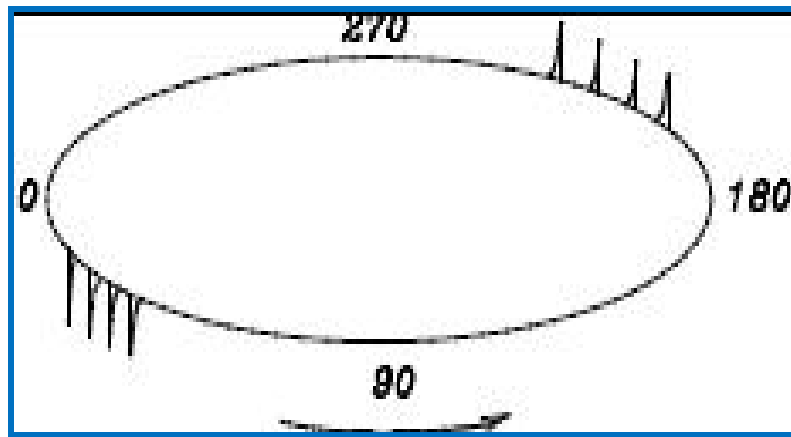


Figura 266 - Descargas parciais em uma cavidade visualizadas em osciloscópio de base elíptica (Teixeira, 1984).

Outros tipos de perturbação possuem um padrão bastante conhecido, principalmente o fenômeno corona.

#### 2.5.1.1.3 Condições para Ocorrência de Descargas Parciais Internas

A ocorrência de descargas parciais no interior de defeitos em materiais poliméricos depende a princípio de dois fatores: a) o campo elétrico total (campo no interior do vazio) deve ultrapassar um certo valor crítico e b) deve haver elétrons livres o suficiente para iniciar o processo de avalanche (SWINKA, 2000; SILVA, 2005).

#### 2.5.1.1.4 Influência do Campo Elétrico Total

Para que ocorram descargas parciais no interior de defeitos presentes num dielétrico é necessário que o campo elétrico total ultrapasse um certo valor de campo elétrico crítico, este processo pode ser visto de forma análoga ao processo de descargas entre eletrodos metálicos, dada pela curva de Paschem conforme figura 27. (KREUGER, 1989; KUFFEL E ZAENGL, 190; SWINKA, 2000; PICOT, 2003; SILVA, 2005).

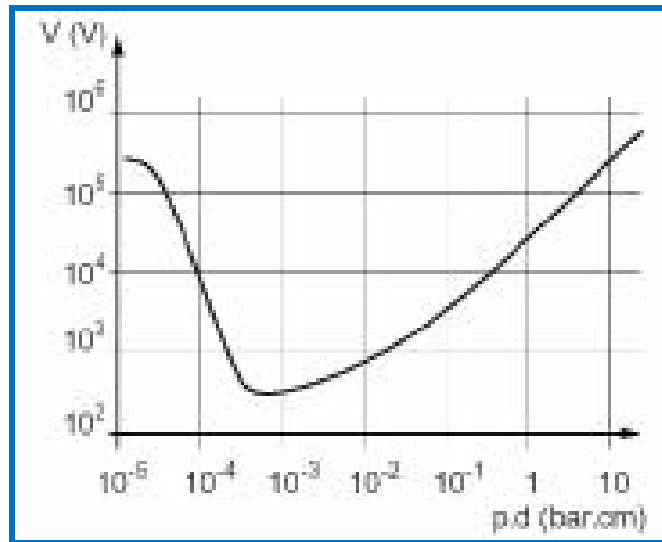


Figura 277 - Evolução da rigidez dielétrica no ar em função da pressão (Picot, 2003).

Nessa situação a ocorrência da descarga depende do produto da pressão pela distância entre os eletrodos. A ocorrência das descargas em vazios também depende da pressão e da natureza dos gases resultantes na formação do vazio. O campo elétrico local no interior do vazio pode ser determinado em função do campo elétrico macroscópico médio no restante do material dielétrico para vazios com geometria simples e considerando que o restante dielétrico seja homogêneo. Para um vazio plano e pouco espesso, com campo elétrico perpendicular ao plano, o campo elétrico local é dado pela equação (1) e para um vazio esférico o campo local é dado pela equação (2) como mostra a figura 28 (KREUGER, 1989; GUTFEISH E NIEMEYER, 1995; SWINKA, 2000).



Figura 28 - Relação entre o campo elétrico local e campo elétrico médio no interior do material dielétrico para um vazio plano e um esférico (Kreuger, 1989).

$$E_t = \epsilon_r \cdot E_m \quad (1)$$

$$E_t = \frac{3\epsilon_r}{1+2\epsilon_r} E_m \quad (2)$$

onde:

$E_t$  é o campo elétrico total;

$E_m$  é o campo elétrico médio;

$\epsilon_r$  é permissividade elétrica relativa.

Considerando um dielétrico com permissividade relativa igual a 2,5 e uma vazão plano com espessura de 1mm e pressão do gás no interior de 1atm e verificando a curva de *Paschen*, o campo elétrico local crítico é de 6,8kV/mm. Desta forma as descargas parciais neste defeito devem iniciar para um campo elétrico médio acima de 2,7KV/mm. Este campo elétrico é inferior aos campos elétricos normalmente utilizados em sistemas de isolamento.

#### 2.5.1.1.5 Geração de elétrons iniciais

A ocorrência das parciais também depende da disponibilidade de elétrons livres na região do vazio onde o campo elétrico local está acima do campo elétrico crítico. Estes elétrons são necessários para dar início ao processo de avalanche e podem ser gerados quando ainda não ocorreram descargas no vazio, isto é, no vazio virgem. A primeira descarga dependerá da geração de elétrons livres através da foto-ionização do gás no interior do vazio. A foto-ionização depende da interação da radiação cósmica ou da radiação natural do meio (radiação de fundo) com o gás no interior do vazio ou com a própria superfície do vazio. Medidas do tempo de atraso para ocorrência da primeira descarga em vazios virgens, mostram estar de acordo com o tempo de atraso (time lag) calculado (GUTFLEISCH e NIEMEYER, 1995), levando-se em consideração a probabilidade de interação dessas radiações com o vazio. A probabilidade de interação é proporcional ao volume do vazio, à densidade do gás e à densidade de fluxo de radiação. Outro mecanismo que poderá gerar os elétrons iniciais seria a emissão por campo pela superfície interna do vazio. Este segundo mecanismo é pouco provável devido a eleva a função trabalho apresentada pelas superfícies lisas dos materiais poliméricos (GUTFLEISCH NIEMEYER, 1995; SWINKA, 2000).

#### 2.5.1.2 Trilhamento Elétrico

O interesse crescente em materiais isolantes poliméricos e orgânicos para aplicações de alta tensão é devido principalmente à simplicidade na fabricação, no bom desempenho em

---

serviço e nos custos baixos destes materiais. Entretanto, a experiência em campo e em laboratório tem mostrado que quando estes materiais orgânicos são expostos a um ambiente inóspito, o trilhamento transforma-se em uma possibilidade iminente. SALAMA et al. (1992) relatam que os fatores que afetam a resistência do material isolante ao trilhamento podem ser classificados em três categorias:

- Fatores dependentes das características químico-físicas do material, tais como a força da ligação química, o peso molecular, resistividade térmica e o tipo do enchimento;
- Condições ambientais tais como contaminação, névoa, chuva e luz ultravioleta;
- Tensão aplicada e campo elétrico a que se submete o material.

O trilhamento de superfície se instala quando descargas contínuas na superfície do isolador causam pontos quentes em determinadas regiões, resultando em trajetos carbonizados que cruzam a superfície entre a alta tensão e os eletrodos do lado terra.

Estes trajetos (trilhamentos) são extremamente influenciados no tamanho e na forma pelas condições ambientais externas a que o isolador está exposto (UGUR et al., 1999).

A vida útil do isolador pode ser aumentada limpando-se a superfície contaminada antes que uma avaria total ocorra, entretanto na maioria dos casos não se sabe exatamente quais fatores ambientais reduziram a vida útil do isolador. Vários trabalhos apresentam ensaios onde uma variável da degradação é alterada, e os demais mantidos constantes, na tentativa de se isolar e correlacionar as causas e efeitos responsáveis pela degradação.

Compostos como o polietileno e o polipropileno, largamente utilizados em isoladores poliméricos, têm suas propriedades viscoelásticas degradadas quando expostos a campos elétricos intensos (CONNOR et al., 1998).

#### 2.5.1.3 Reações dos Polímeros aos Campos Elétricos

Várias publicações relatam os problemas dos nanocompostos poliméricos do ponto de vista da física, incluindo mecânica quântica e teoria eletromagnética (Lewis et al., 2004). É importante fazer um exame físico para entender inteiramente o que ocorre em polímeros nanocompostos utilizados em isolação.

As regiões do isolador polimérico mais susceptíveis a falhas são chamadas Zonas de Interação, regiões onde há contato entre dois ou mais materiais (Tanaka et al., 2004). Estas zonas de interação podem promover reações químicas entre dois ou mais materiais, abrigar cavidades gasosas, falta de aderência, caminhos para a entrada de umidade, dentre outros problemas. Contudo, em isoladores novos e perfeitos, as zonas de interação não apresentam

grandes riscos de falha, pois tais riscos se potencializam com o envelhecimento do material. A parcela do mecanismo de envelhecimento patrocinada pela presença do campo elétrico é matematicamente modelada pela equação eletroquímica de Lippman (Lewis et al., 1996).

Em uma interface dielétrico-eletrodo, onde se deseja calcular a tensão mecânica, a equação de Lippman estabelece que a mudança na tensão mecânica interfacial  $\Delta\gamma$  é oriunda da diferença de potencial elétrico  $\Delta V$  através da interface:

$$\Delta\gamma = -q\Delta V ,$$

em que  $\pm q$  (que em geral é função de  $V$ ) é a separação de cargas pela interface. Esta relação é comprovada laboratorialmente com o uso de interferômetros, e pode ser estabelecida de forma mais geral considerando-se o balanço entre forças elétricas e mecânicas:

$$\Delta\gamma = -\int_0^{\delta} \epsilon E^2 dz ,$$

em que,  $E$  e  $\epsilon$  são o campo elétrico e a permissividade do material, respectivamente, na posição  $z$  da interface. A largura da interface,  $\delta$ , é definida entre o eletrodo de metal e em um ponto no dielétrico. É mostrado que o campo  $E$ , normal à interface, cria uma mudança na tensão mecânica transversal que tende a expandir a interface contra as forças coercivas que estabeleceram  $\gamma$  originalmente.

Impondo-se a condição de que o campo elétrico é nulo em ambas as fronteiras metálicas que limitam o dielétrico, é possível estender a aplicação do modelo a camadas macroscópicas  $d$ . O limite superior da integral pode então ser prolongado de  $\delta$  a  $d$ . Ainda, a variação de tensão mecânica  $\Delta\gamma$  pode ser escrita em termos de estresse total do plano  $\sigma(z)$ , em que

$$\Delta\gamma = \int_0^d \Delta\sigma(z) dz ,$$

e então

$$\Delta\sigma(z) = -\epsilon(z)E^2(z) .$$

Este resultado indica que o dielétrico está sujeito em toda parte a um estresse mecânico,  $\epsilon E^2$ , tendendo a se expandir contra as forças coercivas no sentido ortogonal ao campo  $E$  em cada ponto, como representado na Figura 29.

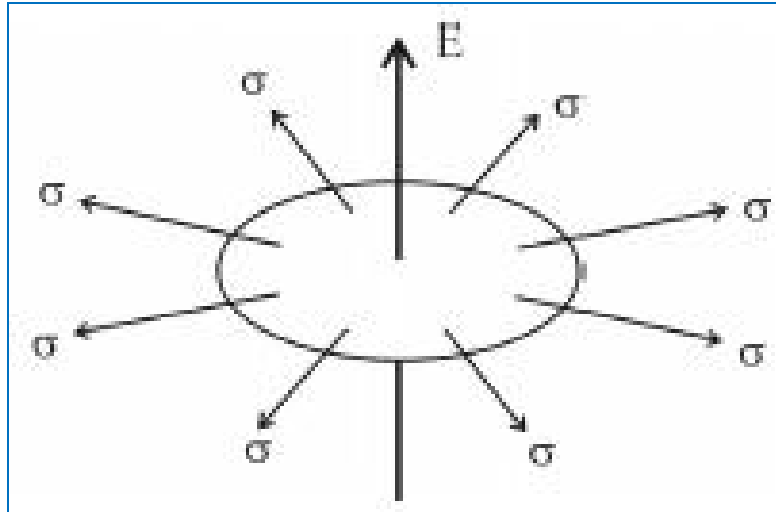


Figura 29 - Estresse tensor  $\sigma(z)$  ortogonal ao campo elétrico  $E(z)$  (Tanaka et al, 2004).

O estresse tem uma dependência quadrática de  $E$ , e assim torna-se particularmente importante nas situações onde o campo em um dielétrico é intensificado por cargas localizadas, por duplas camadas dielétricas ou por pontas do eletrodo na interface. Como a tensão mecânica tem seu sentido correlacionado ao campo elétrico, tensões elétricas alternadas promovem distensões que alternam temporalmente seu sentido. Desta forma, a degradação da interface é acelerada.

Embora o modelo apresentado seja limitado por planos condutores, pode-se extrapolar o raciocínio para interfaces mais complexas, desde que sejam conhecidos os campos elétricos nas interfaces e suas condições de contorno. Além disso, pode-se concluir que a diferença de permissividade elétrica dos materiais já é motivo suficiente para que se instalem forças contra-coercivas, que tenderão a degradar a interface.

Desta forma, se uma interface entre dois materiais diferentes fica exposta a um campo elétrico variante no tempo, há uma tendência de que estes materiais sofram micro-deformações mecânicas de diferentes intensidades. Estas micro-deformações podem facilitar a ocorrência de regiões com falta de aderência ou formação de cavidades gasosas, onde ocorrerão descargas parciais.

Quando o efeito da equação de Lippman se associa à dilatação térmica e ao envelhecimento do material nas zonas de interação, a ocorrência de descargas parciais nas cavidades geradas é facilitada. Assim, mesmo para um isolador perfeito no momento da

fabricação, problemas decorrentes das descargas parciais ou de trilhamento de núcleo podem ocorrer durante sua vida útil.

### 2.5.2 Por Fratura Frágil

Os primeiros casos de fratura frágil em isoladores poliméricos ocorreram no início de 1970. Embora ainda afete este tipo de isolador a sua contribuição é muita pequena quando comparada com os vários milhões de isoladores poliméricos instalados ao longo das linhas de transmissão. Em todo o mundo a quantidade estimada é em torno de algumas centenas de unidades. Todavia seu acontecimento é considerado um evento grave, uma vez que gera como potencial consequência a queda do condutor no solo. O fenômeno de fratura frágil foi reproduzido em laboratório logo após os primeiros acontecimentos em serviço. Percebeu-se que a aplicação simultânea de uma tração de stress mecânico e de ácido nítrico num FRP( Fiber Reinforced Plástico ) conduzem rapidamente a este tipo de falha. Esta primeira experiência influenciou todos os trabalhos feitos posteriormente para explicar o fenômeno. No entanto, recentemente, um cenário diferente mostrou que um ácido gerado pela hidrólise da resina do núcleo FRP também poderia levar ao fracasso do núcleo. O estado atual de conhecimento sobre o fenômeno de fratura frágil foi resumido em alguns trabalhos recentes. Num laboratório com simulação de agentes ácidos bem como alcalinos pode-se produzir a fratura frágil de núcleos de FRP. Portanto, para determinar a causa correta de uma fratura frágil em serviço, é necessário encontrar alguns métodos analíticos que podem ser utilizados para determinar o presença de um determinado tipo de ácido sobre a superfície de fratura dos isoladores. A figura 30 mostra exemplos típicos de fratura frágil num isolador polimérico.

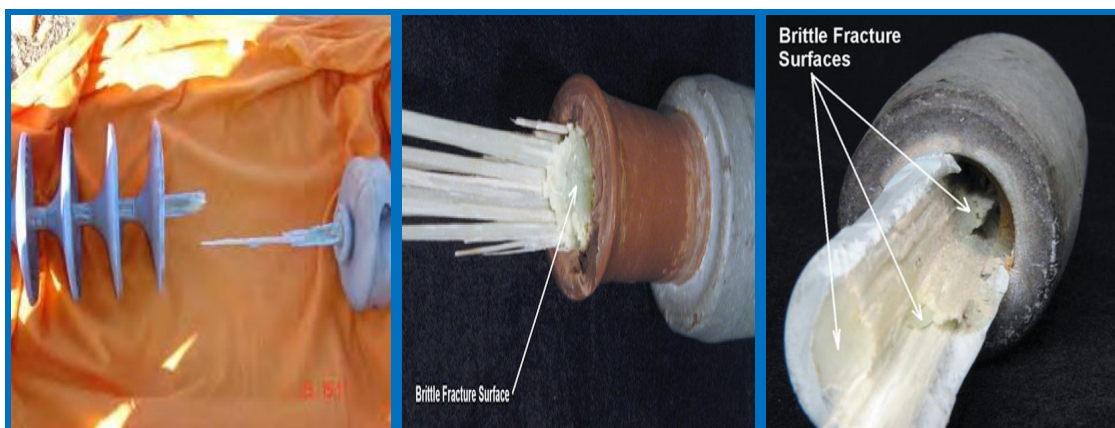


Figura 280 - Fratura frágil em isolador (Chesf, 2008).

### 2.5.2.1 O processo de Fratura Frágil

Dois fatores de estresse são necessários para obtenção da fratura frágil do núcleo de um isolador compósito. A primeira, devido à tensão mecânica, está sempre presente por causa da carga de serviço aplicada ao isolador. Já a segunda ocorre em função da presença de um ácido que entra em contato com a vara de FRP. A incerteza sobre o tipo exato e fonte de ácido no campo é a provável razão por que o problema ainda se retorna recorrente. É pouco provável que os ácidos, tais como ácido nítrico ou sulfúrico, encontrado em chuvas ácidas seria de potência suficiente para levar a isolador falhas. Além disso, para ser a causa da falha, tal fonte externa de ácido teria que ter acesso direto a haste de FRP. Isto significa que, ao longo do comprimento do isolador, o seu invólucro tenha sido danificado e não mais protege o núcleo de FRP. Também tem sido proposto que um ácido, o ácido oxálico, possivelmente, criado por descargas elétricas que ocorrem na superfície (normalmente de epóxi) de vazios muito pequenos, possivelmente, presentes no interior da haste de FRP, explicaria falhas de campo. Testes, realizada pelo CIGRE WG 22-03 indicaram que este cenário é improvável, e já não é considerado. A figura 31 mostra os fatores que levam a degradação de um isolador polimérico tipo bastão e causam fratura frágil.

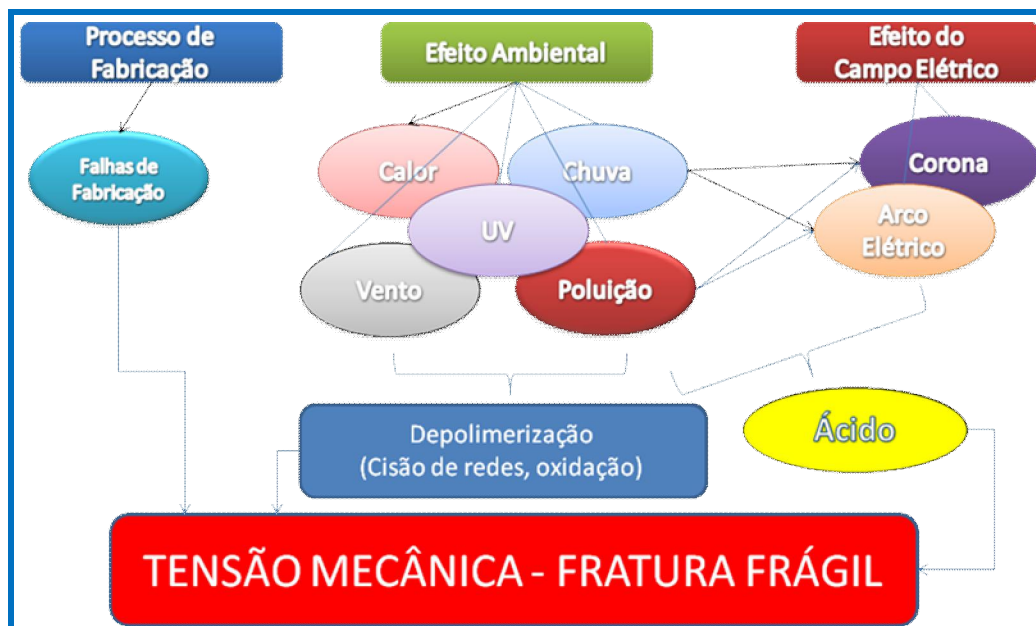


Figura 291 - Fatores que levam a degradação de um isolador polimérico tipo bastão e causam a fratura frágil.

---

Dois outros processos de falha são descritos a seguir. O primeiro envolve o ácido nítrico e o segundo um ácido gerado pela hidrólise da resina utilizada para a impregnação das fibras de vidro do núcleo de FRP.

#### 2.5.2.1.1 O cenário do ácido nítrico

Quando as descargas corona ou bandas secas ocorrem em ar úmido, o ácido nítrico, pode ser produzido. Algumas reações químicas que explica o fenômeno são:

Reações primárias:

$N_2 + O_2 \xrightarrow{\text{corona}} \text{óxidos de nitrogênio}$

$3O_2 \xrightarrow{\text{corona}} 2O_3$

Alguns exemplos de reações secundárias para criar Ácidos:

$NO + O_3 \Rightarrow NO_2 + O_2$

$2NO_2 + H_2O \Rightarrow HNO_3 (aq) + HNO_2 (aq)$

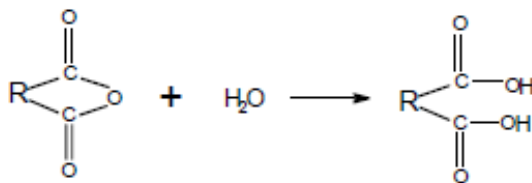
$N_2O_5 + H_2O \Rightarrow 2HNO_3$

$HNO_2 + O_3 \Rightarrow HNO_3 + O_2$

Se o núcleo de um isolador polimérico é exposto à atmosfera por causa de um invólucro danificado numa área em que o campo elétrico é tal que as descargas elétricas podem ocorrer, o ácido nítrico pode ser gerado. Desde que o ácido nítrico seja de concentração suficiente e não lavado fora por causa da chuva, uma fratura frágil pode ocorrer, dado que, em serviço, os isoladores também estão sob tensão mecânica.

#### 2.5.2.1.2 O cenário do ácido carboxílico

Três famílias de resinas são atualmente usadas para a fabricação do núcleo de FRP de isoladores poliméricos. Eles são os epoxi, os viniléster e as resinas de poliéster. Pode ser mostrado que todas as três famílias podem, sob certas circunstâncias específicas de cada família, ser afetado pela água e gerar, por causa da hidrólise, ácido carboxílico. No caso de uma resina de epóxi de uso geral para específicos núcleos de FRP, a hidrólise do endurecedor leva a criação de ácido carboxílico de acordo com a seguinte reação:



Para que isso aconteça descargas elétricas não são necessárias. No entanto, a água ou a umidade deve estar em contato com o núcleo e algumas gotas do endurecedor devem ainda

---

estar presentes na cura da resina. Este pode ser o caso se o endurecedor tiver presente em quantidade elevada na formulação ou, mais provavelmente, se a polimerização não for completa devido ao insuficiente tempo de cura ou de temperatura. Isto pode ser verificado por espectroscopia de infravermelhos de análise do núcleo de FRP. A presença de água pode ser explicada pela migração do vapor de água através da caixa de uma área onde existe a falta de ligação ao núcleo, onde se acumula. Além disso, a água provavelmente pode alcançar o núcleo de FRP, através de um invólucro danificado ou um selo defeituoso entre o transporte e a montagem final. A presença simultânea de ácido carboxílico e da carga de tensão mecânica é suficiente para provocar a fratura frágil do núcleo isolante.

#### 2.5.2.2 A Fratura Frágil em campo

Simulações laboratoriais mostram que ambos os cenários, tanto do ácido nítrico quanto do ácido carboxílico pode-se produzir a fratura frágil dos núcleos de FRP. Por conseguinte, é necessário utilizar técnicas especiais de diagnóstico que permitem decidir qual cenário é responsável por uma falha, uma vez que ocorreram em serviço. As técnicas de diagnóstico devem ser capazes de detectar a presença do tipo relevante de ácido na fratura da superfície do isolador.

A espectroscopia de infravermelho é comumente usada como ferramenta qualitativa para identificar a estrutura molecular dos compostos orgânicos e como uma técnica para a determinação quantitativa da concentração de componentes. A posição do comprimento de onda da banda de absorção no infravermelho depende apenas do arranjo molecular dos vários átomos. Esta técnica envolve o estudo das vibrações moleculares. Um feixe contínuo é passado através ou refletido a partir da superfície da amostra. Ligações individuais moleculares e agrupamentos de títulos vibram em frequências características. A curva resultante é conhecida como um espectro de infravermelho (IR).

FTIR-PAS (Espectroscopia foto-acustica) é uma variante da técnica que pode ser utilizada em qualquer amostra que absorve a radiação de infravermelhos e é independente da morfologia da amostra e não requer nenhuma preparação especial da amostra.

##### 2.5.2.2.1 Detecção da presença de ácido nítrico

A presença de ácido nítrico sobre a superfície de fratura de um núcleo de FRP é detectada utilizando a reação de brometo de potássio (KBr) com ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). Tal reação produz um sal de nitrato de potássio (KNO<sub>3</sub>). Este íon de nitrato tem uma absorção

específica no IR de 1384  $\text{cm}^{-1}$ . A figura 32 compara o espectro de IR obtido por FTIR de um padrão de amostra de sal  $\text{KNO}_3$  com que foi obtido a partir da reação de  $\text{HNO}_3$  e  $\text{KBr}$ .

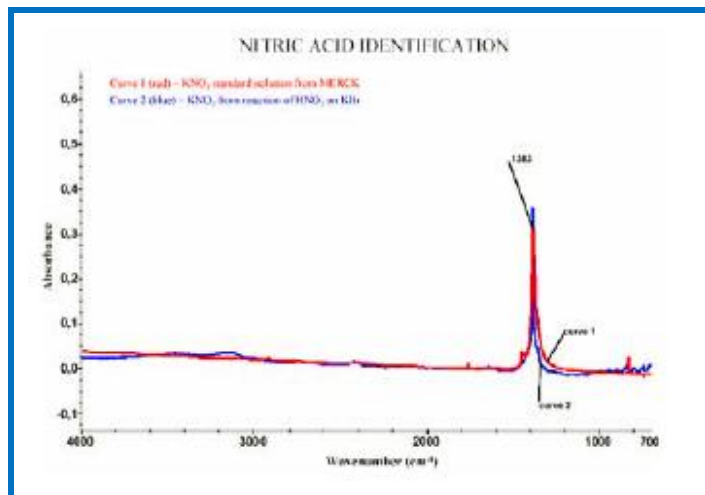


Figura 30 - Identificação de ácido nítrico.

Esta técnica pode ser utilizada para analisar a superfície da fratura em campo de isoladores. A Fig. 33 mostra o espectro associado com a superfície de fratura de um isolador polimérico e com a amostra retirada de dentro do seu núcleo.

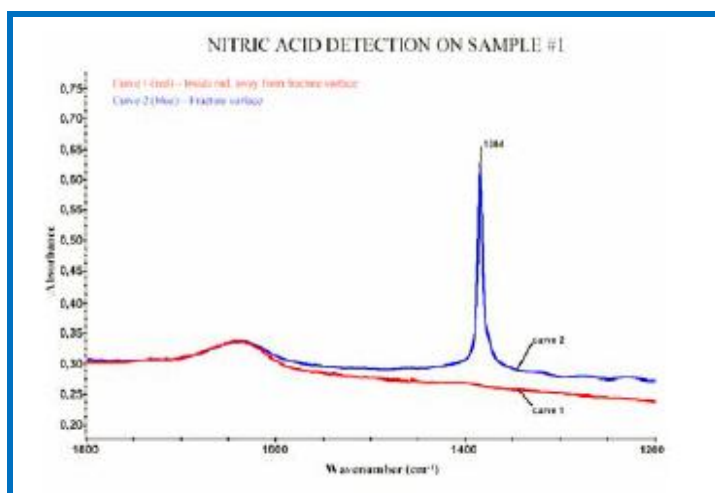


Figura 313 - Identificação de ácido nítrico sobre a superfície de fratura de amostra 34.

#### 2.5.2.2.2 Detecção da presença de ácido carboxílico

Comparando os espectros FTIR da superfície da fratura com o de uma amostra colhida dentro de um núcleo de resina epóxi, ou seja, que nunca foi exposto à umidade pode mostrar a presença de ácido carboxílico e a sua fonte. O carboxilo função tem um pico por volta de

1710  $\text{cm}^{-1}$  e 1700  $\text{cm}^{-1}$  e a função hidroxilo tem um pico em torno de 3437  $\text{cm}^{-1}$ . Quando tais picos estão presentes no espectro associado a superfície de fratura, o espectro de uma amostra recolhida no interior da núcleo mostra picos de 1845  $\text{cm}^{-1}$  e 1770  $\text{cm}^{-1}$ , indicando a presença de anidrido residual (endurecedor que não reagiu). Isto é mostrado na figura 34 e na figura 35.

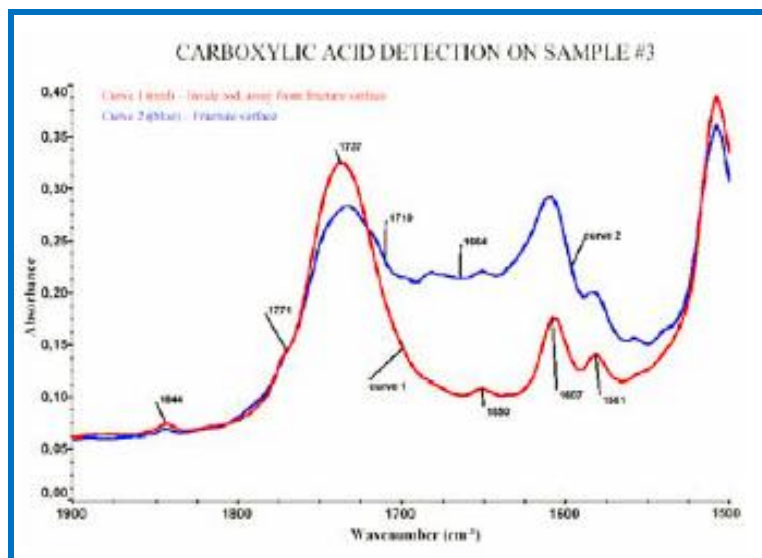


Figura 324 - Identificação do ácido carboxílico na fratura.

Da mesma forma, com os núcleos de resinas de viniléster, a comparação dos espectros FTIR da superfície de fratura e de amostras tomadas dentro do núcleo mostra modificações cerca de 3650 - 3,000  $\text{cm}^{-1}$  (produtos hidrolisados), e a aparência de um pico a 1700  $\text{cm}^{-1}$ , que corresponde à absorção de ácido carboxílico. Além disso, há uma absorção global aumentando entre 1600 e 1850  $\text{cm}^{-1}$ . Isto mostra que a hidrólise de viniléster também pode gerar carboxílico ácido.

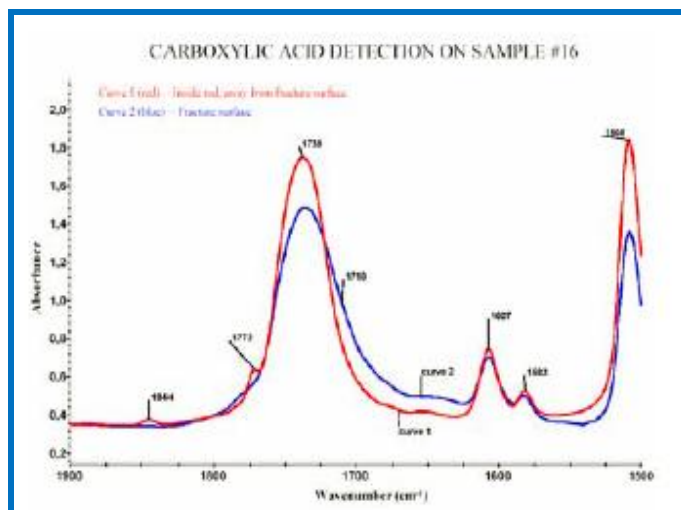


Figura 335 - Ácido identificado caboxílico na fratura.

A mesma comparação entre os espectros da fratura de superfície e de uma amostra de resina tomadas dentro de um núcleo feito com resina de poliéster apresenta uma banda de absorção larga aparecendo entre 3650  $\text{cm}^{-1}$  e 3000  $\text{cm}^{-1}$  (hidrolisado produtos). Ela também mostra uma banda de absorção de menor magnitude entre 1600  $\text{cm}^{-1}$  e 1710  $\text{cm}^{-1}$  (carbonilo função), com um pico em torno de 1700  $\text{cm}^{-1}$ . A absorção global entre 1600 e 1850  $\text{cm}^{-1}$  (função carbonila) pode também ser observado. Como anteriormente, estas modificações indicam a presença de ácido carboxílico.

### 2.5.2.3 Análise da Fratura Frágil em campo

A técnica de diagnóstico através do FTIR tem sido utilizada para estabelecer qual foi o tipo de ácido responsável pela fratura frágil de isoladores poliméricos em campo. As superfícies de fratura de 18 isoladores foram analisadas para procurar evidências de ambos os ácidos nítrico e carboxílico. Todos estes isoladores falharam depois de alguns anos em serviço nas linhas de transmissão. Eles tinham núcleos feitos de FRP epoxi, viniléster ou poliéster. A Tabela 3 apresenta os resultados desta análise.

Tabela 3 - Resultado da análise de concentração de ácidos.

| N. da Amostra | Localização | Tipo de Núcleo | Concentração de Ácido Nítrico | Concentração de Ácido Carboxílico | Cenário Provável |
|---------------|-------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| 1             | USA         | P              | Muito Alto                    | Alto                              | N e/ou C         |
| 2             | USA         | P              | Moderado                      | Alto                              | C                |
| 3             | USA         | E              | Moderado                      | Muito Alto                        | C                |
| 4             | USA         | V              | Moderado                      | Alto                              | C                |
| 5             | USA         | P              | Baixo                         | Alto                              | N e/ou C         |
| 6             | USA         | E              | Muito Alto                    | Baixo                             | N                |
| 7             | USA         | P              | Moderado                      | Alto                              | C                |
| 8             | USA         | V              | Moderado                      | Alto                              | C                |
| 9             | USA         | P              | Moderado                      | Baixo                             | N e/ou C         |
| 10            | USA         | E              | Muito Alto                    | Muito Alto                        | N e/ou C         |
| 11            | USA         | V              | Baixo                         | Muito Alto                        | C                |
| 12            | USA         | P              | Moderado                      | Alto                              | C                |
| 13            | USA         | P              | Moderado                      | Alto                              | C                |
| 14            | USA         | V              | Muito Alto                    | Muito Alto                        | N e/ou C         |
| 15            | ZA          | E              | Moderado                      | Alto                              | C                |
| 16            | ZA          | E              | Moderado                      | Alto                              | C                |
| 17            | Israel      | V              | Inexistente                   | Muito Alto                        | C                |
| 18            | USA         | V              | Muito Alto                    | Moderado                          | N                |

Legenda:

E – Epóxi

P – Poliéster

V – Viniléster

C – Ácido Carboxílico

N – Ácido Nítrico

O tipo de resina utilizada para a fabricação dos núcleos é bastante bem dividida entre as 18 amostras de isoladores, o viniléster, o poliéster e o epóxi. Onze amostras falharam devido ao ácido carboxílico, que é claramente mais do que as duas amostras que falharam devido ao ácido nítrico. Para cinco amostras não é possível claramente atribuir a falha de um ou do outro tipo de ácido.

É importante notar que a presença de ácido carboxílico indica que o núcleo era em particular susceptível a hidrólise. Nas cinco amostras em que ambos os tipos de ácidos foram encontradas, é possível que a falha tenha sido iniciada pelo ácido carboxílico em uma área de

---

campo elétrico de alta concentração e que o processo levou tempo suficiente para as descargas elétricas gerarem o ácido nítrico e, conseqüentemente, o composto problema.

Além disso, outras observações não favorecem o ácido nítrico. Vários isoladores poliméricos que foram retirados de serviço por muitos anos com alguns defeitos não chegaram a falhar. Por exemplo, existem muitos mais isoladores que têm operado durante vários anos com uma haste exposta e evidência de descargas elétricas sobre o núcleo. No entanto não vieram a falhar por fratura frágil apesar de todos os fatores necessários estarem presentes: uma carga de tração mecânica e descargas elétricas em ar úmido que poderiam levar a produção de ácido nítrico.

### **3 MATERIAIS E METODOLOGIA DE INSPEÇÃO**

#### **3.1 MATERIAL**

Com aproximadamente 13 anos de operação todos os isoladores que foram objeto das análises deste trabalho possuem características semelhantes, salvo o fato destes serem de fabricantes distintos, um para os casos de ruptura dielétrica interna e aquele que não falhou e outro para o caso de fratura frágil. Tais características são comuns no sistema elétrico de subtransmissão tanto na suspensão quanto na amarração e obedecem às normas vigentes. Dentre elas destaca-se algumas como a classe de tensão de 69kV, nível de impulso de 350kV, nível de poluição 3, peso de aproximadamente 3 kg, carga eletromecânica de ruptura de 80 kN, carga mecânica de rotina de 3500daN, número de aletas igual a 23, núcleo de fibra de vidro reforçado revestido por uma camada isolante de EPDM (etileno-propileno-dieno-metileno), sem anel anti-corona e terminais tipo concha/bola em aço carbono. A tabela 4 mostra as características resumidas dos isoladores do tipo bastão padronizados na Celpe.

Tabela 4 - Características do isolador tipo bastão polimérico padronizado na Celpe (Celpe-VR01.01-00.005, 2010).

| Isolador tipo Bastão Polimérico |                               |                                |                   |                                        |             |                                                        |                                                 |                       |                       |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Tensão Nominal (kV)             | Máxima Tensão Admissível (kV) | Carga Mecânica Mínima CMN (kN) | Nível de Poluição | Distância Nominal Mínima de Escoamento |             | Tensão Suportável de Impulso Atmosférico (kVef mínimo) | Tensão Suportável 60 Hz sob Chuva (kVef mínimo) | Comprimento Min. (mm) | Comprimento Máx. (mm) |
|                                 |                               |                                |                   | D (mm)                                 | D/V (mm/kV) |                                                        |                                                 |                       |                       |
| 13,8                            | 15                            | 50                             | 3                 | 375                                    | 25          | 110                                                    | 34                                              | 250                   | 400                   |
| 69                              | 72,5                          | 80                             | 3                 | 1813                                   | 25          | 350                                                    | 140                                             | 830                   | 900                   |
|                                 |                               |                                | 4                 | 2248                                   | 31          |                                                        |                                                 |                       |                       |
| 138                             | 145                           | 120                            | 3                 | 3625                                   | 25          | 650                                                    | 275                                             | 1400                  | 1500                  |
|                                 |                               |                                | 4                 | 4495                                   | 31          |                                                        |                                                 |                       |                       |
| 230                             | 245                           | 120                            | 3                 | 6125                                   | 25          | 1050                                                   | 460                                             | 2300                  | 2400                  |
|                                 |                               |                                | 4                 | 7595                                   | 31          |                                                        |                                                 |                       |                       |

Obedecida as características elétricas e dimensionais e a necessidade de algum acessório, como a anel anti-corona, o perfil dos isoladores para as mais variadas classes de tensão são bem similares, conforme exposto pela figura 36.

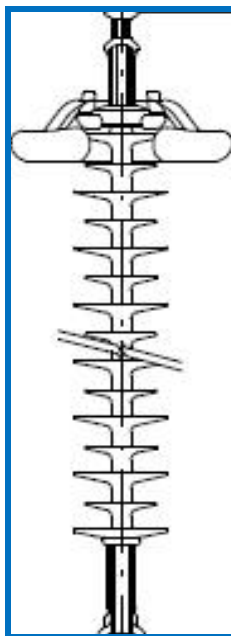


Figura 346 - Isolador polimérico tipo bastão (Celpe-VR01.01-00.005, 2010).

É importante ressaltar que os isoladores analisados não atendiam vários requisitos exigidos pela Celpe constante na sua especificação técnica VR01.01-00.005, 5ª edição datada de 18/06/2010. Como destaque relaciona-se os seguintes:

---

### Item 4.3 - Acabamento

A superfície externa do isolador deve ser homogênea, completamente lisa e isenta de rebarbas, rachaduras, impurezas, porosidades, bolhas e incrustações que possam vir a comprometer o desempenho do material.

#### Item 4.5.1 - Núcleo

Deve ser constituído de fibras de vidro, resistentes à fratura frágil, com baixo teor de Álcali, com características que evitem a hidrólise e a corrosão por fadiga. As fibras devem ser comprimidas numa matriz, de tal forma que as fibras fiquem paralelas ao eixo da haste, obtendo-se a máxima resistência à tração, formando uma peça única, livre de gretas e bolhas. Deve resistir a campos elétricos longitudinais e ser resistente ao trilhamento elétrico, às intempéries e aos raios ultravioleta.

#### Item 4.5.2 - Revestimento do Núcleo

O revestimento do núcleo do isolador para as classes de tensão de 15 e 69 kV deve ser constituído de silicone. Este revestimento deve garantir as propriedades exigidas de resistência ao trilhamento, solicitações decorrentes de efeito corona, erosão, altas temperaturas, inflamabilidade, contaminação atmosférica, arcos de potência e a ação dos raios ultravioleta.

O revestimento do núcleo deve ser feito por extrusão direta no mesmo de uma cobertura isolante, formando uma peça única sem emendas ou costuras. O revestimento deve ser uniforme ao redor do núcleo, em toda a extensão do isolador com uma espessura mínima de 3 mm.

O revestimento deve ser resistente ao manuseio para evitar danos durante a instalação e deve suportar lavagens sob pressão nas linhas de transmissão e distribuição.

Para as classes de tensão superiores a 69kV, o material de revestimento deve ser obrigatoriamente de borracha de silicone vulcanizada à quente – HTV (High Temperature Vulcanized). A base polimérica deve ser de silicone, antes da mistura com aditivos, que conferem ao isolador as propriedades exigidas de resistência ao trilhamento, erosão, altas temperaturas, inflamabilidade e à ação dos raios ultravioleta, não devendo após a adição, apresentar menos de 30% de silicone, devendo atender também aos seguintes requisitos:

a) Ser projetado de forma a evitar a formação de descargas localizadas e a impedir a possibilidade de penetração de umidade pelas interfaces;

---

b) Resistir às solicitações decorrentes de corona, radiação ultravioleta, ozônio, contaminação atmosférica, penetração de umidade e arcos de potência;

c) Ser resistente ao trilhamento elétrico, às intempéries e aos raios ultravioleta;

d) Ser homogêneo, impermeável, livre de rachaduras, bolhas e inclusões de materiais estranhos;

e) Ser de coloração clara para facilitar as inspeções de campo.

A aderência do revestimento ao núcleo e as ferragens do isolador composto polimérico, deve ser de tal forma que a ligação entre o revestimento, o núcleo e os terminais metálicos seja mais forte do que a resistência ao rasgamento intrínseca do próprio revestimento.

O revestimento deve ser resistente ao manuseio para evitar danos durante a instalação.

#### Item 4.5.4.1 - Engates metálicos

Devem ser de ferro nodular ou aço carbono forjado e galvanizado a quente, de acordo com a NBR 6323 e, em caso de transporte marítimo, bicromatizado aplicado sobre a galvanização. Em situações especiais, definidas pela CELPE, as ferragens podem ser de liga de alumínio ou bronze.

Os engates, parafusos e porcas devem apresentar uma espessura mínima de camada conforme especificação VR01.01-00.014 - Ferragens Galvanizadas a Quente.

O galvanizado deve estar livre de danos, manchas, rugosidades, escamas de zinco ou defeitos de fabricação quando da recepção.

As ferragens devem ser fixadas por compressão, por meio do método de compressão radial, de tal forma a assegurar uma distribuição uniforme da carga mecânica ao redor da circunferência do núcleo e o não deslizamento das ferragens em relação aos materiais isolantes.

O sistema de fixação das ferragens deve garantir a integridade do núcleo, não devendo provocar trincas, fissuras ou esmagamento. As ferragens não devem se soltar quando o isolador for submetido a arcos de potência.

#### Item 4.5.5 - Interface entre parte metálica e o núcleo

A interface entre os engates metálicos e o núcleo deve estar selada de maneira a não permitir a penetração de umidade. O sistema de vedação deve ser resistente à variação de temperatura ambiente de - 5 °C a + 60°C.

### 3.2 METODOLOGIA DE INSPEÇÃO

A metodologia de análise de falha nos isoladores consistiu na aquisição de imagens radiográficas de alta resolução através do gerador de Raios-X modelo CP120B-ICM e do sofisticado equipamento de tecnologia digital para obtenção e diagnóstico de imagens *Imagem Plate* modelo C431200 da PerkinElmer. As figuras 37, 38 e 39 ilustram tais equipamentos bem como seu uso compartilhado para inspeção num isolador. Suas características são descritas abaixo:

Gerador de Raios-X:

Tamanho focal: 0,8mm x 0,5mm;

Tensão: 120kV;

Corrente: 1mA;

Distância entre fonte de Raios-X e isolador: 60cm;

Tempo de exposição: 100s;



Figura 357 - Fonte de Raios-X.

Imagem plate:

Radioisotopos: 3H, 125I, 14C, 35S, 33P, 32P, 18F, 99mTc;

Sensibilidade: 10 a 100 vezes;

Faixa dinâmica linear de cinco ordens de magnitude;

Resolução: 600DPI;

Dimensão: 12,5mm x 43mm;

Tipo do Filme: Azul.



Figura 38 - Leitor de imaging plate.

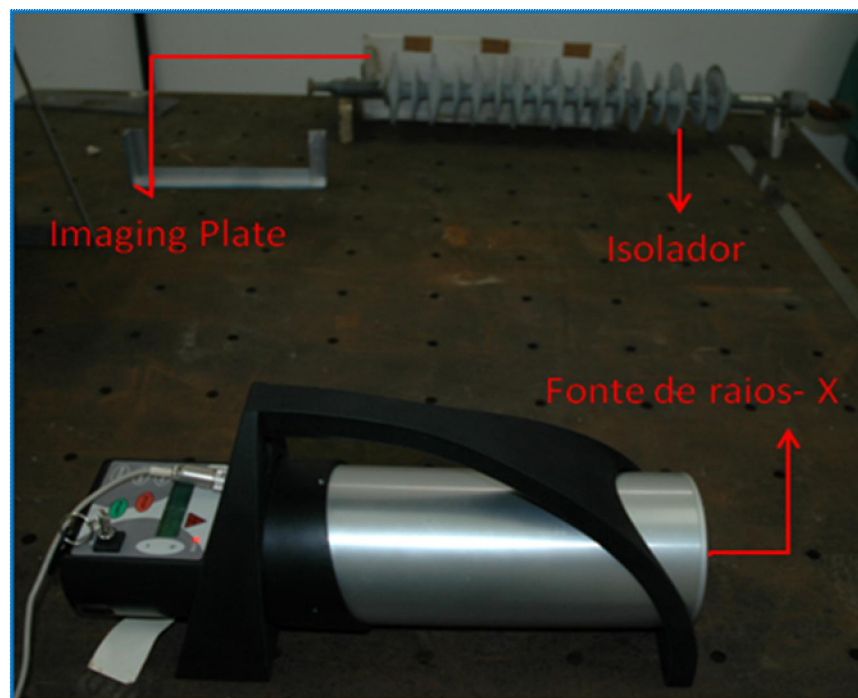


Figura 39 - Inspeção radiográfica no isolador.

O software utilizado no tratamento das imagens foi ISEE! (muitas vezes abreviado como IC), o qual é desenvolvido com o propósito de análise de imagens radiográficas com

---

sistema operacional Microsoft Windows. Ressalta-se que este não é apenas um coletor de imagem e sim uma ferramenta didática e avançada de análise de materiais. Tem como aspecto agregador o fato de realizar várias medições de alta resolução com bits de profundidade significativa, geralmente provenientes da indústria de radiologia. Uma característica muito útil do programa é a simplicidade na instalação. Basta copiar o executável para onde quiser obter a versão gratuita do mesmo em seu stick USB ou apenas gravá-lo em DVD.

### 3.2.1 Princípio de Funcionamento do Imaging Plate

Em termos de detetores de radiação ionizante, basicamente existem dois tipos de detetores. Medidores de pulsos tais como contador de cintilação e contador proporcional, que medem fótons um a um, são altamente sensíveis e possuem o “dead-time” da ordem de 1ms. O “dead-time” está intimamente relacionado às características de construção dos detetores e corresponde a um determinado tempo em que o detetor deixa de medir os fótons da radiação que chegam. Outro tipo de detetor é detetor integral tais como filmes de Raios-X e câmara de ionização, que fornecem total de fótons coletados durante a exposição às radiações ionizantes através de medidas de outras propriedades físicas, tais como grau de escurecimento, corrente elétrica. Diferente dos detetores de pulso, os detetores integrais não possuem o problema de “dead-time”, mas geram relativamente mais ruídos diminuindo a relação S/N-sinal/ruído do detetor.

Na década de 80, visando aplicação médica, a FujiFilm do Japão desenvolveu um detetor inovativo bidimensional denominado de IP – Imaging Plate para radiografia, que possui mesclas das características dos detetores de pulso e integral. Em 1985, as características do IP foram detalhadamente investigadas e testadas como detetor de Raios-X nas técnicas de difração e espalhamento de Raios-X com radiação sincrotron observou-se as seguintes características: altíssima sensibilidade, atingindo uma até três ordens de grandeza em comparação um filme convencional; faixa dinâmica maior; linearidade superior; excelente resolução espacial da ordem 25mm; dados digitais são obtidos diretamente da leitora para o computador para tratamento de imagens. A figura 40 mostra a excepcional linearidade do Imagem Plate em relação o método filme convencional, quando ambos são submetidos a diferentes doses de radiação ionizante. O eixo das abscissas corresponde às doses de radiação emitidas por uma amostra padrão de 32P (radiação beta de 1,7 MeV). O eixo das ordenadas à esquerda representa a quantidade de radiação luminescente acumulada pelo Imagem Plate. Já

o eixo da ordenada à direita mostra a densidade de escurecimento de um filme de Raios-X. O detector IP mostra uma linearidade excepcional em relação ao filme de Raios-X. Estas características são também similares para raios beta de diferentes energias, eletrons, Raios-X e gama.

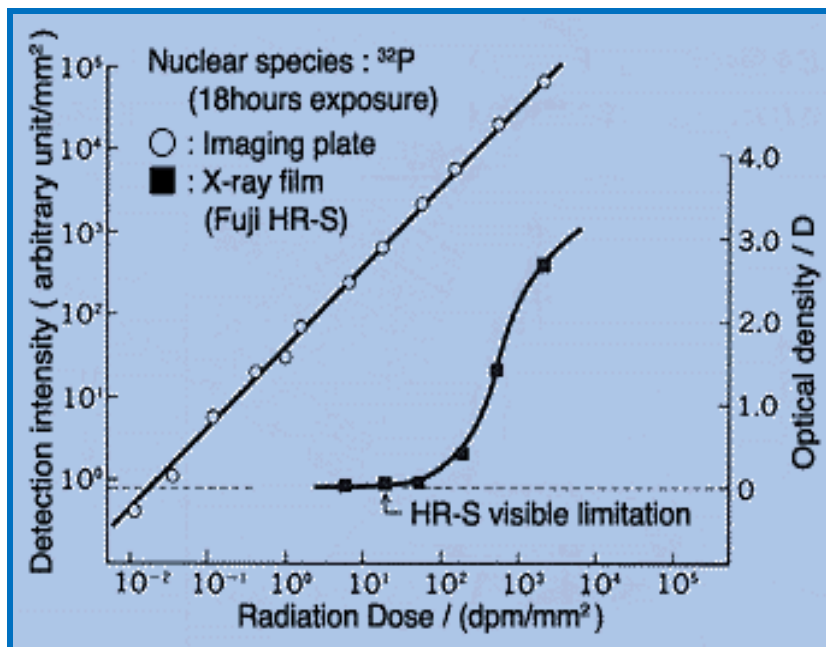


Figura 360 - Comparação da linearidade dos detectores IP e filme de Raios-X quando expostos à radiação beta de  $^{32}\text{P}$  por um período de 18 h, (Fujilm, ).

A tecnologia do IP – Imaging Plate baseia-se na habilidade de certos cristais de fósforos (em média, 5mm de diâmetro) capturar uma imagem latente. Esta imagem é composta de cristais de BaFBr: Eu+2, nos quais os elétrons são aprisionados num nível de maior energia após ser expostos a radiação ionizante. Este estado dos elétrons pode ser desfeito através de uma estimulação com feixes de laser. O retorno dos elétrons para níveis de energia originais é seguido de emissão de fótons na região de luz visível. Este processo é chamado PSL (Photo Stimulated Luminescence). Quanto mais radiação chega nos cristais de fósforo, maior é a densidade de aprisionamento, portanto, mais centros PSL são geradas e como consequência, mais luz visíveis será emitida durante a varredura com o feixe de laser. O processo de leitura das informações latentes no filme IP bem como sua sequência de processamento estão mostrados esquematicamente na figura 41 e 42, respectivamente. No processo de “zerar” as informações, o filme IP pode-se ser reutilizado e este número de ciclos está em torno de 1000 vezes. Com respeito à leitura de imagens de radiação num scanner de filme IP, dependendo do

objetivo, a densidade de leitura pode ser selecionada entre 5 a 40 pixels/mm. O PSL de 400 nm emitido durante a varredura do laser é coletado por um tubo fotomultiplicador (PMT) é posteriormente convertido em sinais elétricos em ordem cronológica. Subsequentemente, estes sinais elétricos são convertidos em sinais digitais de 8 a 16 bits.

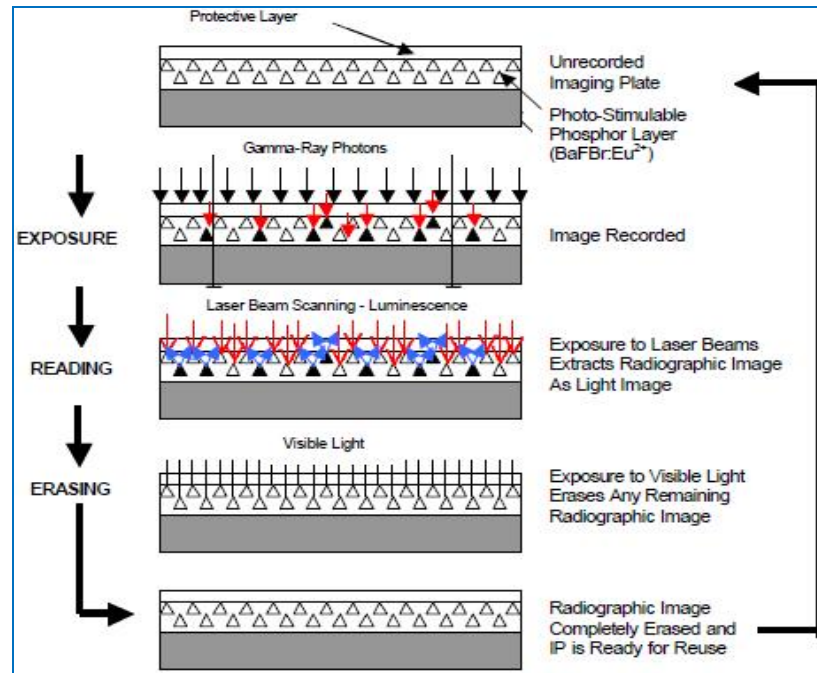


Figura 371 - Sequência de processamento do Imaging Plate para recuperar imagem digital na gamagrafia.

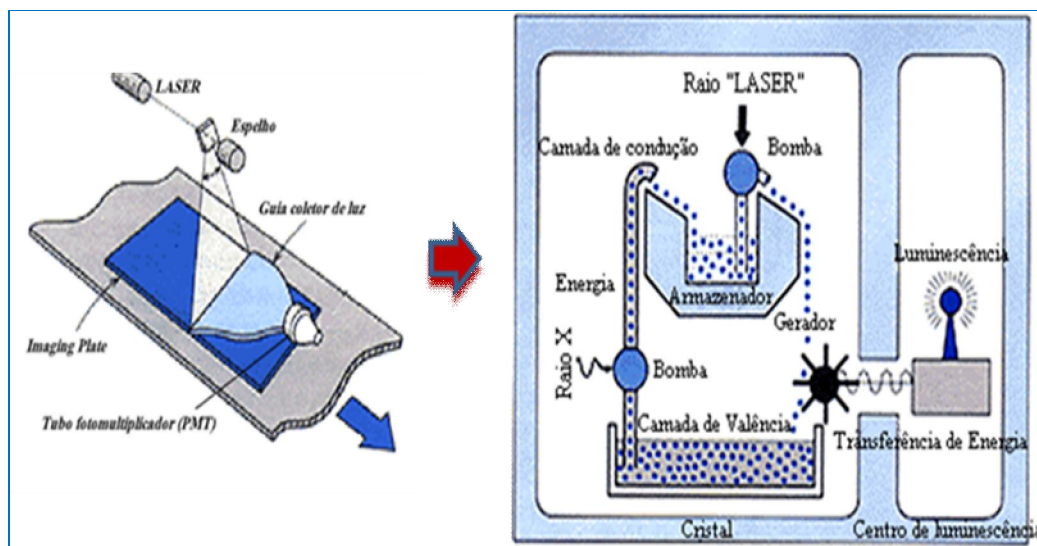


Figura 382 - Sequência de processamento do Imaging Plate.

---

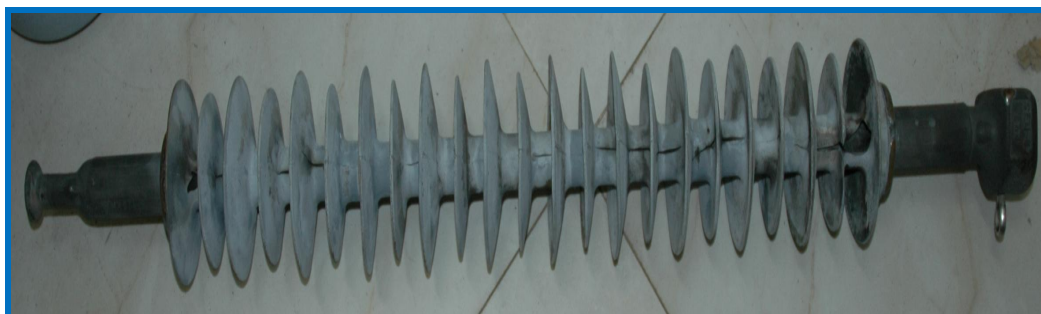
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise dos isoladores procedeu-se a aquisição de diversas imagens radiográficas, nos mais variados ângulos, através de sofisticadas técnicas de processamento de imagem de forma digital. Os resultados obtidos foram de grande relevância para a pesquisa em desenvolvimento e possibilitaram a inserção de mais uma técnica de investigação de falhas em isoladores do tipo compósito. No sentido de complementar tais análises efetuou-se também avaliações manuais e visuais.

Embora os esforços investidos pela Celpe não se limite às avaliações aqui apresentadas, o trabalho proposto com o objetivo de explorar a riqueza da técnica de radiografia computadorizada bem como priorizar o fomento do conhecimento em um dos itens de grande relevância para o sistema elétrico, enfatizou três tipos de análises. A primeira num isolador que falhou por ruptura dielétrica interna, o segundo num isolador que não veio a falhar, porém foi objeto de análise para comprovação da eficácia da técnica de radiografia computadorizada e constatação de defeitos num lote de um determinado fabricante e por fim num isolador que falhou por fratura frágil.

### 4.1 FALHA POR DISRUPÇÃO DIELÉTRICA INTERNA

Com bastante frequência na estatística de falhas em isoladores do tipo compósito a ruptura dielétrica interna é um tipo de falha recorrente pelos fornecedores deste tipo de material. Na grande maioria dos casos a causa principal se dá em defeitos inseridos no processo fabril os quais acarretam falhas de proporções relevantes para o sistema elétrico e principalmente para o isolador. A figura 43 mostra o primeiro isolador que foi analisado pela técnica de investigação proposta.



*Figura 393 - Isolador tipo bastão de 69kV que veio a falhar por Disrupção Dielétrica Interna.*

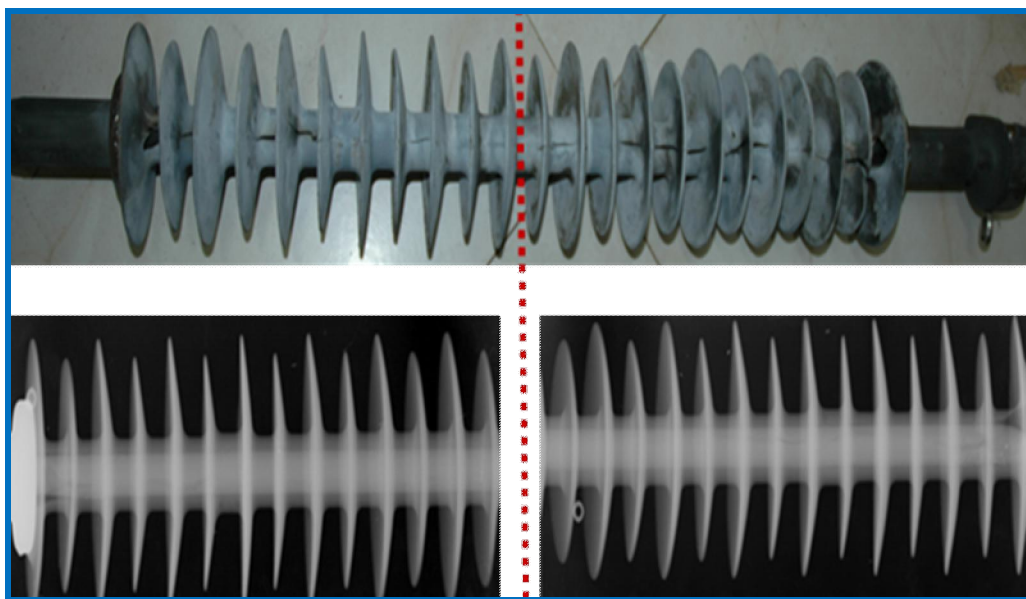


*Figura 404 - Detalhe do Isolador tipo bastão de 69kV que veio a falhar por Disrupção Dielétrica Interna. É fácil verificar a perda de material polimérico tanto no lado fase quanto no lado terra.*

Inicialmente foi realizada a radiografia em diversas posições, feito um refino daquelas de interesse e em seguida processado digitalmente as imagens. Este é um momento de muita perícia, pois é nele que o inspetor explora os recursos da radiografia como um todo em conjunto com seu conhecimento de engenharia de materiais e elétrica.

Pelas imagens da figura 44 a hipótese de perda de impedância do isolador é uma das mais evidentes. O fato deste estar carbonizado, por si só, não deixa claro a origem da disrupção. Na realidade tal evento é tido como consequência. A necessidade então da avaliação interna se torna imprescindível.

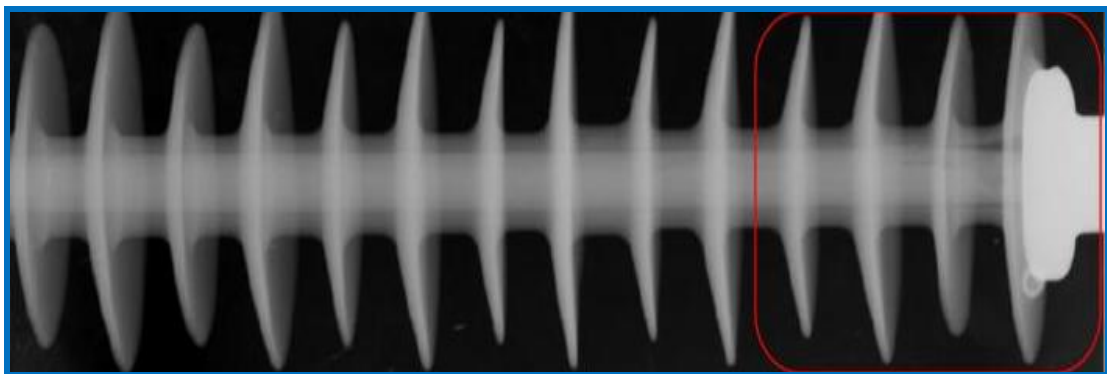
Para poder responder alguns questionamentos ou ao menos evidenciar algumas situações semelhantes realizaram-se as imagens radiográficas conforme figura 45.



*Figura 415 - Imagens radiográficas do isolador com falha por disrupção dielétrica interna.*

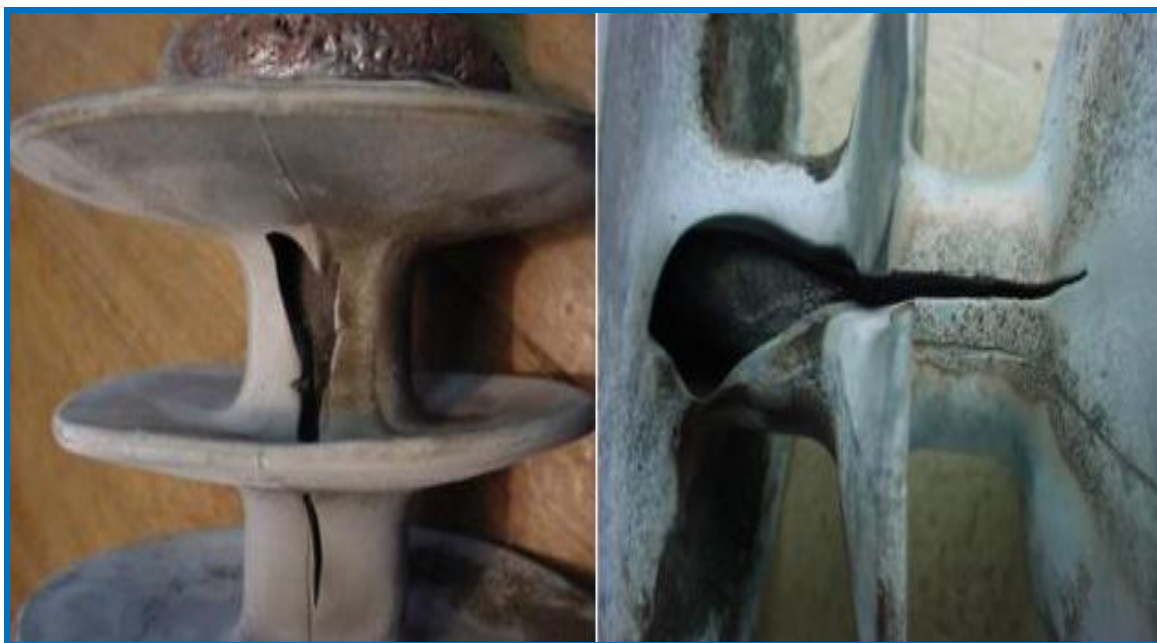
---

É perceptível já nesta figura 45 a perda significativa do material polimérico em ambas as extremidades, tanto lado fase quanto lado terra do isolador, através de cavidades de maior diâmetro, evidenciando que o caminho percorrido pela descarga elétrica se deu ao longo da superfície do bastão de fibra de vidro. As cavidades de formato longilíneo e solidário ao eixo axial do isolador não aparecem na imagem, pois elas são apenas consequência da temperatura gerada pela passagem da corrente de descarga e desta forma em algumas posições não são perceptíveis. Já as cavidades de maior diâmetro presente na imagem representam os pontos de início e fim da descarga. Convém lembrar que se a descarga não tivesse atividade por todo o interior do isolador apareceria provavelmente um ponto com cavidade de diâmetro considerável em uma extremidade e outra ao longo deste. Outro aspecto é que as cavidades de formato longilíneo normalmente ocupam uma região de duas dimensões, ou seja, em formato de plano, já as cavidades de início e fim da descarga ocupam uma região tridimensional. Desta forma estas primeiras não aparecem na imagem, conforme figura 46.



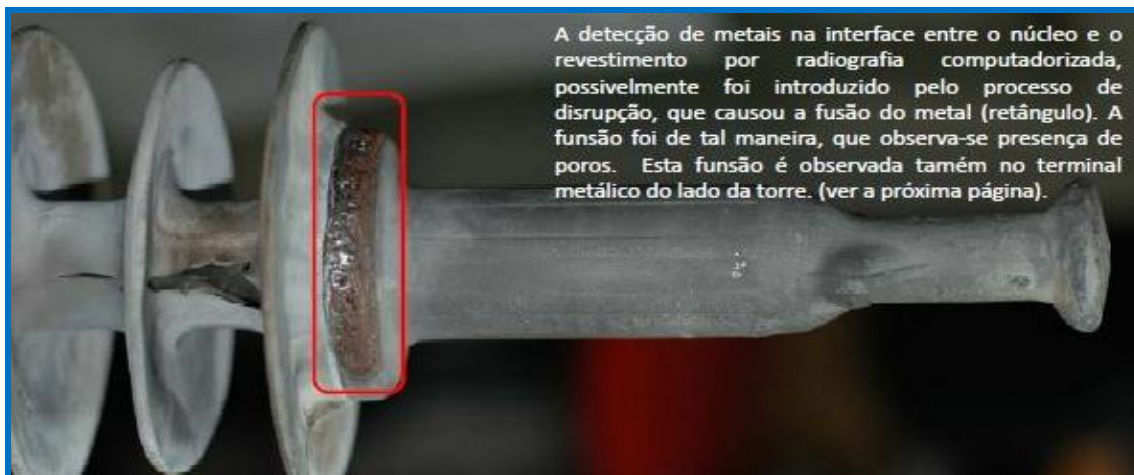
*Figura 426 - Imagem radiográfica do isolador onde constata-se a perda de material polimérico.*

O fato das cavidades próximas às ferragens apresentarem maiores dimensões se deve à elevada concentração de campo elétrico. Por isto que descargas iniciadas a partir deste ponto, notadamente o lado fase, são de maiores proporções como mostra a figura 47.

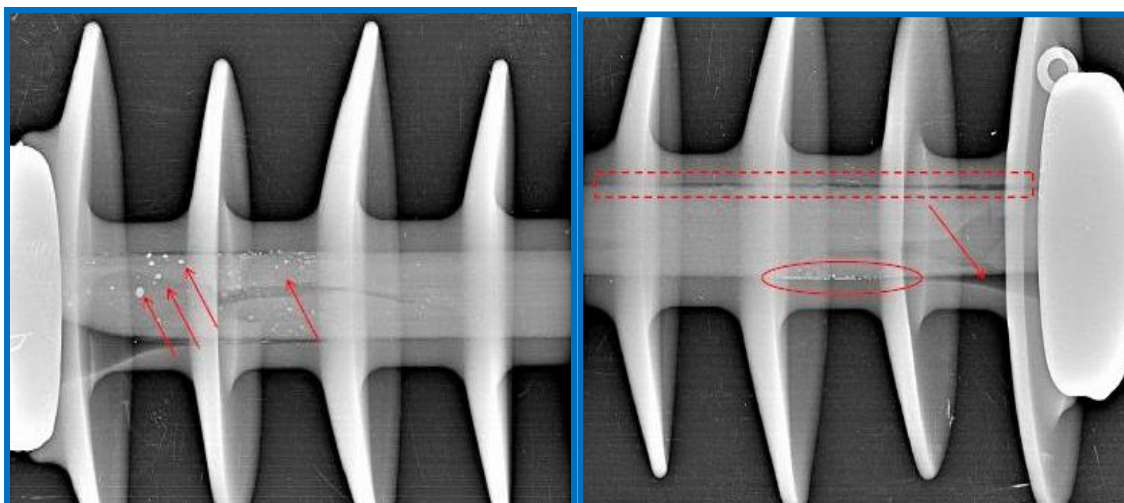


*Figura 437 - Detalhe das cavidades localizadas junto as ferragens.*

Outro aspecto bastante interessante para a análise é o depósito de material metálico no bastão de fibra de vidro, conforme expõe a figura 49. Esta revela a intensidade da descarga elétrica. Isto é muito típico de casos onde se tem o caminho completo da corrente de descarga pelo bastão, pois a intensidade é tamanha que causa a atividade de ruptura por um tempo maior. Na figura 48 é fácil perceber as consequências do arco elétrico de potência.



*Figura 48 - Detalhe do isolador onde verifica-se a fusão da ferragem.*



*Figura 49 - Imagem radiográfica do isolador tipo bastão de 72,5kV onde constata-se o deslocamento do núcleo e depósito de material polimérico metálico.*

Também através da imagem radiográfica é notório o descolamento do bastão de fibra de vidro do revestimento polimérico. Esta é uma evidência forte de infiltração de umidade, dado que tal revestimento polimérico encontra-se majoritariamente sem a devida aderência ao núcleo de fibra de vidro, principalmente nas regiões destas cavidades. Tal fato é justificado pela ocorrência de descargas parciais por um longo período. É importante destacar a riqueza de informações destas imagens as quais inclusive, foram citadas na tese para obtenção do grau de doutor da aluna Elizabeth da Silva Domingues na universidade de Manchester. Segundo a pesquisa realizada pouco se tem na literatura sobre imagens radiográficas, com este nível de detalhes, em isoladores que falharam.

Na Figura 50 pode-se observar as cavidades localizadas ao longo do isolador. É importante salientar que as cavidades formaram-se todas do mesmo lado da amostra, junto a uma das emendas longitudinais do revestimento polimérico.



*Figura 440 - Detalhe do Isolador onde verifica-se várias cavidades de forma longilínea.*

---

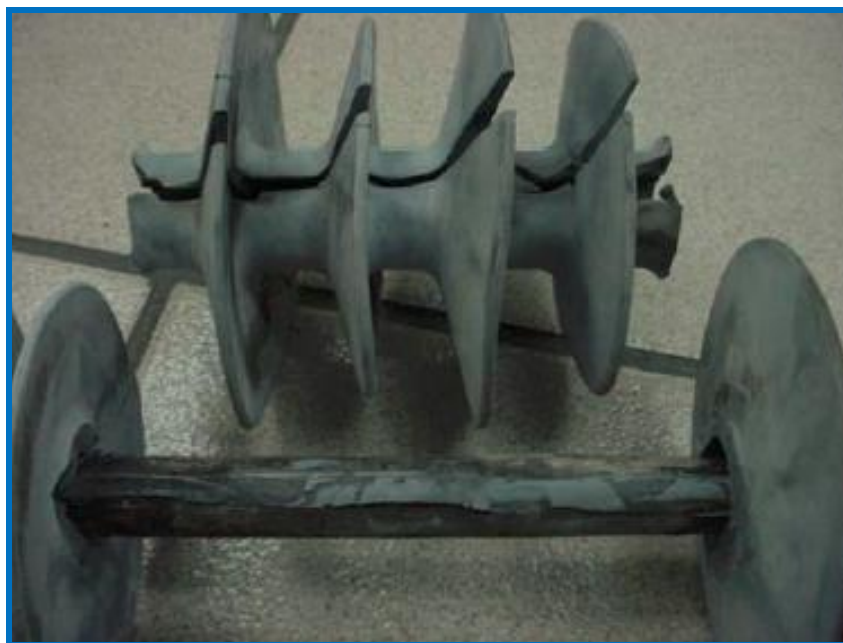
A análise visual e a manual confirmaram o exposto pela imagem 52 através da existência de trilhamento do núcleo sob as cavidades o qual é evidenciado ainda pelas regiões isentas de poeira ou carbonizadas. O deslocamento de ar causado pelo flashover removeu a poeira da superfície polimérica, além de carbonizá-la. Se o arco elétrico penetrou em determinada cavidade durante o flashover, é sinal de que houve concentração de campo elétrico no núcleo abaixo desta cavidade, ou seja, há grande probabilidade de que exista uma região condutiva (carbono devido ao trilhamento de núcleo).

Através da figura 51 é possível verificar que o polímero apresentava-se quase que totalmente descolado do núcleo, a não ser por pequenas regiões, abaixo da emenda longitudinal oposta à emenda que apresentava as cavidades. Estas regiões onde havia aderência permaneceram com resquícios de material polimérico colados sobre o núcleo.



*Figura 45 - Detalhe do Isolador tipo bastão de 72,5kV onde verifica-se a falta de aderência entre o revestimento polimérico e o núcleo de fibra de vidro.*

As únicas regiões que apresentavam aderência eram aquelas de injeção do material polimérico durante o processo fabril, não havendo assim indícios de formação de descargas e carbonização abaixo desta região conforme figura 52.



*Figura 462 - Detalhe do Isolador onde verifica-se cavidades nos lados fase e terra, respectivamente.*

Também foram percebidos ao longo do isolador vários rasgos e fissuras que podem ter contribuído para o estado condutivo do bastão de fibra de vidro, conforme ilustra a figura 53.



*Figura 473 - Detalhe do Isolador onde verifica-se falhas de fabricação através da presença de cavidades.*

Por fim foram identificados diversos pontos na interface da ferragem com o revestimento polimérico por onde pode ter ocorrido a penetração de umidade. Tais pontos são decorrência de falhas no processo de fabricação e na maioria dos casos não são de fácil percepção. A figura 54 ilustra tal fato.



*Figura 484 - Detalhe do Isolador onde verifica-se diversos pontos por onde pode ter ocorrido a penetração de umidade.*

## **4.2 ANÁLISE EM ISOLADOR “BOM” PARA CONSTATAÇÃO DE DEFEITOS**

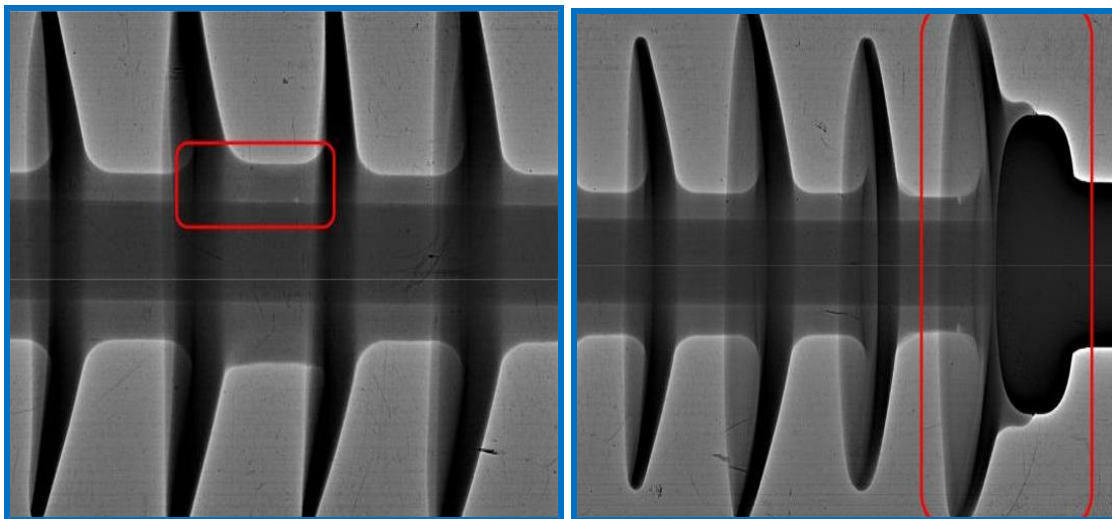
Com o objetivo de constatar que o defeito verificado no outro isolador era de um lote de um determinado fabricante e também para comprovar a eficácia da técnica de radiografia digital como ferramenta de prognóstico até, foram feitas algumas análises num isolador do mesmo fabricante e que estava instalado na mesma estrutura e com o mesmo período de operação daquele que falhou por ruptura dielétrica interna. A figura 55 mostra o isolador utilizado nesta avaliação.



*Figura 495 - Isolador aparentemente íntegro que foi submetido à análise para constatação de possíveis defeitos.*

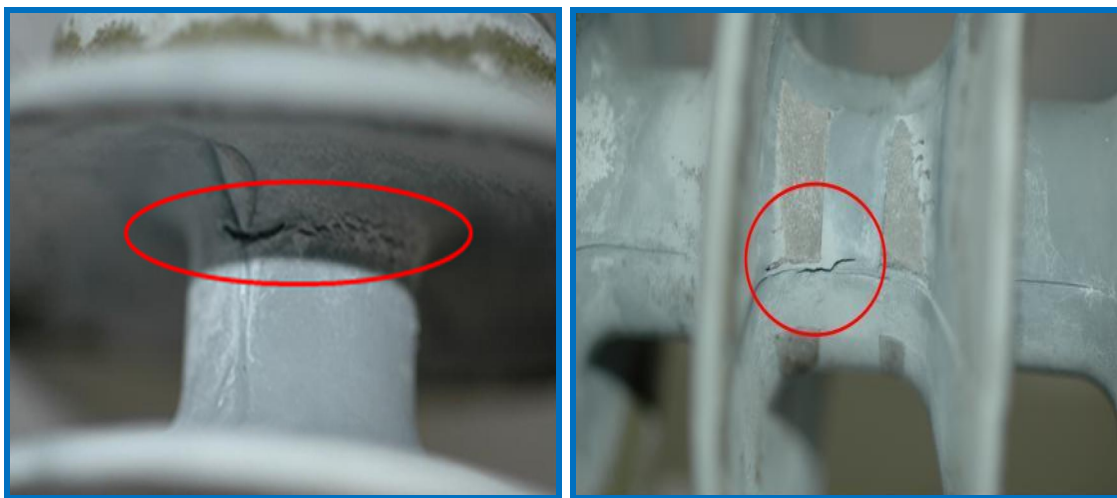
Já nas primeiras análises radiográficas o isolador apresentou bolhas entre a interface do núcleo de fibra de vidro e o revestimento polimérico ao longo de sua estrutura e próximo à ferragem lado terra. Conforme as avaliações anteriores estes defeitos são pontos potenciais para uma falha. Nas regiões onde eles estão localizados a probabilidade deste isolador vir a

apresentar falhas tanto por ruptura dielétrica interna quanto por fratura frágil é real. Não se pode afirmar quando haverá as descargas, todavia este passa a ser um componente que gera preocupações. Ver detalhe na figura 56.



*Figura 506 - Imagem radiográfica do isolador aparentemente íntegro onde constata-se a existência de bolhas.*

Outrossim foram identificadas diversas cavidades ao longo do isolador por onde pode ocorrer a penetração de umidade. Tais como os outros isoladores avaliados estas falhas são originadas no processo de fabricação e na maioria dos casos não são de fácil percepção. A figura 57 ilustra tal fato.



*Figura 51 - Detalhe do Isolador aparentemente íntegro onde verifica-se a presença de cavidades e trincas.*

---

### 4.3 FALHA POR FRATURA FRÁGIL

A fratura frágil não ocorre com tanta frequência em isoladores do tipo compósito quanto à ruptura dielétrica interna. Todavia o estudo da forma como acontece e os meios para evitá-la tem despertado o interesse da comunidade tecnico-científica. Esta depende de dois fatores de estresse no núcleo do isolador compósito. A primeira devido a tensão mecânica que está sempre presente por causa da carga de serviço aplicada ao isolador e a segunda que aparece em função da presença de um ácido que entra em contato com o bastão de fibra de vidro.

Da mesma forma que a falha por ruptura dielétrica interna inicialmente procedeu-se a radiografia com os diversos refinamentos e completou-se com uma análise de forma visual e manual. O isolador objeto desta análise está indicado na figura 58.

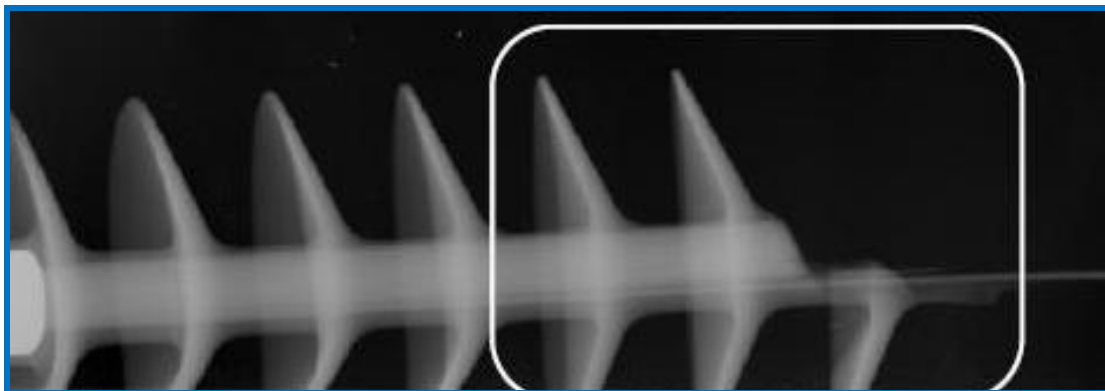


*Figura 58 - Isolador que falhou por fratura frágil.*

Já numa análise visual percebeu-se a forma típica deste tipo de falha. A quebra das fibras de vidro do bastão longitudinalmente com redução progressiva da seção são consequências clássicas. A forma como se dá esta ruptura advém de um processo químico formado pela presença de um ácido que ataca o núcleo localmente e promove a ruptura por cisalhamento.

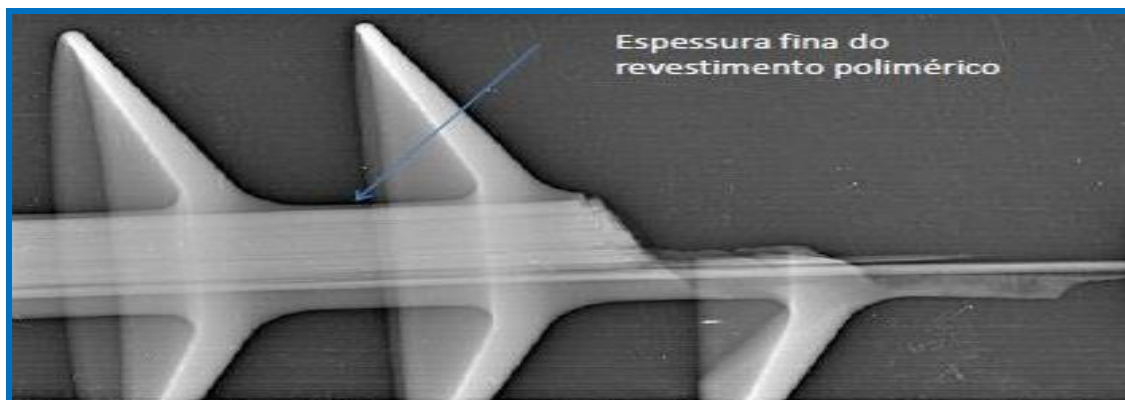
A partir das imagens radiográficas e suas diversas etapas de processamento foi possível constatar um fator potencial para causa da origem da falha. Este é a falta de concentricidade

do bastão de fibra de vidro envolto pelo revestimento polimérico, conforme figura 59. Tal constatação propicia a fragilização da interface revestimento-bastão-ferragem de forma que, em médio e longo prazo, devido a ação mecânica cíclica, gerar folga no bastão.



*Figura 59 - Imagem radiográfica do isolador onde verifica-se a falta de concentricidade do bastão de fibra de vidro envolto pelo revestimento polimérico.*

Outro fator potencial de falha observado foi a redução da camada polimérica. Este acontecimento deixa o núcleo de fibra de vidro mais exposto, pois o isolador está sujeito a intempéries e estas podem trazer consigo umidade, além de alguns elementos que geram reações químicas. A figura 60 mostra este detalhe.



*Figura 520 - Imagem radiográfica do isolador onde verifica-se a diminuição da espessura do revestimento polimérico.*

A especificação da Celpe VR01.01-00.005, 5ª edição datada de 18/06/2010 exige que o revestimento seja uniforme ao redor do núcleo, em toda a extensão do isolador e tenha uma espessura mínima de 3 mm. Pela figura 61 verifica-se que tal espessura está bem abaixo do recomendado, com um valor pouco superior que a metade, ou seja, 1,73 mm.

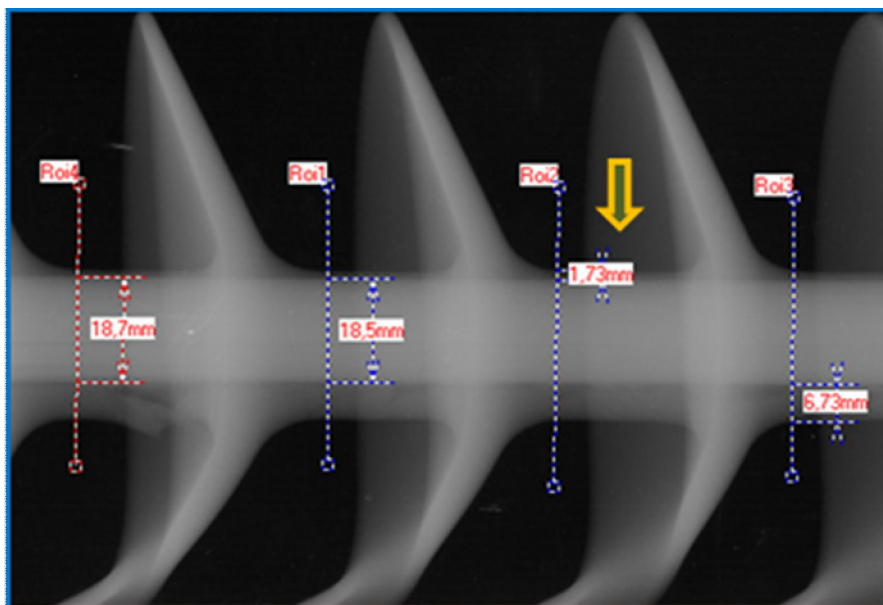


Figura 531 - Imagem radiográfica com detalhe da espessura do isolador.

Ademais foi realizada uma análise visual e manual do isolador constatando a falta de aderência entre do bastão de fibra de vidro e revestimento polimérico e a diminuição deste segundo, conforme figura 62.

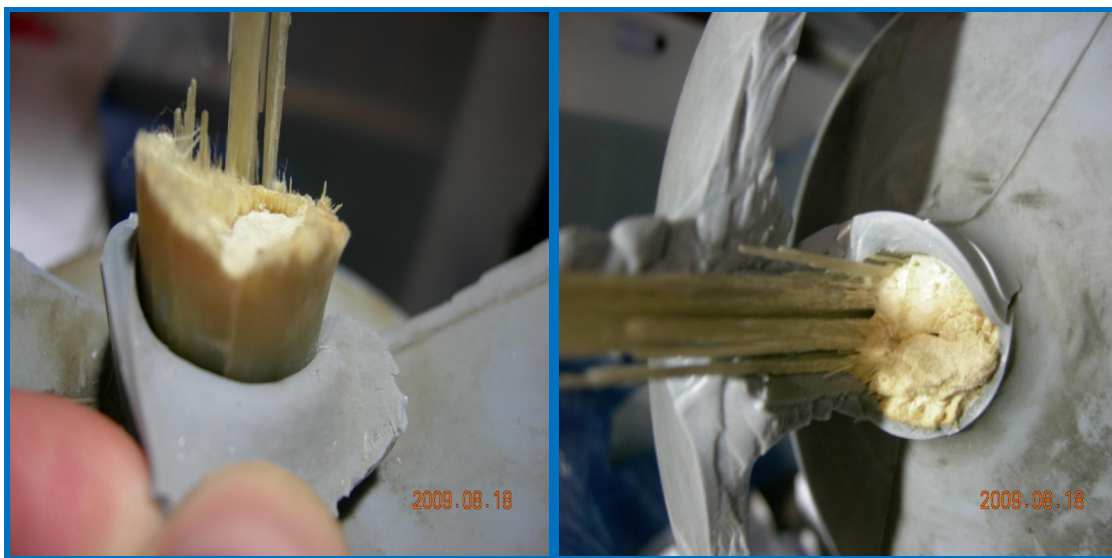


Figura 542 - Detalhe do isolador onde verifica-se o afinamento da espessura do revestimento polimérico e a falta de aderência do núcleo com o mesmo.

---

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi utilizada a técnica de radiografia digital de alta resolução denominada de Radiografia Computadorizado – RC para investigação de falhas em isoladores do tipo compósito de classe de tensão de 69KV em linhas de subtransmissão. Através de sofisticadas tecnologias de geração de Raios-X, obtenção e processamento de imagens foi possível estabelecer um procedimento de análise para isoladores que apresentaram falhas por ruptura dielétrica interna, isoladores que ainda não vieram a falhar, porém já estavam com defeitos internos e isoladores que apresentavam falhas por fratura frágil. Desta forma foi possível extrair as seguintes conclusões:

1. Para o caso do isolador que veio a falhar de forma elétrica, ou seja, por ruptura dielétrica interna foi atribuída à causa raiz à deficiência no processo fabril o qual possibilitou o ingresso de umidade com sais e poluentes no interior do isolador, entre o bastão de fibra de vidro e o material polimérico que o reveste. Alguns fatores observados possibilitaram a conclusão da análise, são eles: o caminho percorrido pela descarga elétrica, o formato e a posição das cavidades presentes, o descolamento do bastão de fibra de vidro do revestimento polimérico e o depósito de material metálico no bastão de fibra de vidro.

O caminho percorrido pela descarga elétrica através da superfície do bastão de fibra de vidro ficou evidenciado pela perda significativa do material polimérico em ambas as extremidades, tanto lado fase quanto lado terra do isolador, através de cavidades de maior diâmetro. As cavidades de formato longilíneo e solidário ao eixo axial do isolador não apareceram nas imagens radiográficas, pois elas são apenas consequência da temperatura gerada pela passagem da corrente de descarga e desta forma em algumas posições não são perceptíveis. Já as cavidades de maior diâmetro presentes nas imagens radiográficas indicam os pontos de início e fim da descarga. Isto é fundamentado pela presença do intenso campo elétrico nestas regiões. Se a descarga não tivesse atividade por todo o interior do isolador apareceria provavelmente um ponto com cavidade de diâmetro considerável em uma extremidade e outra ao longo deste.

Outro aspecto observado foi o formato e a posição das cavidades presentes ao longo isolador. Aquelas com formato longilíneo ocupavam uma região de duas dimensões, ou seja, em formato de plano, já as cavidades de início e fim da

---

descarga ocupavam uma região tridimensional. Desta forma estas primeiras não apareceram nas imagens radiográficas, pelo menos em algumas posições. Isto é explicado pelo princípio de geração das descargas parciais. Estas se originam de forma desordenada e em vários planos, tal como aconteceu nas regiões de início e fim da descarga.

O descolamento do bastão de fibra de vidro do revestimento polimérico é uma forte evidência de infiltração de umidade, dado que estes se apresentavam majoritariamente sem aderência, principalmente nas regiões das cavidades. Tal fato é justificado pela ocorrência de descargas parciais por um longo período e foi comprovado pela análise visual e a manual, na qual foi possível perceber a existência de trilhamento do núcleo sob as cavidades isentas de poeiras e carbonizadas.

Ademais também foi observado o depósito de material metálico no bastão de fibra de vidro. Isto revela a intensidade da descarga elétrica. Isto é muito típico de casos onde se tem o caminho completo da corrente de descarga pelo bastão, pois a intensidade é tamanha que causa a atividade de ruptura por um tempo maior;

2. Para o caso do isolador que não veio a falhar os resultados foram de grande relevância, pois já demonstravam a presença de bolhas entre a interface do núcleo de fibra de vidro e o revestimento polimérico ao longo de sua estrutura e próximo à ferragem lado terra. Tais defeitos são sinais que a falha deste isolador está próxima. Desta forma ficou evidenciado também o êxito da radiografia computadorizada como ferramenta de prognóstico.
3. Para o caso do isolador que veio a falhar de forma mecânica, ou seja, por fratura frágil também foi atribuída à causa raiz a deficiência no processo fabril, todavia estas com maior relevância e de forma grosseira. A falta de concêntrica alinhada a diminuição da espessura do revestimento que circunda o bastão de fibra de vidro promoveram a exposição deste segundo a intempéries e umidade desencadeando o surgimento do fenômeno denominado de fratura por corrosão sob tensão (SCC – stress corrosion crack). A forma plana e localizada do cisalhamento bem como a condição longitudinal de quebra das fibras de vidro do bastão com redução progressiva da seção são consequências clássicas deste tipo falha.

---

A falta de concentricidade do bastão de fibra de vidro ao longo do revestimento polimérico promoveu, em função da carga mecânica cíclica, a fragilização das interfaces revestimento-bastão-ferragem. Tal fato potencializou a possibilidade de penetração de umidades e poluentes.

A diminuição da camada polimérica que circunda o bastão de fibra de vidro foi o aspecto que mais contribui para o surgimento localizado da falha, pois fragilizou a região do isolador no que diz respeito à suportabilidade do campo elétrico. Isto foi possível devido à concentração pontual e intensa deste campo que na presença de alguns gases comuns do processo fabril do isolador gerou ácidos de ataque.

---

## ***SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS***

- Desenvolver técnicas de aplicação da radiografia digital em isoladores em operação, isto é, com o uso de intervenções em linha energizada;
- Estender a análise através da radiografia digital para outros tipos de materiais que compõe uma linha de subtransmissão de 69kV, tais como: ferragens, postes e cabos;
- Intensificar a avaliação no componente isolador, inclusive naqueles de outra composição, a exemplo do vidro e da porcelana, objetivando melhorias no processo fabril destes materiais.

---

## **TRABALHOS PUBLICADOS**

[1]MENDONÇA, P.L.; SHINOHARA, A.H.; "A experiência da celpe no uso da radiografia digital como técnica de diagnóstico de falhas em materiais poliméricos". Trabalho aprovado e apresentado no XXV congresso brasileiro de manutenção – ABRAMAN em setembro de 2010, em Bento Gonçalves, RS – brasil;

[2]MENDONÇA, P.L.; SHINOHARA, A.H.; "A experiência da celpe no uso da radiografia digital como técnica de diagnóstico de falhas em materiais poliméricos". Trabalho apresentado na 11ª conferência sobre tecnologia de equipamentos – COTEQ em maio de 2011, em Porto de Galinhas, PE – brasil;

[3]MENDONÇA, P.L.; SHINOHARA, A.H.; "A experiência da celpe no uso da radiografia digital como técnica de diagnóstico de falhas em materiais poliméricos". Trabalho apresentado no III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE em maio de 2010, em belém, PA - brasil;

[4]MENDONÇA, P.L.; ANGELINI, J.; NALLIM, F., COSTA, E.; FERREIRA,T.; GERMANO, A. "Monitoramento de Isoladores Polimericos em Linhas de Transmissao atraves de Sensor de Corrente de Fuga". Trabalho apresentado no III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE em maio de 2010, Belém, PA, Brasil;

[5]MENDONÇA, P.L.; ANGELINI, J.; NALLIM, F., COSTA, E.; FERREIRA,T.; GERMANO, A. "Monitoramento de Isoladores Polimericos em Linhas de Transmissao atraves de Sensor de Corrente de Fuga". Trabalho apresentado no XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, novembro de 2010, São Paulo, SP, Brasil. Congratulado com o prêmio de 1º lugar na sua seção;

[6]MENDONÇA, P.L.; ANGELINI, J.; NALLIM, F., COSTA, E.; FERREIRA,T.; GERMANO, A. "Monitoramento de Isoladores Polimericos em Linhas de Transmissao atraves de Sensor de Corrente de Fuga". Trabalho apresentado no XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI em novembro de 2010, São Paulo, SP, Brasil. Congratulado com o prêmio de 1º lugar na sua seção;

[7]MENDONÇA, P.L.; BEZERRA, J.M. "Sensor para verificação de degradação em isoladores poliméricos de linhas de transmissão". Trabalho apresentado no XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE em outubro de 2011, Florianópolis, SC, Brasil;

---

[8]MENDONÇA, P.L.; BEZERRA, J.M. "Sensor para verificação de degradação em isoladores poliméricos de linhas de transmissão". Trabalho Publicado na 4ª edição da Revista "Pesquisa e Desenvolvimento" da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) em agosto de 2011, ISSN 1981-9803.

---

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] GÓIS, N. C.; BRITO, J. A. ; NALIM, F. E. ; ANGELINI, J. M. G. ; ROSSI, J. A. D. ; PETRACHIM, J. A.; Sensor para verificação de degradação em isoladores poliméricos de linhas de transmissão; trabalho apresentado e publicado no CD do congresso de inovação tecnológica em energia elétrica, citenel, 2., salvador, 2003;
- [2] ANGELINI, J. M. G.; BAGAROLLI, A.; NALLIM, F. E. ; GÓIS, N. C. ; PETRACHIM, J. A.; ROSSI, J. A. D. Sensor to verify degradation on transmission lines polymeric insulators; trabalho apresentado e publicado no CD do congresso latinoamericano generacion y transporte de la energia electrica, clagtee, mar del plata, 2005.
- [3] GÓIS, N. C. ; ROSSI, J. A. D.; NALLIN, F. H. ; PETRACHIM, J. A.; ANGELINI, J. M. G. Aplicação de sensor para monitoramento da degradação de isoladores poliméricos de epdm na coelba; artigo apresentado e publicado no CD do xix snptee - seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, rio de janeiro, outubro de 2007.
- [4] VOSLOO, W.L.; HOLTZHAUSEN, J.P.; ROEDIGER, A.H.A. Leakage current performance of naturally aged non-ceramic insulators under a severe marine environment; conference title: africon '96. incorporating ap-mtt-96 and comsig-96;1996 ieee africon. 4th africon conference in africa. electrical energy technology, communication systems, human resources (cat. no.96ch35866)part vol.1, p.489-95 vol.1,1996.
- [5] FERNANDO, M.A.R.M.; GUBANSKI, S. M. Leakage currents on non-ceramic insulators and materials" ieee trans. on dielectrics and elect. insulation, vol 6, n5, 1999, pp 660-667.
- [6] SORQVIST, T.; VLASTOS, A., E.; Performance and Ageing of Polymeric Insulators; IEEE trans. on Power Delivery, vol. 12, N°4, 1997, PP 1657-1665.
- [7] SILVA, E; ROWLAND, S.M.; "In-service surface degradation of mv composite insulators under severe environmental conditions and low electric stress," in ieee-deis conference on electrical insulation and dielectric phenomena, CEIDP. Quebec, Canada, 2008.;
- [8] TZIMAS, A; SILVA, E. D; ROWLAND, S.M.; "A framework to assist asset management of composite insulators," in international electrical insulation conference, insucon. Brmingham, uk, 2009;

- 
- [9] GUBANSKI, S.; DERNFALK, A.; ANDERSSON, J.; HILLBORG, H.; "Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators," *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, vol. 14, pp. 1065-1080, 2007;
- [10] PHILLIPS, A.; "Application of Polymer Insulators (NCI): Workshop Presentations (1002660)." EPRI, Palo Alto, CA, USA, 2003;
- [11] IEEE, "IEEE Std 1572 Guide for Application of Composite Line Post Insulators," 2004;
- [12] PHILLIPS, A.; "Field Guide: Visual Inspection of Polymer Insulators. Technical Update, May 2006, (1013283) " EPRI, Palo Alto, CA, USA. 2006, pp. 104;
- [13] GORUR, R.; "Condition Assessment of Polymer Insulators," PSERC Seminar Presentation, 2006, p. 37;
- [14] PAIVA, O.; FILHO, M.; "Reviewing 10 Years of Operating Experience with Composite Insulators at CHESF," in *World Congress & Exhibition on Insulators, Arresters & Bushings*, Crete, Greece, 2009, pp. 1-9;
- [15] COSTA, E.; FERREIRA, T.; NERI, M.; QUEIROZ, I.; GERMANO, A.; "Characterization of polymeric Insulators using Thermal and UV Imaging under Laboratory Conditions," *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, pp. 985-992, 2009;
- [16] FARZANEH, M.; "Outdoor Insulators: Overview of In-Service Experience, Inspection Practice and Future Challenges," in *IEEE-EIC Electrical Insulation Conference* Montreal, QC, Canada, 2009.;
- [17] GUBANSKI, S.; DERNFALK, A.; ANDERSSON, J.; HILLBORG, H.; "Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators," *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, 2007;
- [18] SHINOHARA, A. H.; SANTANA, D.M.F.; OLIVEIRA, P.P.J.C.; MAGALHÃES, R. J.G. O. H.; KHOURY, C. G.S.H.J.; WAVRIK, J. F.A.G.; BRANCO, F.M.A.C.; LEITE, M.A.; GALINDO, T. C.; "Defects Detection in Electrical Insulators and Breaker for High Voltage by Low Cost Computed Radiography Systems," in *International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography*, Lyon, France, 2007. Improved Condition Monitoring of Composite Insulator – Thesis;
- [19] MELLO, D. R.; ACIOLI, E.; GÓIS, N.; "Location of Internal Faults in Electrical Equipment Using Digital X-Ray Technology " in *16th World Conference on Non Destructive Testing* Montreal, Canada, 2004;

- 
- [20] CARDOSO, W.; SILVA, R.; FILHO, V.S.; LODDI, T.; "Detecção de Defeitos em Isoladores Poliméricos por meio da Radiografia Digital e Reconhecimento de Padrões (Composite insulators' defect detection using digital X-rays and patrons identification) " Espaço Energia, vol. 2, pp. 1-7, 2005;
- [21] CARDOSO , W.; GEUS, K.; SILVA, R.; FILHO, V.S.; "Detecção automática de vazios em isoladores poliméricos por tomografia industrial 3D (Automatic detection of flaws in polymer insulators using 3D industrial tomography)," Espaço Energia, vol. 11, pp. 1-6, 2009;
- [22] BIRTWHISTLE , D.; CASH, G.; GEORGE, G. A.; HINDE, D.; "New Techniques for Estimating the Condition of High Voltage Polymeric Insulators," in Engineering Asset Management, 2006, pp. 949-956;
- [23] IEEE-PES, "Guide for Cleaning Insulators." vol. IEEE Std 957™-2005.;
- [24] GOMES, F.; "Lavagem De Isoladores em Instalações Energizadas," in CIER - Jornadas de Integracion Electrica Regional Fortaleza, Brasil, 2004, p. 5;
- [25] PHILLIPS, A., "EPRI Polymer Insulator Failure Database: 2005 Analysis (Doc number: 1010236) " EPRI, Technical Update, June 2005;
- [26] LOPES, I., JAYARAM, S., CHERNEY, E.; "Partial discharge measurement as a diagnostic tool of the early ageing of silicone rubber insulation," in Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, 2003, p. 206 Vol. 1;
- [27] A. H. El-Hag, "Leakage current characterization for estimating the conditions of non-ceramic insulators' surfaces," Electric Power Systems Research, vol. 77, pp. 379-384, 2007;
- [28] YOUNG, H. M., SPELLMAN, C. A., HADDAD, A., WILLIAMS, D. L.; "Quantification of polymeric insulator hydrophobicity using image processing techniques". 12th International Symposium on High Voltage Engineering, (ISH' 2001), Indian Institute of Science, Bangalore, India, India (2001), páginas 603 a 606;
- [29] ZHAO, T.; BERNSTORF, R. A. Ageing tests of polymeric housing materials for non-ceramic insulators. Electrical Insulation Magazine, IEEE, Volume: 14, Issue: 2, March-April 1998. Pages: 26 – 33;
- [30] YAMAMOTO, H.; ZHU, Y.; OTSUBOL, M.; HONDA, C.; TAKENOUCHI, O.; HASHIMOTO, Y.; OHNO, A. IEC 5000h multi-stress test on polymeric insulators. Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, June 5-9. 2005. Kitakyushu, Japan. (Referência da Introdução. As demais são citadas na Revisão Bibliográfica);
- [31] UGUR M.; UCAN O. N.; KUNTMAN A.; OZMEN A., MEREV A. "Analysing the 2-D surface tracking patterns by using Cellular Neural Networks". Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999;

- 
- [32] SALAMA, M. M. A.; SALLAM, M. M. "A Mathematical Model for Tracking Time Calculation for Polymeric Materials". IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, MD USA, 1992;
- [33] SANTOS FILHO, N.; GARCIA, R. W. S. "Isoladores de Linhas de Transmissão do Sistema Elétrico Brasileiro - Parte II - Avaliação de desempenho". XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. XVII SNPTEE. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. 19 a 24 de outubro de 2003;
- [34] TANAKA, T.; KOZAKO, M.; FUSE, N; OHKI, Y. "Proposal of a Multi-core Model for Polymer Nanocomposite Dielectrics". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 4; August 2005;
- [35] TETEX Information No. 21 Partial Discharge Measuring Techniques. TETEX AG Instruments, Zürich, 1984;
- [36] DOMINGUES, E. S. "Improved Condition Monitoring of Composite Insulators". A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2012;
- [37] ANAMI, N.; ZHU, Y.; HASHIMOTO, S.; OTSUBO, M.; HONDA, C.; TAKENOUCHI, O.; HASHIMOTO, Y.; "Evaluation of dry band arc on the polymeric insulator using differential technique and distortion factor of leakage current," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003. Annual Report. Conference on*, 2003, pp. 414-417;
- [38] MEYER, L.; MUSTAFA, T.; MOLINA, F.; OLDONI, C.; "Desenvolvimento e Aplicação de uma Estação de Monitoramento de Sistemas Isolantes," in SBSE - Simposio Brasileiro de Sistemas Electricos Belem, Brazil, 2010, p. 4;
- [39] LEWIS, T. J.; LLEWELLYN, J. P.; VAN DER SLUIJS, M. J.; FREESTONE, J.; HAMPTON, R. N. A New Model for Electrical Ageing and Breakdown in Dielectrics. Dielectric Materials, Measurements and Applications, Seventh International Conference on, (Conf. Publ. No. 430), páginas 220 a 224, 1996.
- [40] CELPE, Especificação de Isoladores Bastão e Line-Post Poliméricos, 5ª Edição datada de 18/06/2010;
- [41] NBR 15121, Isolador para Alta Tensão – Ensaio de medição de radiointerferência;
- [42] NBR 15122, Isoladores Bastão Compostos Poliméricos para tensões acima de 1000V.