

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

**Estudo do Trilhamento de Núcleo em  
Isoladores Poliméricos**

Tarso Vilela Ferreira

Campina Grande, maio de 2007.

**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**Estudo do Trilhamento de Núcleo em  
Isoladores Poliméricos**

*Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande, em cumprimento parcial às  
exigências para obtenção do Grau de Mestre em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:  
Professor Edson Guedes da Costa

Campina Grande, maio de 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

T193e

2007 Ferreira, Tarso Vilela

Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos / Tarso Vilela Ferreira. — Campina Grande, 2007.  
113p.: il.

Dissertação (Mestrado em Ciências do Domínio da Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências

Orientadores: Prof. Edson Guedes da Costa.

1– Isoladores Poliméricos 2– Trilhamento de Núcleo 3– Descargas Parciais 4– Termovisão 5– Detecção de Ultra-Violeta. *J. Título*

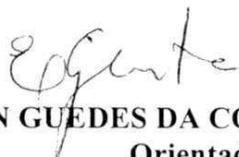
CDU –621.315.616

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I |          |
| 1341                         | 11.09.07 |
|                              |          |

**ESTUDO DO TRILHAMENTO DE NÚCLEO EM ISOLADORES POLIMÉRICOS**

**TARSO VILELA FERREIRA**

Dissertação Aprovada em 30.05.2007



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



**SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFCG**  
Componente da Banca



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



**JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, D.Sc., UFPE**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
MAIO - 2007

Aos meus pais.

## Agradecimentos

Apesar de ter um só nome na capa, esta dissertação é produto resultante de um esforço conjunto e distribuído ao longo de minha vida, havendo inúmeros colaboradores:

Meus pais, que graças a Deus tiveram as condições necessárias para garantir a mim uma educação de qualidade, não poupando esforços ou incentivos.

Andrea, que, surgindo de forma tão inesperada e intensa, tornou-se logo óbvia e indispensável em tudo que faço.

Meus avós, tios, primos e irmãos, que acreditam no meu potencial, acham que eu sou o *nerd* da família e colaboraram na cota para compra de meu primeiro computador.

O Professor Edson Guedes da Costa, que me instruiu intelectualmente e laboratorialmente, sendo principalmente um grande amigo.

Os Professores e funcionários do departamento de Engenharia Elétrica, especialmente aos do Grupo de Sistemas Elétricos pelo agradável convívio, respeito, amizade, reconhecimento e incentivo.

Os vários amigos e colegas que tenho colecionado aqui na UFCG, especialmente Max, Isaac, Estácio, Kalina, Gilvan, Camila, Rodolfo e George.

O colega Max Norat Cavalcanti (Chesf), sempre inventivo e disposto a colaborar em todos os aspectos.

A colega Tereza Galindo (Chesf) por compartilhar seus conhecimentos de autoridade nacional em termovisão.

O autor deseja externar os agradecimentos ao CNPq, pela bolsa de estudos, e à Eletrobrás pelo suporte financeiro na implantação do Laboratório de Isolamentos Elétricos através do Convênio 082/2005 Eletrobrás/UFCG/PaqTc-PB.

*“Se fosse fácil achar o caminho das pedras  
Tantas pedras no caminho não seria ruim.”*

Humberto Gessinger em *Outras Freqüências*

## Resumo

No fornecimento de energia elétrica, os sistemas de isolamento desenvolvem um papel muito importante, reduzindo as perdas e proporcionando a transmissão com tensão elevada. Os equipamentos que proporcionam o isolamento nos sistemas elétricos de forma geral são os isoladores. Quando falham, isoladores podem provocar o desligamento da linha de transmissão, interrompendo o fornecimento de energia elétrica e penalizando severamente a concessionária com as multas impostas pelas agências reguladoras. Historicamente, os sistemas de isolação em linhas de transmissão têm sido representados pelos isoladores cerâmicos, que têm como material isolante o vidro ou a porcelana. Contudo, nos últimos anos, uma classe particular de isoladores, que contém compostos orgânicos em sua composição, tem se destacado: os isoladores poliméricos. Como todo equipamento importante para o funcionamento adequado de um sistema elétrico, os isoladores poliméricos demandam técnicas eficazes de monitoramento e estudo aprofundado dos fatores que podem levá-los a falhar. Uma das causas de falhas em isoladores poliméricos é o trilhamento de núcleo (*core tracking*). Visando uma compreensão mais abrangente do trilhamento de núcleo e sua formação, uma técnica de criação de indícios de trilhamento de núcleo em laboratório encontra-se proposta neste trabalho. Além disso, observações dos indicadores físicos da origem e propagação do trilhamento de núcleo foram realizadas. Foram utilizados uma câmera de radiação ultravioleta e um termovisor para inspecionar os níveis de descargas corona nas proximidades do isolador e as temperaturas superficiais no isolador. Foi observado que anéis equalizadores influenciam os padrões térmicos e de descargas corona. Para ponderar a influência dos anéis equalizadores nos níveis de descargas corona e temperaturas superficiais nos isoladores, serão avaliadas várias configurações de anéis. Além disso, as condições de distribuição de campo e potencial elétrico nestas configurações de anéis equalizadores foram simuladas computacionalmente, através do Método dos Elementos Finitos, permitindo assim a representação gráfica do campo e potencial elétricos, além de um entendimento mais abrangente. Por fim, um anel equalizador otimizado para aplicação em isoladores poliméricos classe 230 kV foi projetado, construído e avaliado, visando prolongar a vida útil dos isoladores. Os resultados dos ensaios do método de criação de indícios de trilhamento de núcleo em laboratório demonstram que a presença de umidade junto ao núcleo do isolador polimérico é um fator importante no processo de formação do trilhamento, acelerando-o significativamente. Os resultados dos experimentos de análise dos efeitos da concentração demonstram que o uso de anéis equalizadores subdimensionados é prejudicial aos isoladores poliméricos. Por outro lado, o uso de anéis equalizadores superdimensionados também não oferece o desempenho ideal. Das simulações computacionais e ensaios realizados, conclui-se que o anel de equalização projetado e construído apresentou-se como uma alternativa viável e funcional para uso nos isoladores poliméricos classe 230 kV estudados. Também se pode concluir que existe a necessidade de que projetos de anéis equalizadores levem em consideração o local de instalação, o grau de poluição e o clima a que eles serão submetidos.

## Abstract

In the electric energy facilities, the isolation systems play an important role, reducing the losses and providing the high voltage transmission. The equipment that provides the isolation in electrical systems is the insulators. When an insulator fails, it can cause the transmission line outage, interrupting the supply of electric energy and severely injuring the concessionaire with the fines imposed by regulating agencies. Historically, the insulation systems in transmission lines have been represented by ceramic insulators, which use glass or porcelain. However, in recent years, a particular class of insulators, composed by organic materials, has detached: the polymeric insulators. As all equipment in an electric system, the polymeric insulators demand efficient monitoring techniques and deep study of its degradation factors. Core tracking is a cause of polymeric insulators failure. Aiming to understand the core tracking and its formation process, a laboratorial technique of core tracking creation is proposed. Moreover, an investigation of physical evidences of core tracking has been carried out. An ultraviolet camera and a thermovisor have been used to inspect the levels of corona discharges in the insulator's neighborhoods and the temperatures on the insulator's surface. It was observed that corona rings have influence in thermal gradients and corona discharges patterns. Influence of corona rings in the levels of corona discharges and insulator's temperature has been evaluated. Moreover, the electric field distribution and electric potential conditions of these corona rings have been computationally simulated, using the Finite Elements Method. The simulations allowed the graphical representation of electric field and potential, and a better understanding of the phenomena. Finally, aiming to extend the insulator's useful life, an optimized corona ring, designed for 230 kV class polymeric insulators was projected, constructed and evaluated. The results of the experiments with the laboratorial technique of core tracking creation indicates that humidity is an important factor in the core tracking formation process, speeding up it. The results of the corona rings experiments demonstrate that under-dimensioned corona rings can be harmful to the polymeric insulators. On the other hand, over dimensioned corona rings do not offer the ideal performance. From the computational simulations and lab tests, it is possible to conclude that the projected and constructed corona ring is a viable and functional alternative for 230 kV class insulators. It can also be conclude that, in corona ring projects, it is necessary to take in account the installation place, the degree of pollution and the climate to which the insulator will be exposed.

# Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS.....   | X         |
| LISTA DE TABELAS.....   | XII       |
| LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS.....  | XIII      |
| SIMBOLOGIA UTILIZADA.....   | XV        |
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2 – EMBASAMENTO TEÓRICO.....</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1. ISOLADORES POLIMÉRICOS .....   | 5         |
| 2.1.1. <i>O Núcleo</i> .....  | 10        |
| 2.1.2. <i>O Revestimento</i> .....  | 10        |
| 2.1.3. <i>As Ferragens</i> .....  | 11        |
| 2.2. DESCARGAS PARCIAIS .....   | 12        |
| 2.2.1. <i>Modelo</i> .....  | 12        |
| 2.3. TERMOGRAFIA .....  | 15        |
| 2.3.1. <i>Inspeção Termográfica</i> .....   | 15        |
| 2.3.2. <i>Critérios de avaliação</i> .....  | 16        |
| 2.4. TRILHAMENTO ELÉTRICO EM COMPOSTOS ORGÂNICOS.....                                       | 17        |
| 2.4.1. <i>Reações dos Polímeros ao Campo Elétrico</i> .....                                 | 18        |
| 2.5. DETECTOR DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA .....  | 21        |
| 2.6. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....  | 24        |
| 2.6.1. <i>O software FEMLAB®</i> .....  | 28        |
| <b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>   | <b>30</b> |
| 3.1. MATERIAIS .....  | 31        |
| 3.1.1. <i>Materiais para os experimentos de análise dos efeitos da concentração</i> .....   | 31        |
| 3.1.2. <i>Materiais para os experimentos de reprodução de indícios de trilhamento</i> ..... | 31        |
| 3.2. MÉTODOS .....  | 32        |
| 3.2.1. <i>Métodos para os experimentos de análise dos efeitos da concentração</i> .....     | 32        |
| 3.2.2. <i>Métodos para os experimentos de reprodução de indícios de trilhamento</i> .....   | 37        |
| <b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS .....</b>  | <b>42</b> |
| 4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE DOS EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO .....                    | 42        |
| 4.1.1. <i>Isolador novo (IN)</i> .....  | 45        |
| 4.1.2. <i>Isolador envelhecido, com poluição (IC01S)</i> .....                              | 51        |
| 4.1.3. <i>Isolador envelhecido, com poluição (IC02S)</i> .....                              | 57        |
| 4.1.4. <i>Isolador envelhecido, com poluição removida (IC02L)</i> .....                     | 63        |
| 4.1.5. <i>Simulações computacionais</i> .....   | 69        |
| 4.1.6. <i>Análise dos efeitos do envelhecimento e da poluição</i> .....                     | 82        |
| 4.1.7. <i>Inspeções visuais</i> .....   | 86        |
| 4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE REPRODUÇÃO DE INDÍCIOS DE TRILHAMENTO .....                  | 87        |
| 4.2.1. <i>Eletrodo aterrado, seco</i> .....   | 88        |
| 4.2.2. <i>Eletrodo em alta tensão, seco</i> .....   | 90        |
| 4.2.3. <i>Eletrodo em alta-tensão, com presença de umidade</i> .....                        | 93        |
| <b>CAPÍTULO 5 – ANEL DE EQUALIZAÇÃO PROPOSTO .....</b>                                      | <b>97</b> |
| 5.1. PROPOSIÇÃO DO ANEL DE EQUALIZAÇÃO .....  | 97        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.2.1. <i>Configuração 1</i> .....                     | 98         |
| 5.2.2. <i>Configuração 2</i> .....                     | 100        |
| 5.2. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO ANEL DE EQUALIZAÇÃO ..... | 101        |
| 5.3. AVALIAÇÃO DO ANEL DE EQUALIZAÇÃO PROPOSTO.....    | 102        |
| <b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES .....</b>                   | <b>106</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                | <b>111</b> |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1. Fotografia de um isolador no qual ocorreu trilhamento de núcleo. ....   | 3  |
| Figura 2.1. Envelhecimento da superfície hidrofóbica (YOUNG et al., 1999).....  | 9  |
| Figura 2.2. Constituição de um isolador polimérico (Rodurflex, 2004b).....  | 10 |
| Figura 2.3. Modelo elétrico básico do material sob ensaio. ....   | 13 |
| Figura 2.4. Circuito equivalente do modelo elétrico básico. ....  | 13 |
| Figura 2.5. Gráfico representativo de descargas parciais em um dielétrico. ....   | 14 |
| Figura 2.6. Estresse tensor $\sigma(z)$ ortogonal ao campo elétrico $E(z)$ . ....   | 20 |
| Figura 2.7. Espectro típico de uma descarga corona no ar (LINDNER et al., 1999). ....   | 22 |
| Figura 2.8. Princípio de funcionamento do DayCor (LINDNER, 2004). ....  | 23 |
| Figura 2.9. Etapas de discretização de um isolador cerâmico. ....   | 26 |
| Figura 2.10. Distribuição de potencial entre placas paralelas calculada pelo FEMLAB. ....   | 29 |
| Figura 3.1. Fotografia de um isolador de 230 kV. ....   | 31 |
| Figura 3.2. Diagrama do isolador utilizado nos ensaios de análise. ....   | 31 |
| Figura 3.3. Fotografia do isolador utilizado nos experimentos indícios de trilhamento. ....   | 32 |
| Figura 3.4. Diagrama do isolador utilizado nos ensaios de reprodução de indícios de trilhamento. ....   | 32 |
| Figura 3.5. Diagrama do A158 com características dimensionais. ....   | 33 |
| Figura 3.6. Diagrama do anel de A444 mm com características dimensionais. ....  | 34 |
| Figura 3.7. Diagrama do isolador de vidro, com características dimensionais. ....   | 34 |
| Figura 3.8. Circuito de medição e aquisição de dados. ....  | 37 |
| Figura 3.9. Esquema da aplicação do eletrodo agudo. ....  | 38 |
| Figura 4.1. Representação da distribuição de potencial elétrico em um isolador completo. ....   | 70 |
| Figura 4.2. Criação dos gráficos de representação de campo elétrico na superfície polimérica. ....  | 70 |
| Figura 4.3. (a) Disposições de malha, (b) continuidade de solução para o campo elétrico e (c) permissividade na região imediatamente abaixo da primeira aleta, junto ao material polimérico. .... | 72 |
| Figura 4.4. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo O. ....   | 73 |
| Figura 4.5. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A1. ....  | 74 |
| Figura 4.6. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A2. ....  | 75 |
| Figura 4.7. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A3. ....  | 76 |
| Figura 4.8. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A4. ....  | 77 |
| Figura 4.9. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A5. ....  | 78 |
| Figura 4.10. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo B. ....  | 79 |
| Figura 4.11. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo C1. ....   | 80 |
| Figura 4.12. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo C2. ....   | 81 |
| Figura 4.13. Fotografia da região próxima ao eletrodo fase um isolador polimérico. ....   | 87 |
| Figura 4.14. Aspecto do núcleo de fibra de vidro perfeito. ....   | 88 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.15. Fotografia do núcleo no ensaio com eletrodo aterrado a seco. ....   | 88  |
| Figura 4.16. Sinais de descargas parciais com eletrodo aterrado, seco. ....  | 89  |
| Figura 4.17. Níveis de descargas parciais em todo o ensaio, eletrodo aterrado, seco. ....  | 90  |
| Figura 4.18. Fotografia do núcleo no ensaio com eletrodo em alta tensão, seco. ....  | 91  |
| Figura 4.19. Sinais de descargas parciais Eletrodo em alta tensão, seco. ....  | 92  |
| Figura 4.20. Níveis de descargas parciais em todo o ensaio, eletrodo em alta tensão, seco.<br>.....  | 92  |
| Figura 4.21. Fotografia do núcleo no ensaio com eletrodo em alta tensão, com presença de<br>unidade. ....  | 93  |
| Figura 4.22. Sinais de descargas parciais eletrodo em alta tensão, seco. ....  | 94  |
| Figura 4.23. Níveis de descargas parciais em todo o ensaio, eletrodo em alta tensão, úmido.<br>.....   | 94  |
| Figura 4.24. Padrão de descargas para regiões metálicas com terminação abrupta, em<br>contato com a superfície dielétrica. (a) Diagrama esquemático; (b) Padrão de<br>descargas..... | 95  |
| Figura 4.25. Esboço das regiões de ocorrência de descarga parciais e corona.....   | 96  |
| Figura 5.1. Parâmetros variados durante simulações. ....   | 98  |
| Figura 5.2. Configuração 1 com as suas dimensões. ....   | 98  |
| Figura 5.3. Distância entre a extremidade superior do toróide e a primeira aleta. ....   | 99  |
| Figura 5.4. Distribuição de potencial elétrico e campo na superfície do isolador da<br>Configuração 1. ....  | 99  |
| Figura 5.5. Configuração 2 com as suas dimensões. ....   | 100 |
| Figura 5.6. Distribuição de potencial elétrico e campo na superfície do isolador da<br>Configuração 2. ....  | 101 |
| Figura 5.7. Diagrama esquemático do protótipo construído. ....   | 102 |
| Figura 5.8. Protótipo do anel equalizador proposto montado no isolador IC01S. ....   | 103 |

## Lista de Tabelas

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 2.1. Critérios de avaliação NETA MTS (apud EPPERLY et al., 1999, p. 34).....                    | 17  |
| Tabela 3.1. Configurações de anéis e isoladores de vidro utilizados.....                               | 35  |
| Tabela 3.2. Variantes do método proposto.....  | 40  |
| Tabela 4.1. Resultados termográficos para isolador IN.....   | 45  |
| Tabela 4.2. Resultados de medição de corona para isolador IN.....                                      | 48  |
| Tabela 4.3. Resultados termográficos para isolador IC01S.....  | 51  |
| Tabela 4.4. Resultados de medição de corona para isolador IC01S.....                                   | 54  |
| Tabela 4.5. Resultados termográficos para isolador IC02S.....  | 57  |
| Tabela 4.6. Resultados de medição de corona para isolador IC02S.....                                   | 60  |
| Tabela 4.7. Resultados termográficos para isolador IC02L.....  | 64  |
| Tabela 4.8. Resultados de medição de corona para isolador IC02L.....                                   | 66  |
| Tabela 4.9. Agrupamento dos resultados de análise.....   | 82  |
| Tabela 5.1. Resultados termográficos para os isoladores IN, IC01S e IC02L, utilizando o protótipo..... | 103 |
| Tabela 5.2. Inspeções de corona para os isoladores IN, IC01S e IC02L, utilizando o protótipo.....      | 104 |

## Lista de Acrônimos e Abreviaturas

|                 |   |
|-----------------|---|
| A1              | Isolador polimérico com anel de equalização de 158 mm em posição correta.   |
| A158            | Anel equalizador com 158 mm de diâmetro.  |
| A2              | Isolador polimérico com anel de equalização de 158 mm em posição incorreta, acima do indicado.                            |
| A3              | Isolador polimérico com anel de equalização de 158 mm em posição incorreta, bastante acima do indicado, sobre o polímero. |
| A4              | Isolador polimérico com anel de equalização de 158 mm em posição correta, mas mal encaixado.                              |
| A444            | Anel equalizador com 444 mm.  |
| A5              | Isolador polimérico com anel de equalização de 158 mm em posição incorreta, pouco abaixo do recomendado.                  |
| B               | Isolador polimérico com anel de equalização de 444 mm de diâmetro, em posição correta.                                    |
| c               | Centi ( $1 \times 10^{-2}$ )  |
| C               | Coulomb.  |
| C <sub>1</sub>  | Capacitância da cavidade.   |
| C1              | Isolador polimérico com um isolador de vidro colocado na ferragem fase.   |
| C <sub>2</sub>  | Capacitância do material que está em série com a cavidade.  |
| C2              | Isolador polimérico com dois isoladores de vidro colocados na ferragem fase.  |
| C <sub>3</sub>  | Representa a associação das capacitâncias do resto do material.   |
| C <sub>D</sub>  | Valor de pontos de corona registrado com o arranjo não energizado.  |
| CE              | Epóxi cicloalifática.   |
| CHESF           | Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.  |
| C <sub>In</sub> | Calor instantâneo de ponto de corona.   |
| C <sub>k</sub>  | Capacitor de acoplamento  |
| C <sub>M</sub>  | Valor médio de pontos de corona durante todo tempo de medição.  |
| D               | Camada macroscópica de material.  |
| D <sub>cm</sub> | Média de descargas parciais entre os valores apresentados por um mesmo modelo de anel equalizador.                        |
| E               | Campo Elétrico.   |
| EPDM            | Etileno-propileno-dieno.  |
| EPM             | Etileno-propileno-metileno.   |
| EVA             | Acetato de vinil-etileno.   |
| F               | Faraday   |
| FRP             | Bastão de fibra de vidro reforçada.   |
| F <sub>TM</sub> | Fator de máxima tensão de operação do sistema.  |
| g               | Gramas.   |
| GSE             | Grupo de Sistemas Elétricos.  |
| IC01S           | Isolador envelhecido 5 anos no campo, com poluição.   |
| IC02L           | Isolador envelhecido 4 anos no campo, com poluição removida.  |
| IC02S           | Isolador envelhecido 4 anos no campo, com poluição.   |
| IEC             | Comitê Eletrotécnico Internacional  |
| IN              | Isolador novo e limpo.  |
| IN              | Isolador novo.  |
| k               | Quilo ( $1 \times 10^3$ )   |
| m               | Metro.  |
| m               | Mili ( $1 \times 10^{-3}$ )   |
| MEF             | Método dos Elementos Finitos.   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| min             | Minuto.  |
| n               | Nano ( $1 \times 10^{-9}$ )  |
| N               | Newton.  |
| n               | Número de valores instantâneos de pontos de corona registrados.  |
| NTSC            | Comitê Nacional dos Sistemas de Televisão.   |
| O               | Isolador polimérico sem anel de equalização ou isolador de vidro associado.                                |
| p               | Pico ( $1 \times 10^{-12}$ )   |
| PAL             | Alteração de Fase por Linha.   |
| PQ              | Temperatura do ponto mais quente do isolador.  |
| PTFE            | Politetrafluoretileno.   |
| Q               | Separação de cargas em uma interface.  |
| R <sub>1</sub>  | Resistência do arco elétrico.  |
| s               | Segundo.   |
| SIR             | Borracha de silicone.  |
| TA              | Temperatura ambiente.  |
| TDI             | Temperatura dominante no isolador.   |
| Tmed            | Média dos gradientes de temperatura entre os valores apresentados por um mesmo modelo de anel equalizador. |
| U+, U-          | Tensões disruptivas.   |
| URA             | Umidade relativa do ar.  |
| Ut(t)           | Tensão alternada aplicada.   |
| V               | Diferença de potencial elétrico.   |
| V               | Volt.  |
| V+ e V-         | Tensões residuais existentes nas cavidades.  |
| VA              | Volt-ampère  |
| V <sub>E</sub>  | Tensão aplicada durante ensaio.  |
| VMDC            | Valor médio de descargas corona.   |
| V <sub>OL</sub> | Tensão de operação na linha.   |
| z               | Variável atribuída à dimensão.   |
| Z <sub>m</sub>  | Impedância de medição.   |

## Simbologia Utilizada

|               |   |
|---------------|---|
| $\sigma$      | Estresse total do plano.                      |
| $\delta$      | Largura da interface.                         |
| $\varepsilon$ | Permissividade elétrica.                      |
| $\Delta$      | Varição de uma grandeza em torno de um valor. |
| ”             | Polegada.                                     |
| ®             | Marca registrada.                             |
| °             | Grau.   |
| °C            | Graus Celsius.                                |
| $\mu$         | Micro ( $1 \times 10^{-6}$ ).                 |
| $\gamma$      | Tensão mecânica.                              |
| $\Omega$      | Impedância ou resistência elétrica.           |

# Capítulo 1 – Introdução

A necessidade de um suprimento confiável de energia tem se mostrado evidente com o desenvolvimento tecnológico de nossa sociedade. No fornecimento de energia elétrica, os sistemas de isolamento desenvolvem um papel muito importante, reduzindo as perdas e proporcionando a transmissão com tensão elevada. A função dos sistemas de isolamento é, idealmente, impedir a circulação de corrente entre áreas energizadas ou entre uma área energizada e a terra, isto é, segregar regiões com diferentes níveis de tensão. Assim, desde a geração, passando pela transmissão e chegando à distribuição, os sistemas de isolamento influenciam todo o sistema elétrico, ditando a continuidade do fornecimento.

Os sistemas de isolamento elétricos passaram por grande progresso nas últimas décadas. Graças à evolução da engenharia de materiais, surgem a cada dia compostos novos que podem ser utilizados em sistemas de isolamento. Apesar de trazerem novas características benéficas aos sistemas de isolamento, a aplicação de novos materiais também pode acarretar em novas fragilidades ou deficiências, as quais muitas vezes não são corretamente detectadas ou diagnosticadas com as metodologias já consolidadas para os equipamentos anteriormente empregados.

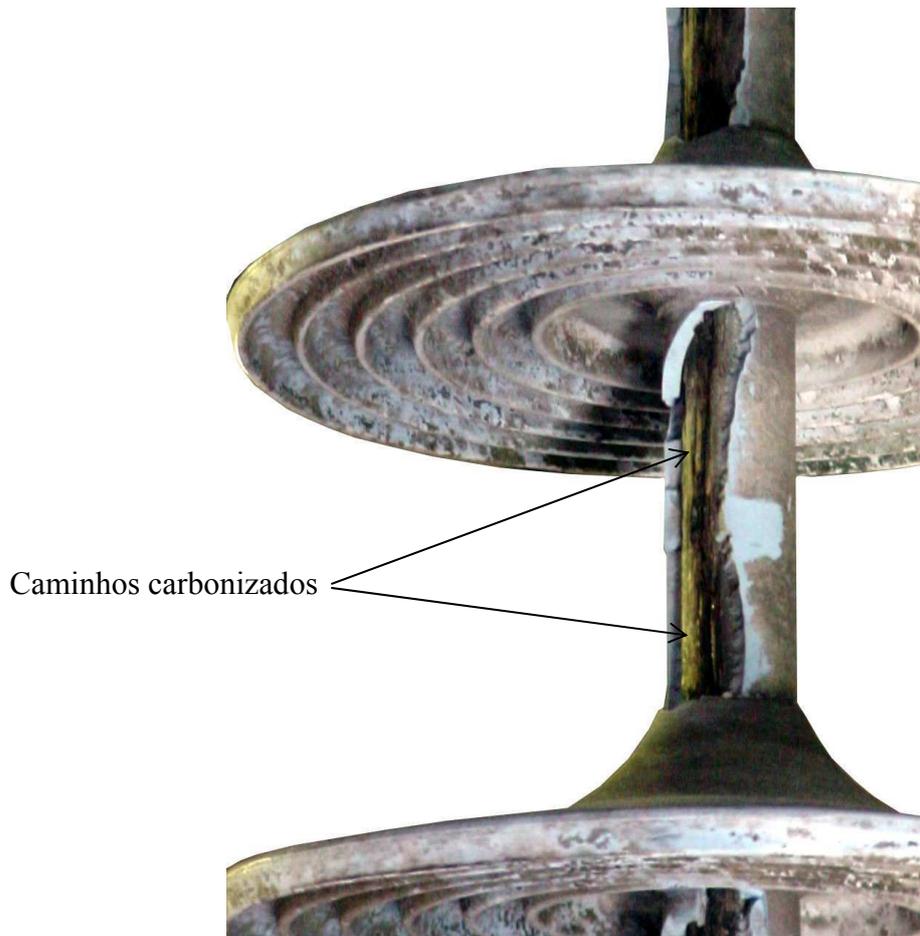
Por fazerem parte da evolução nos sistemas de isolamento, os isoladores poliméricos não fogem à regra e carecem de técnicas confiáveis de diagnóstico. Apesar de apresentarem várias vantagens quando comparados com os isoladores cerâmicos clássicos, como menor peso e hidrofobicidade superior, os isoladores poliméricos requerem mais atenção quanto à manutenção preditiva (YAMAMOTO et al., 2005). Um

dos defeitos para os quais ainda não se tem um diagnóstico preciso é o trilhamento de núcleo (*core tracking*). A integridade do revestimento polimérico não é comprometida durante o processo de desenvolvimento do trilhamento de núcleo. Assim, a detecção do fenômeno somente torna-se efetiva quando a distância de isolamento é pequena o suficiente para que aconteçam curtos-circuitos, colocando em risco a operação da linha.

A motivação para este trabalho vem da grande variedade de agentes degradantes aos quais os isoladores poliméricos estão sujeitos. Os materiais que constituem os isoladores poliméricos devem, portanto, apresentar uma substancial robustez a estes fatores. Dentre os fatores degradantes se incluem agentes mecânicos, químicos, ambientais e elétricos. No caso da degradação elétrica, podem ser utilizados eletrodos de equalização para reduzir o stress elétrico em determinados pontos do isolador, e assim retardar o processo de degradação.

Assim, o objetivo deste trabalho é estudar o mecanismo do trilhamento de núcleo e os seus fatores predominantes, incluindo a geração de calor e o campo elétrico nas regiões de interesse do isolador. Para tanto, foram realizados vários ensaios com o objetivo de reproduzir em laboratório o fenômeno do trilhamento de núcleo. O desenvolvimento do trilhamento em laboratório foi acompanhado com técnicas de monitoramento, como sinais de descargas parciais e fotografias.

Inspeções visuais minuciosas foram realizadas em isoladores retirados de campo com evidências de trilhamento. O resultado das inspeções confirma a importância dos estudos do comportamento térmico e elétrico próximo à ferragem do lado fase do isolador. Constatou-se também a existência da erosão elétrica e ressecamento do material polimérico, localizados na região afetada. Na Figura 1.1, pode ser vista uma fotografia de um isolador polimérico que sofreu trilhamento de núcleo, após cinco anos de operação no campo.



**Figura 1.1. Fotografia de um isolador no qual ocorreu trilhamento de núcleo.**

Com o intuito de conhecer o comportamento térmico e elétrico, mais especificamente a atividade de corona, foram realizados ensaios com várias configurações de anéis de equalização. Para tanto, foram utilizados uma câmera de infravermelho e um detector de corona.

O resultado dos ensaios mostrou uma região com alta temperatura e grande atividade de descarga corona. Assim, simulações computacionais foram realizadas com o intuito de avaliar o campo elétrico na região. As simulações comprovaram que o alto campo elétrico provocava o aumento da temperatura e do corona. Desse modo, uma arquitetura nova de anel equalizador foi proposta.

As imagens térmicas, padrões de corona e sinais de descargas parciais poderão servir para a criação de um banco de dados para referência futura ou treinamento de algoritmos computacionais.

O Capítulo 2, apresentado a seguir, aborda o embasamento teórico necessário à realização deste trabalho, incluindo os equipamentos estudados e as ferramentas empregadas. O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados durante o decorrer do trabalho, sendo seguido do Capítulo 4, onde são apresentados os resultados. No Capítulo 5 é proposto um anel de equalização projetado de forma otimizada para um dos isoladores estudados. O Capítulo 6 finaliza o trabalho, apresentando as principais conclusões e a proposição de trabalhos futuros.

## **Capítulo 2 – Embasamento Teórico**

O estudo dos materiais que compõem os isoladores poliméricos de forma isolada vem sendo feito há anos. Contudo, o conhecimento da evolução degradativa de um isolador completo, principalmente das suas falhas internas, ainda não se encontra totalmente elucidado. O desenvolvimento de técnicas eficazes de detecção de falhas em isoladores poliméricos não é trivial. A integridade do revestimento polimérico é um fator determinante na vida útil do isolador, assim, as técnicas de inspeção devem ser preferencialmente não invasivas. Em laboratório, dispõe-se de uma variedade razoável de técnicas de inspeção não invasivas, todavia, muitas destas técnicas não podem ser levadas a campo, ou não funcionam a contento. Ainda assim, vários centros de pesquisa estudam o assunto e procuram desenvolver um método definitivo e não invasivo de inspeção.

### **2.1. Isoladores Poliméricos**

Isoladores em geral são aplicados a sistemas elétricos com a função de manter a distância de isolamento entre duas estruturas com potenciais elétricos diferentes, impedindo uma circulação indesejável de corrente. Os isoladores podem assumir vários formatos e tamanhos em função das exigências mecânicas, elétricas e ambientais a que serão submetidos. Nas linhas de transmissão, dentre várias aplicações, os isoladores atuam como ponto de sustentação dos cabos. Segundo Gorur et al., (1999), dos atributos pertinentes a um sistema de isolamento, destacam-se:

- Isolamento externo: O isolamento proporcionado pelo ar e pelas superfícies expostas do isolador, ambos, sujeitos ao estresse do dielétrico, intempéries, contaminação, *etc.*
- Isolamento interno: Contempla os elementos internos do isolador, protegidos das intempéries e demais fatores externos.
- Isolamento regenerativo: Isolamentos que recuperam suas propriedades isolantes após a ocorrência de uma descarga. Este tipo de isolamento é, em geral, mas não necessariamente, externo.
- Isolamento não regenerativo: Isolamentos que perdem suas características isolantes, ou não as recuperam completamente, após a ocorrência de uma descarga. Este tipo de isolamento é, em geral, mas não necessariamente, interno.
- Perfuração: Termo utilizado quando uma descarga ocorre através de um dielétrico sólido. Em geral, as perfurações promovem a perda permanente da capacidade isolante.
- Descarga superficial: Descarga que ocorre pelo ar ou sobre a superfície de um isolamento sólido, entre partes de diferente potencial ou polaridade.
- Distância de descarga: A menor distância entre os terminais do isolador, ou a soma das distâncias entre os isoladores intermediários. A menor das duas grandezas será a distância de descarga.
- Comprimento da conexão: a menor distância entre o condutor e a estrutura suporte. Equivale à distância de descarga adicionada às ferragens terminais de um isolador.
- Distância de escoamento: Soma das menores distâncias superficiais isolantes presentes entre as partes condutoras do isolador.

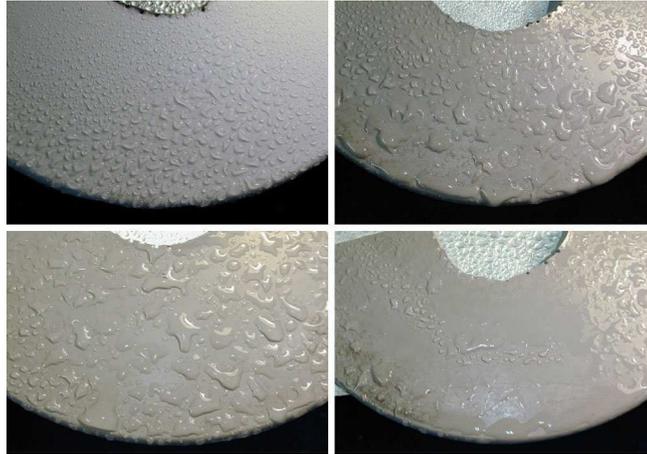
Desde os anos 30 é estudado o emprego de materiais orgânicos em sistemas de isolamento elétrico. A experimentação e os trabalhos realizados mostraram o promissor potencial dos materiais poliméricos. Nos anos 40, os robustos e confiáveis isoladores de vidro e porcelana começaram a ter concorrência. Os primeiros isoladores poliméricos eram inicialmente utilizados em ambientes abrigados, constituindo-se de resina epóxi (HALL, 1993).

Embora os isoladores poliméricos sejam considerados um produto relativamente novo, nos Estados Unidos da América, eles são responsáveis por aproximadamente 20% do mercado de isoladores de linha de transmissão, e sua fatia do mercado só tende a aumentar (HALL, 1993). Até o ano de 2003, os isoladores poliméricos tinham pouca representatividade no sistema elétrico brasileiro, equivalendo a apenas 0,8 % dos isoladores instalados (SANTOS, 2003).

Os isoladores poliméricos representaram a primeira mudança significativa no projeto de materiais usados nos isoladores durante muitos anos. Por ser uma tecnologia relativamente nova, a vida útil dos isoladores baseados em polímeros ainda não se encontra definida.

O pouco peso, resistência ao impacto e possibilidade de usinagem, que permite construção de grandes e complexos isoladores, são os seus principais atrativos, além do seu bom desempenho sob poluição e em áreas com incidência de vandalismo. Os isoladores poliméricos para o uso ao ar livre foram implementados em meados dos anos 50, quando o enchimento de alumina tri-hidratada foi concebido, aumentando a resistência à erosão e trilhamento (tracking). Entretanto, isoladores poliméricos para linhas da transmissão só foram desenvolvidos nos anos 60 e 70. Os isoladores poliméricos vieram finalmente ao uso geral em linhas da transmissão nos anos 80.

Isoladores poliméricos oferecem vantagens significativas sobre os isoladores cerâmicos, especialmente em linhas de transmissão de alta tensão. Seu reduzido peso permite projetos de torres diferenciados e mais econômicos. Por serem constituídos de uma peça única, podem ser usados como espaçadores entre as fases em linhas compactas e limitar o movimento do condutor. A ausência de componentes metálicos (campânula e pino) intermediários e o diâmetro pequeno contribuem ao melhor desempenho e acomodação dos campos eletromagnéticos. Eles também não emitem tanta interferência eletromagnética quanto os isoladores cerâmicos (FONTGALLAND et al., 2004). Possuem maior resistência ao vandalismo, sofrendo menores danos ao serem alvejados por projéteis, e alta relação resistência mecânica/peso, o que garante maiores vãos sem necessidade de torres mais robustas. Quando expostos a ambientes com grandes índices de poluição ou climaticamente hostis, os isoladores poliméricos se destacam graças a uma das mais apreciadas características: a hidrofobia. Esta propriedade repele a água, impedindo a formação de películas de água, diminuindo correntes de fuga (RODURFLEX, 2004a). A hidrofobia pode ser transferida à camada de poluição no decorrer do tempo, garantindo a manutenção da hidrofobicidade mesmo em ambientes poluídos, o que reduz a necessidade de lavagens programadas. A Figura 2.1 apresenta uma amostra de silicone em vários estados da sua hidrofobia, degradável com o passar do tempo.



**Figura 2.1. Envelhecimento da superfície hidrofóbica (YOUNG et al., 1999).**

Por outro lado, os isoladores poliméricos apresentam desvantagens em relação aos isoladores clássicos de vidro e porcelana. A superfície polimérica dos isoladores é dinâmica, sendo afetada pelas condições ambientais, tais como: radiação ultravioleta, poluição, umidade e também pelas descargas elétricas em sua superfície. Este fato dificulta a previsão da vida útil do isolador, estimada entre 30 e 40 anos. Isoladores de vidro e porcelana têm estimativa de vida de 60 a 90 anos (HALL, 1993). O revestimento de borracha polimérica flexível, muitas vezes dificulta a detecção de defeitos por inspeção visual, e frequentemente impossibilita a estimação de defeitos internos, como fraturas e trilhamentos de núcleo. Muitos modelos de isoladores poliméricos não têm a flexibilidade longitudinal adequada, e não amortecem suficientemente as vibrações dos cabos. Engenheiros de empresas de distribuição de energia elétrica, Companhia Elétrica da Borborema (CELB) e Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba (SAELPA), relatam rompimentos de cabos em regiões de grande atividade eólica.

A constituição de um isolador polimérico apresenta três componentes básicos: núcleo, revestimento e ferragens terminais.

### 2.1.1. 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 2.2 pode ser visto um isolador com parte do núcleo aparente.

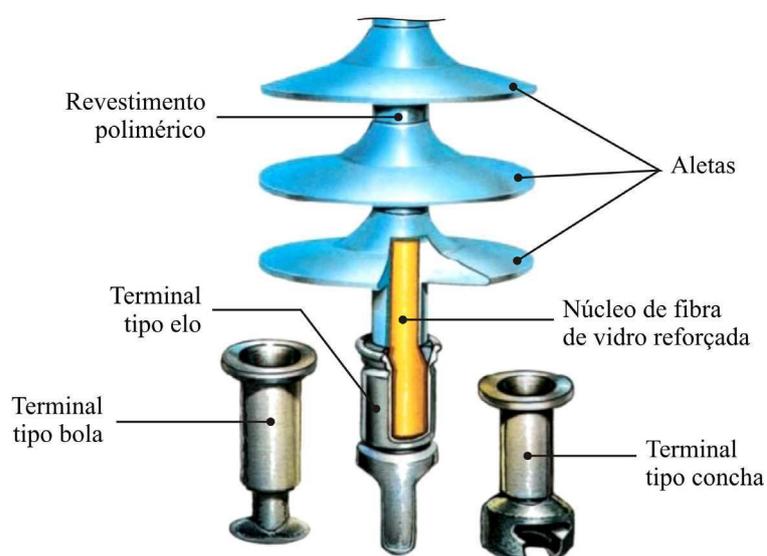


Figura 2.2. Constituição de um isolador polimérico (Rodurflex, 2004b).

### 2.1.2. 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 (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).

### **2.1.3. 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 transmissão com tensão nominal igual ou superior a 69 kV.

## **2.2. Descargas Parciais**

As descargas parciais são pequenos curtos-circuitos localizados, que ocorrem em regiões do dielétrico onde a permissividade elétrica e a rigidez dielétrica são menores, conseqüentemente o campo elétrico tende a se concentrar mais intensamente. Essas regiões geralmente são cavidades no isolamento, rachaduras, interfaces com má aderência, bolhas gasosas, etc. Como permitem a formação de descargas, mesmo em baixa intensidade, elas são causadoras potenciais de defeitos, podendo em muitos casos permitir a evolução das descargas localizadas para uma ruptura completa do isolamento.

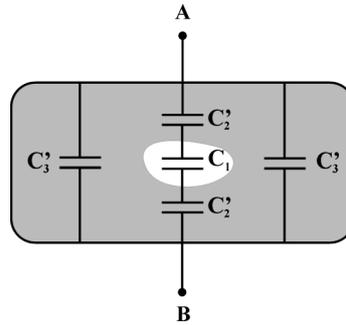
A isolação de qualquer equipamento submetido a tensões elevadas está sujeita à ocorrência das descargas parciais. Em isolamento a base de compostos orgânicos o efeito das descargas parciais pode ser extremamente danoso e causar a sua perfuração total. Quando descargas parciais ocorrem em uma cavidade de um isolador orgânico, as superfícies internas da cavidade atingidas pelas descargas são carbonizadas, e assim, passam a ser condutoras, podendo distorcer e concentrar cada vez mais o campo elétrico na região, e proporcionar o crescimento da cavidade. Entretanto, na maioria dos casos, a atividade de descargas localizadas e de baixa intensidade não conduzirá a ruptura total do isolamento, já que sua evolução é lenta, não configurando risco de falha frente ao tempo de vida útil do equipamento. Assim, o equipamento mesmo com descargas parciais poderá operar por um longo período sem que efeitos danosos sejam notados.

Em dielétricos gasosos as descargas não representam problema maior devido à capacidade auto-regenerativa do gás. Entretanto, em isolantes sólidos e líquidos o nível da energia contido nas descargas pode provocar uma degradação do material.

### **2.2.1. Modelo**

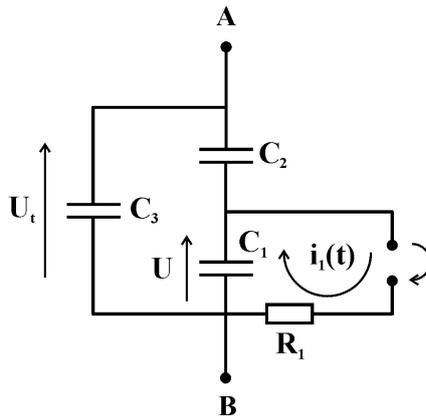
A modelagem de descargas parciais (TETEX, 1984) pode ser feita, inicialmente, considerando um material dielétrico com uma cavidade em seu interior, geralmente

preenchida com ar. Na Figura 2.3 é mostrado o modelo elétrico básico de um material isolante sob ensaio para o estudo da descarga parcial.



**Figura 2.3. Modelo elétrico básico do material sob ensaio.**

Se uma tensão alternada  $U_t(t)$  é aplicada aos eletrodos A e B, o arranjo pode ser modelado, em termos de descargas parciais, através do circuito equivalente mostrado na Figura 2.4.



**Figura 2.4. Circuito equivalente do modelo elétrico básico.**

A capacitância da cavidade é representada por  $C_1$ ; a capacitância do material que está em série com a cavidade é representada por  $C_2 = C_2'/2$ , e  $C_3 = 2C_3'$ , representa a associação das capacitâncias do resto do material.  $R_1$  é a resistência do arco elétrico (descarga).

O processo da descarga elétrica pode ser mais bem compreendido utilizando o gráfico apresentado na Figura 2.5.

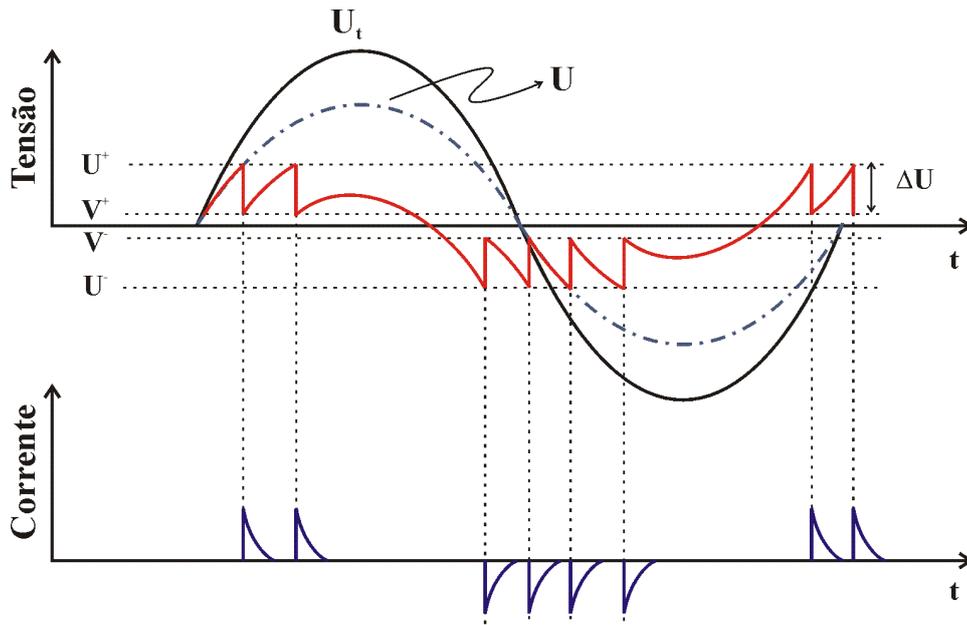


Figura 2.5. Gráfico representativo de descargas parciais em um dielétrico.

A tensão de alimentação alternada aplicada ao material sob ensaio é representada por  $U_i(t)$ ;  $U(t)$  é a parcela de  $U_i(t)$  que deveria apresentar-se na cavidade, caso a descarga elétrica não existisse;  $U^+$  e  $U^-$  são as tensões disruptivas da cavidade para as duas situações de polaridade da tensão de alimentação;  $V^+$  e  $V^-$  são as tensões residuais existentes nas cavidades, após a ocorrência das descargas elétricas, devido à transferência de cargas.

O processo da descarga se inicia quando a tensão na cavidade atinge a  $U^+$ . Neste instante ocorre a ruptura do meio dielétrico e conseqüentemente uma descarga. Este comportamento é semelhante à aplicação de um degrau de tensão igual a  $U^+ - V^+$  sobre o capacitor  $C_1$ . Após a extinção da descarga, a tensão na cavidade se reduz a  $V^+$ , e volta a crescer. Ao atingir novamente a tensão disruptiva, ocorre outra descarga. Apesar da Figura 2.5 apresentar apenas quatro descargas em cada semiciclo, o processo pode se repetir várias vezes. No processo, o intervalo entre o início e a extinção da descarga é extremamente rápido, geralmente da ordem de 100 ns (KREUGER, 1989). Portanto, as descargas formam pulsos de correntes de alta frequência nos terminais das amostras, como também pode ser observado na Figura 2.5. Outro fato importante a ser observado é

que os pulsos se concentram nas regiões onde o gradiente de tensão em relação ao tempo é máximo.

No processo de geração das descargas parciais, as tensões disruptivas e residuais são simétricas, o que deveria provocar, teoricamente, a observação de um gráfico estático no osciloscópio, ou seja, o processo de descarga se repetiria de maneira igual em todo o período de aplicação da senóide. Caso esta simetria não ocorra, as descargas seriam intermitentes, que é o que acontece em situações reais. Portanto, sinais de descarga parcial não podem ser considerados estacionários e bem localizados no tempo.

## **2.3. Termografia**

A radiação eletromagnética infravermelha foi descoberta no ano de 1800, por William Herschel, astrônomo inglês de origem alemã. Hershell colocou um termômetro de mercúrio no espectro obtido por um prisma de cristal com a finalidade de medir o calor emitido por cada cor. Descobriu que o calor era mais forte ao lado do vermelho do espectro, observando que ali não havia luz. Esta foi a primeira experiência que demonstrou que o calor pode ser captado em forma de imagem, como acontece com a luz visível, (WIKIPEDIA, 2006a).

A radiação eletromagnética infravermelha tem comprimento de onda maior que o da luz visível, ficando logo abaixo do vermelho e, portanto, invisível a olho nu. No espectro eletromagnético, os infravermelhos se subdividem em infravermelhos curtos (0,7 a 5  $\mu\text{m}$ ), infravermelhos médios (5 a 30  $\mu\text{m}$ ) e infravermelhos largos (30 a 1000  $\mu\text{m}$ ) (WIKIPEDIA, 2006a).

### **2.3.1. 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.

### **2.3.2. Critérios de avaliação**

As decisões e recomendações que devem ser tomadas a partir do resultado de inspeções termográficas dependem de critérios existentes em norma, cuja aplicação se torna mais precisa a partir da experiência do operador ou analista das imagens. Os critérios apresentados na Tabela 2.1 são um exemplo de recomendações feitas pela *International Electrical Testing Association* (apud EPPERLY et al., 1999, p. 34) quando da avaliação de isoladores poliméricos.

Tabela 2.1. Critérios de avaliação NETA MTS (apud EPPERLY et al., 1999, p. 34).

| Diferença de temperatura entre equipamentos similares, nas mesmas condições de carga. | Diferença entre a temperatura do equipamento e a ambiente. | Ação recomendada   |
|---|--|--|
| 1°C a 3°C   | 1°C a 3°C  | Possível deficiência; justifica investigação.                                |
| 4°C a 15°C  | 11°C a 20°C  | Indica provável deficiência; reparar quando possível.                        |
| ---   | 22°C a 40°C  | Monitorar continuamente até que uma manutenção corretiva possa ser efetuada. |
| > 16°C  | > 40°C   | Reparar imediatamente.   |
| Obs.: As temperaturas especificadas variam dependendo do tipo do equipamento.         |  |  |

## 2.4. Trilhamento Elétrico em Compostos Orgânicos

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).

#### **2.4.1. Reações dos Polímeros ao Campo Elétrico**

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 as 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 (equação 1) estabelece que a mudança na tensão mecânica interfacial  $\Delta\gamma$  é oriunda da diferença de potencial elétrico  $\Delta V$  através da interface:

$$\Delta\gamma = -q\Delta V, \quad (1)$$

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 na equação (2) considerando-se o balanço entre forças elétricas e mecânicas:

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

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 pela equação (2) 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 na equação (2) 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

$$\Delta\gamma = \int_0^d \Delta\sigma(z) dz, \quad (3)$$

e então

$$\Delta\sigma(z) = -\varepsilon(z)E^2(z). \quad (4)$$

Este resultado indica que o dielétrico está sujeito em toda parte a um estresse mecânico,  $\varepsilon E^2$ , tendendo a se expandir contra as forças coercivas no sentido ortogonal ao campo  $E$  em cada ponto, como representado na Figura 2.6.

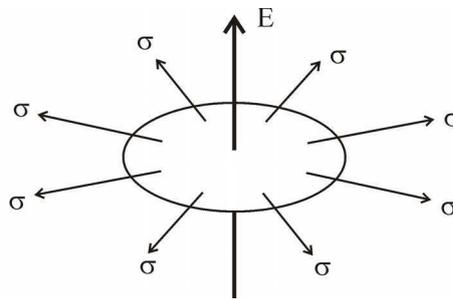


Figura 2.6. Estresse tensor  $\sigma(z)$  ortogonal ao campo elétrico  $E(z)$ .

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, pela equação (4) 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. Detector 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 2.7 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.

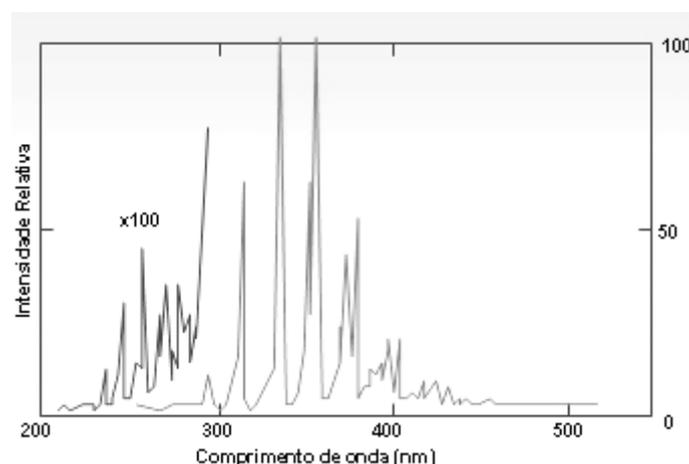
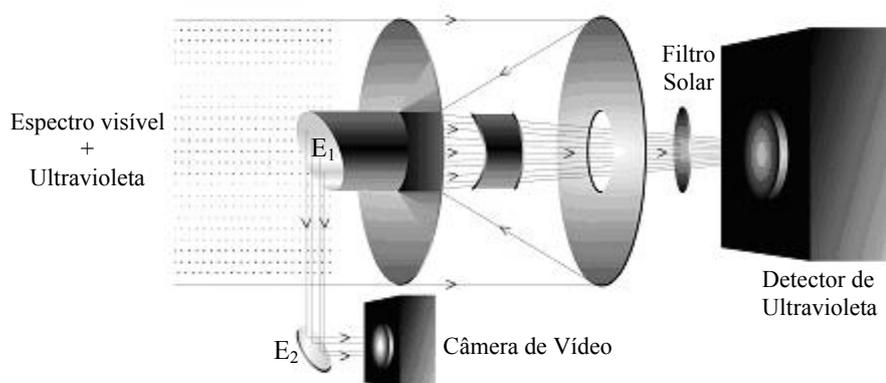


Figura 2.7. Espectro típico de uma descarga corona no ar (LINDNER et al., 1999).

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 2.8 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).



**Figura 2.8. Princípio de funcionamento do DayCor (LINDNER, 2004).**

Testes realizados com o detector de corona utilizado comprovaram que o equipamento é capaz de medir sinais com até 30 pC de intensidade a 6 m de distância. O equipamento pode ser utilizado para medir descargas corona a uma distância de 3 a 100 m, com boa relação sinal-ruído (LINDNER et al., 1999).

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.

## **2.6. Método dos Elementos Finitos (MEF)**

Diversos problemas com importância para a engenharia podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais, como a Equação de Poisson, Equação de Laplace, Equação de Helmholtz, Navier-Stokes, etc. Todavia, com exceção de alguns casos particulares, não é possível obter uma solução analítica exata para estes problemas (PEREIRA, 2005). Segundo Huebner (1995), o MEF apresenta como atrativo a capacidade de oferecer uma forma de solução de problemas complexos e contínuos, subdividindo-os em vários problemas menores, discretos e correlacionados entre si.

O MEF teve seu desenvolvimento iniciado em 1943, por Richard Courant, que usou o Método de Ritz, datado de 1909, na obtenção de soluções aproximadas para problemas relativos a sistemas de vibração (NELSON, 2006). Em 1956, um artigo publicado por Turner et al. (1956) estabeleceu uma definição mais abrangente da análise numérica, concentrando esforços na rigidez e na deflexão de estruturas complexas. Contudo, apenas em 1968 o método foi aplicado pela primeira vez a eletromagnetismo (SADIKU, 1989).

Até final do decênio de 1970, o MEF tinha uso limitado aos *mainframes*, mas desde o declínio do custo computacional, tem sido amplamente utilizado e apresentado resultados tão precisos quanto requer o problema a que o método se aplica. Devido às suas características de flexibilidade e estabilidade numérica, o MEF pode ser implementado na forma de um sistema computacional de forma consistente e sistemática, fato que explica a sua grande popularidade nos dias atuais. Além de permitir a análise de

problemas práticos, o MEF diminui custos de projeto, pois permite a simulação computacional de vários fenômenos físicos e seus efeitos, antes da construção de um protótipo do equipamento. As suas principais áreas de aplicação incluem: projeto e análise de estruturas, análise de escoamento de fluidos, distribuição de temperaturas e eletromagnetismo (PEREIRA, 2004).

A maioria das publicações didáticas disponíveis acerca do MEF trata de aplicações em engenharia mecânica e civil. Existem publicações didáticas direcionadas para solução de problemas eletromagnéticos, todavia, as abordagens sempre partem de exemplos práticos ou numéricos, já que o método baseia-se fortemente nas propriedades físicas do problema analisado.

Segundo Sadiku (1989), a análise de problemas através do MEF envolve basicamente quatro passos. O uso prático do MEF, contudo, impõe a adição de um quinto passo, o qual será descrito a seguir juntamente com os demais.

#### **a) Discretização**

A discretização de um problema consiste na representação abstrata da região, equipamento ou corpo que se deseja analisar, e na subdivisão desta representação em um número finito de elementos. A geometria dos elementos tem forma, em geral, de polígonos simples, como triângulos, quadriláteros, pentágonos, etc. O problema de um corpo completo, “o todo” na linguagem de MEF, passa a ser tratado como a solução de vários problemas menores e correlacionados entre si. Os pontos comuns entre os elementos são os nós, onde os resultados das análises devem ser computados. Na Figura 2.9 é possível observar as etapas de discretização de um isolador cerâmico.

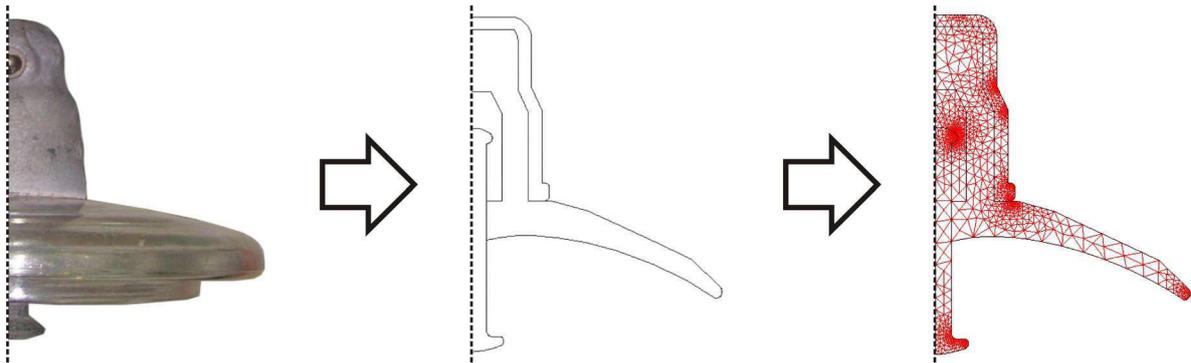


Figura 2.9. Etapas de discretização de um isolador cerâmico.

### b) Equacionamento dos elementos

Neste passo, um modelo equacional é definido, com o intuito de reger fisicamente os elementos. A escolha do modelo equacional varia amplamente de acordo com o problema físico analisado. São exemplos: a Lei de Hooke, a Lei de Fourier, a Equação de Poisson, dentre outras equações que regem fenômenos físicos.

Em seguida, são montadas as matrizes de coeficientes para cada um dos elementos. A partir destas matrizes originam-se equações matriciais, baseadas no modelo físico adotado. Cada elemento possui uma matriz de elementos e uma equação matricial, relacionando-o com a grandeza física sob a óptica da qual está sendo analisado. A equação matricial descreve, portanto, as possíveis variações de grandezas dos nós pertencentes a um dado elemento. Estas possíveis variações são os graus de liberdade de cada nó.

### c) Junção dos elementos

Todas as matrizes de coeficientes são utilizadas para a montagem da matriz de coeficientes global. Esta matriz global define o acoplamento entre quaisquer dois nós da malha, e tem por características ser simétrica e esparsa. Assim, a equação matricial resultante da combinação das equações matriciais dos elementos representa um sistema de equações. Este sistema terá tantas equações quantos forem os graus de liberdade

presentes nos nós do sistema analisado. Todavia, este sistema ainda não é solucionável, pois tem mais incógnitas do que equações.

Para diminuir o número de incógnitas, aplicam-se as condições de contorno. Alguns nós tem grandezas físicas conhecidas e constantes, e os valores numéricos correspondentes a estas grandezas devem ser alocados na matriz de coeficientes global. Em aplicações no eletromagnetismo, os nós pertencentes a superfícies aterradas, por exemplo, têm valor de tensão definido e igual a zero.

#### **d) Solução do sistema**

O sistema de equações representado na equação matricial global é então solucionado através de métodos tradicionais, diretos ou indiretos. A solução do sistema fornecerá os valores numéricos correspondentes a cada grau de liberdade de cada nó do sistema.

Muitos problemas de eletromagnetismo apresentam nós com um só grau de liberdade. Este grau de liberdade pode representar, por exemplo, o potencial elétrico. A partir do valor de potencial elétrico, e utilizando-se o modelo equacional adotado, podem-se determinar outras grandezas.

#### **e) Visualização**

Os ambientes computacionais de simulação baseados no MEF devem dispor de ferramentas visuais e numéricas de representação, permitindo identificar todas as implicações da análise. Estas implicações apontam as regiões críticas onde podem existir fragilidades mecânicas, concentrações de campo e outros aspectos importantes à avaliação do caso analisado.

Apesar de apresentar soluções aproximadas, a exatidão do MEF pode ser melhorada com o refinamento da malha. Existe um nível ótimo de refinamento que proporciona uma solução mais próxima da realidade com um esforço computacional razoável. Há, no entanto, um limite para o número de elementos, a partir do qual os erros de arredondamento se acumulam de tal forma que um aumento do número de elementos não traz uma melhora na precisão.

### **2.6.1. O software FEMLAB®<sup>1</sup>**

O FEMLAB (*Finite Element Method Laboratory*) é um ambiente computacional construído com a meta de modelar, projetar e analisar problemas científicos que podem ser solucionados através de equações diferenciais parciais.

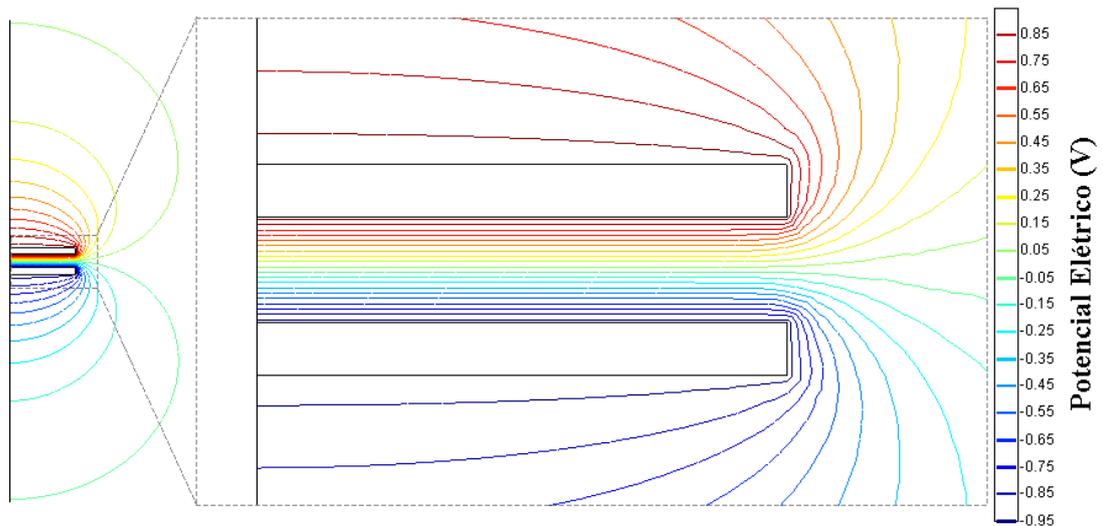
A facilidade associada ao FEMLAB reside na construção direta do objeto a ser analisado, atribuindo-lhe as grandezas e constantes físicas, sem a necessidade da construção das equações do MEF ou escrever rotinas de solução. Além disso, o FEMLAB faz uso de algoritmos que permitem a definição adaptativa da malha, e dispõe de vários métodos numéricos para resolver o sistema de equações, pois trabalha associado ao MATLAB®<sup>2</sup>.

O módulo 3.1 do FEMLAB trata da análise de problemas que tangem o eletromagnetismo, englobando problemas magnetostáticos, quase-estáticos e ondas eletromagnéticas (COMSOL AB., 2004). Um exemplo clássico de distribuição de potencial analisado no FEMLAB pode ser visto na Figura 2.10.

---

<sup>1</sup> FEMLAB é marca registrada de COMSOL AB.

<sup>2</sup> MATLAB é marca registrada de The Mathworks, Inc.



**Figura 2.10. Distribuição de potencial entre placas paralelas calculada pelo FEMLAB.**

O uso do software pode agilizar a análise de problemas científicos e de engenharia sem, contudo, exigir profundo conhecimento matemático, físico e de materiais acerca do problema. Todavia, o entendimento do fenômeno físico, o conhecimento das características físicas dos materiais envolvidos bem como a compreensão do algoritmo utilizado no MEF são recomendados, ou o risco de resultados equivocados serem assumidos como verdadeiros torna-se grande.

## Capítulo 3 - Materiais e Métodos

Com o intuito de estudar o mecanismo do trilhamento de núcleo e os seus fatores predominantes, incluindo a geração de calor e o campo elétrico nas regiões de interesse do isolador, vários ensaios foram realizados com o objetivo de reproduzir em laboratório o fenômeno do trilhamento de núcleo. Como o trilhamento de núcleo é um fenômeno interno ao isolador, possuindo pouca literatura técnica e nenhum ensaio normalizado que o contemple, os ensaios elétricos e não elétricos foram definidos ao longo da pesquisa. O objetivo dos ensaios foi a aferição de indícios ou sintomas que denunciassem a formação do trilhamento.

Para uma compreensão mais abrangente do fenômeno trilhamento de núcleo, foram realizados dois tipos de experimentos:

- de análise, buscando explicitar os efeitos da concentração de campo e de temperatura em isoladores da classe 230 kV, sob influência de vários tipos de anéis de equalização, e mesmo na ausência dos anéis;
- de reprodução, buscando recriar indícios de trilhamento de núcleo em laboratório em tempo reduzido, utilizando isoladores em arranjos que propiciem os fatores necessários para a propagação da carbonização e arborescência.

### 3.1. Materiais

#### 3.1.1. Materiais para os experimentos de análise dos efeitos da concentração

As amostras empregadas nos ensaios de análise são amostras de isoladores poliméricos novos ou retirados de campo com até cinco anos de uso, com classe de 230 kV e peso de aproximadamente 8,8 kg. Na Figura 3.1 é exibida uma fotografia de um dos isoladores utilizados nos ensaios.

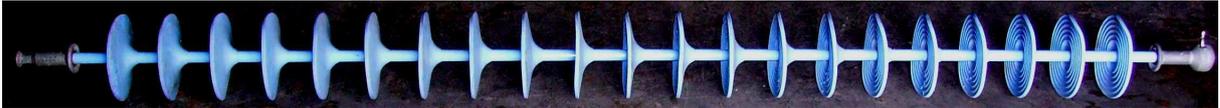


Figura 3.1. Fotografia de um isolador de 230 kV.

A amostra possui núcleo composto de fibra de vidro reforçada com resinas, e é revestido por uma fina camada de material isolante e por aletas. A camada isolante é composta de borracha a base de silicone de alta temperatura de vulcanização. O isolador possui 21 aletas e pode suportar uma carga mecânica de 222 kN. Seus terminais são do tipo concha/bola. Suas características dimensionais podem ser vistas na Figura 3.2.

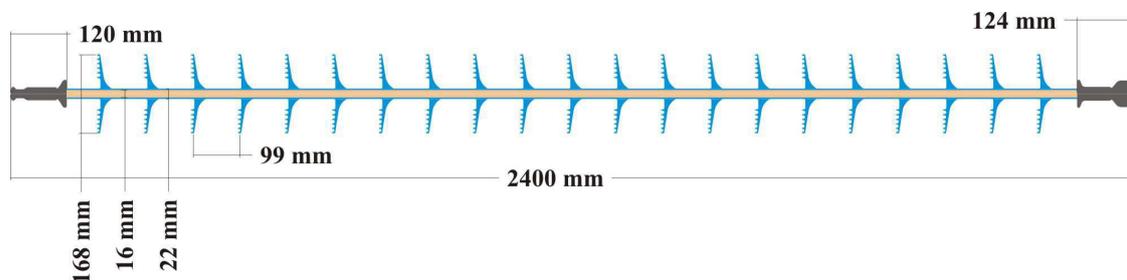


Figura 3.2. Diagrama do isolador utilizado nos ensaios de análise.

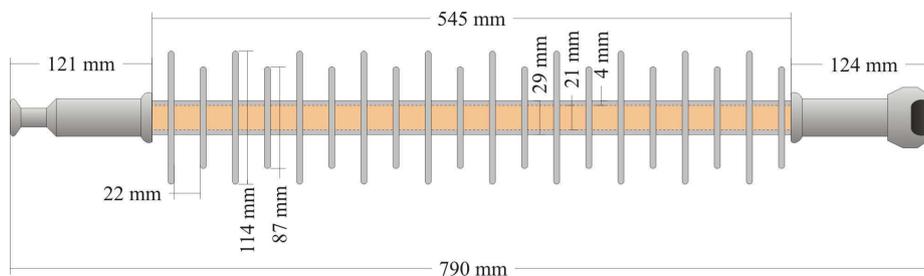
#### 3.1.2. Materiais para os experimentos de reprodução de indícios de trilhamento

Nos experimentos de indícios de trilhamento, as amostras utilizadas são isoladores poliméricos retirados de campo, com classe de 69 kV, pesando aproximadamente 3 kg. Na Figura 3.3 é exibida uma fotografia de um dos isoladores utilizados nos ensaios.



**Figura 3.3. Fotografia do isolador utilizado nos experimentos indícios de trilhamento.**

O núcleo das amostras é composto de fibra de vidro reforçada com resinas, e é revestido por uma fina camada de material isolante e por aletas. A camada isolante é de um composto elastomérico, constituído de silicone e EPDM (etileno-propileno-dieno). O isolador possui 20 aletas e pode suportar uma carga mecânica de 120 kN. Seus terminais são do tipo concha/bola. Suas características dimensionais podem ser vistas na Figura 3.4.



**Figura 3.4. Diagrama do isolador utilizado nos ensaios de reprodução de indícios de trilhamento.**

## **3.2. Métodos**

### **3.2.1. Métodos para os experimentos de análise dos efeitos da concentração**

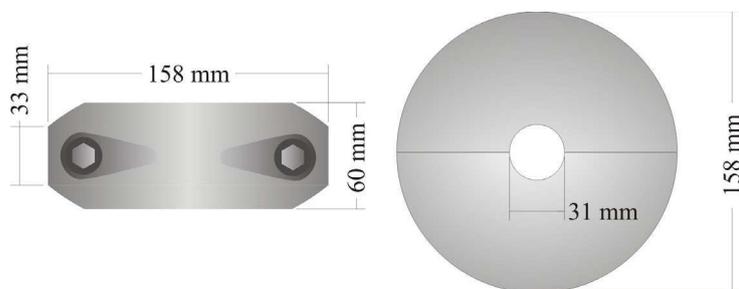
Os métodos para a análise foram idealizados com o intuito de registrar padrões térmicos e de corona que acelerem o surgimento do trilhamento de núcleo. Os experimentos foram motivados por ocorrências de falhas em isoladores poliméricos com apenas cinco anos de uso, em linhas de transmissão da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). Os isoladores que falharam apresentaram indícios de trilhamento de núcleo, e em alguns casos houve o rompimento mecânico da fibra de vidro, seguido da queda da linha. Várias comissões de estudo foram feitas, contudo, a responsabilidade da falha ainda não foi determinada. O fabricante afirma que os anéis de equalização não foram instalados corretamente, apesar de haver forte suspeita de que o anel recomendado

esteja subdimensionado para aplicações em 230 kV. A Concessionária afirma que utilizou o anel de equalização fornecido na compra.

Assim, ensaios laboratoriais foram idealizados com diferentes anéis de equalização, em várias configurações. O comportamento térmico e a ocorrência de corona deverão ser registrados para todas as configurações experimentais. Os padrões térmicos deverão ser obtidos com uma câmera de infravermelho, e a ocorrência de corona registrada com uma câmera de ultravioleta.

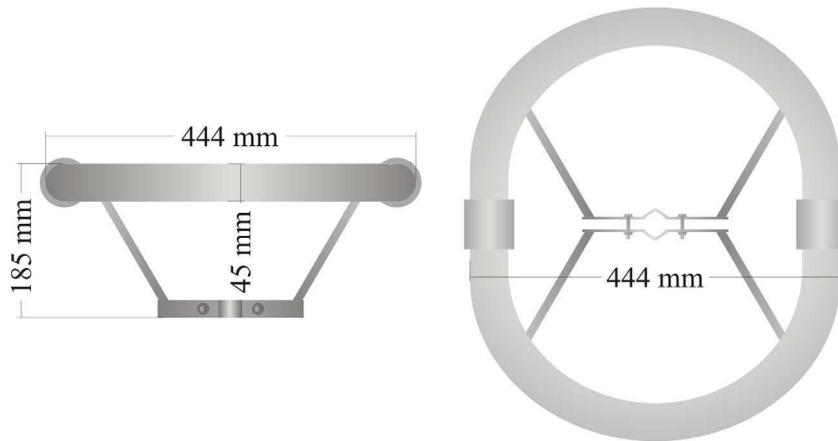
Neste sentido, os experimentos de análise buscam também avaliar o desempenho do anel de equalização recomendado pelo fabricante, em suas várias configurações de montagem, tanto de forma correta quanto de formas incorretas. Os anéis equalizadores e demais equipamentos utilizados são descritos a seguir.

a) Um anel equalizador com 158 mm de diâmetro foi recomendado pelo fabricante do isolador. No decorrer do texto este anel será denominado por A158 e seus detalhes dimensionais podem ser vistos na Figura 3.5.



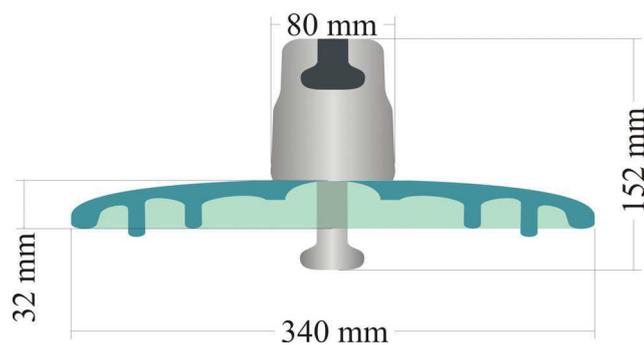
**Figura 3.5. Diagrama do A158 com características dimensionais.**

b) Um anel equalizador com 444 mm de diâmetro projetado para uso em cadeias de isoladores cerâmicos, em linhas de classe 230 kV também deverá ser avaliado. No decorrer do texto este anel será denominado por A444 e seus detalhes dimensionais podem ser vistos na Figura 3.6.



**Figura 3.6. Diagrama do anel de A444 mm com características dimensionais.**

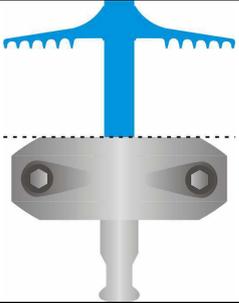
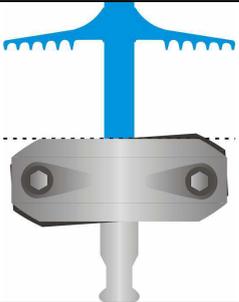
c) Isolador de vidro: Utilizado como extensão do isolador polimérico, entre a ferragem fase do isolador e o condutor. Sua aplicação visa reproduzir um arranjo freqüentemente adotado pelas concessionárias, que estendem comprimento da conexão associando isoladores cerâmicos a isoladores poliméricos. Contudo, os esforços termelétricos associados a esta extensão não são claramente documentados. Com a montagem e ensaio deste tipo de arranjo, pretende-se avaliar a influência dos isoladores cerâmicos nos esforços a que o isolador polimérico será submetido. Os detalhes dimensionais dos isoladores de vidro utilizados nas montagens podem ser vistos na Figura 3.7.

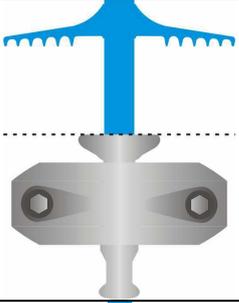
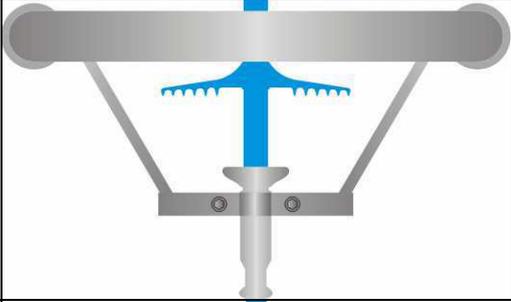


**Figura 3.7. Diagrama do isolador de vidro, com características dimensionais.**

As configurações ensaiadas com os anéis equalizadores e isoladores de vidro supracitados são mostradas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1. Configurações de anéis e isoladores de vidro utilizados.**

|                       |   |  |
|-----------------------|---|--|
| <p><b>Tipo O</b></p>  |    | <p>Uso do isolador sem nenhum tipo de anel de equalização ou associação de isolador de vidro.</p>  |
| <p><b>Tipo A1</b></p> |    | <p>Anel de equalização A158, em posição correta e montado corretamente. A linha pontilhada coincide com a extremidade superior da ferragem fase.</p>                         |
| <p><b>Tipo A2</b></p> |   | <p>Anel de equalização A158 em posição incorreta, acima do indicado. A linha pontilhada coincide com a extremidade superior da ferragem fase.</p>                            |
| <p><b>Tipo A3</b></p> |  | <p>Anel de equalização A158 em posição incorreta, bastante acima do indicado, sobre o polímero. A linha pontilhada coincide com a extremidade superior da ferragem fase.</p> |
| <p><b>Tipo A4</b></p> |  | <p>Anel de equalização A158 em posição correta, mal encaixado. A linha pontilhada coincide com a extremidade superior da ferragem fase.</p>                                  |

|         |   |   |
|---------|---|---|
| Tipo A5 |    | <p>Anel de equalização A158 em posição incorreta, pouco abaixo do recomendado. A linha pontilhada coincide com a extremidade superior da ferragem fase.</p> |
| Tipo B  |    | <p>Anel de equalização A444, em posição correta.</p>  |
| Tipo C1 |   | <p>Isolador de vidro colocado entre o isolador polimérico e o condutor.</p>   |
| Tipo C2 |  | <p>Dois isoladores de vidro colocados entre o isolador polimérico e o condutor.</p>   |

Em todos os ensaios, a tensão aplicada foi 146 kV, determinados a partir da tensão de operação dos isoladores e do fator de tensão máxima a que eles são expostos:

$$V_E = \frac{V_{OL}}{\sqrt{3}} \cdot F_{TM}, \quad (5)$$

em que,

VE é a tensão aplicada do ensaio, em kV;

VOL é a tensão de operação na linha, 230 kV, neste caso, e

FTM é o fator de máxima tensão de operação do sistema (1,1).

Cada arranjo deverá ficar submetido à tensão durante duas horas, tempo necessário para que o isolador atinja seu regime permanente eletrotérmico. Em seguida serão realizadas as inspeções termográficas e de nível de corona.

Nas avaliações termográficas, dois pontos de medição de temperatura das imagens termográficas serão escolhidos da seguinte maneira: o primeiro, na região mais quente do isolador, em geral acima do anel e abaixo da primeira aleta; o segundo ponto de medição pode ser qualquer parte do corpo do isolador, desde que represente a sua temperatura dominante.

### 3.2.2. Métodos para os experimentos de reprodução de indícios de trilhamento

Os ensaios objetivando a reprodução dos indícios de trilhamento deverão ser realizados em sala blindada para aquisição de descargas parciais e implementados a partir do circuito específico ilustrado na Figura 3.8, em conformidade com a IEC 60270 (2000).

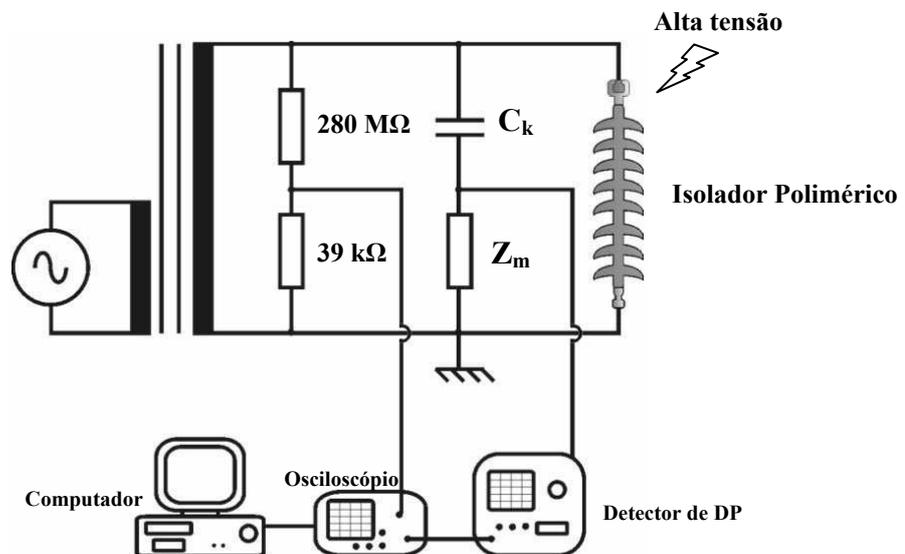
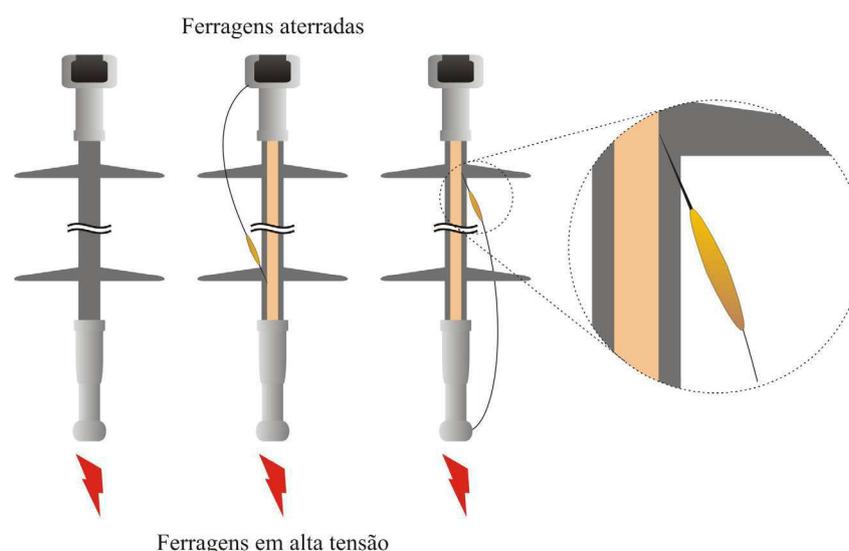


Figura 3.8. Circuito de medição e aquisição de dados.

O circuito para medição de descargas parciais é constituído das seguintes partes: mesa de controle (Ferranti), filtros de linha, transformador de 220 V/100 kV-10 kVA, detector de descargas parciais (Biddle), capacitor de acoplamento ( $C_k$ ) de 2 nF/100 kV imune a descargas parciais, isoladores poliméricos, resistor de 39 k $\Omega$ , resistor de alta tensão de 280 M $\Omega$  e um osciloscópio digital TDS 2014 (Tektronix). A impedância de medição ( $Z_m$ ) encontra-se no interior do detector de descargas parciais. Os dois resistores foram conectados em série e formam um divisor de tensão resistivo. A relação do divisor de tensão é de 7.179,5.

O método a seguir é inspirado em trabalhos desenvolvidos por Costa (1981) e Morita et. al (2003), dentre outros. Para que a concentração de campo ocorra no isolador polimérico, é sugerida a inserção de um eletrodo agudo, através do revestimento polimérico, de forma a entrar em contato com o núcleo, mas não perfurá-lo. Este eletrodo deve ser conectado a uma das ferragens terminais do isolador, e aplicado a uma distância adequada da outra ferragem, conforme mostrado na Figura 3.9. A distância de aplicação do eletrodo é definida de acordo com o nível de tensão que se pretende aplicar e, nos ensaios realizados até então, fica em torno de 20 cm.



**Figura 3.9. Esquema da aplicação do eletrodo agudo.**

Inicialmente deve ser montado o arranjo no laboratório de descargas parciais, incluindo-se apenas o isolador, o sistema de detecção de descargas e o sistema de aquisição de dados.

Para prevenir a interferência de equipamentos eletrônicos na detecção das descargas, o osciloscópio e demais equipamentos de aquisição de dados serão instalados fora da sala blindada. Os sinais com informações de descargas são transmitidos do detector para o sistema de aquisição através de cabos coaxiais blindados.

Para se ter uma noção do ruído ambiente em situações de detecção de descargas de pequena intensidade é necessário distinguir o ruído de fundo das descargas parciais. Assim, após a montagem, deve-se realizar a medição dos níveis de ruído. Como existe um nível mínimo de ruído presente nos sinais de descargas parciais inerente ao ambiente, a medição deste nível de ruído deve ser realizada com detector de descargas parciais energizado e tensão nula. Além deste ruído ambiente, deve-se validar a medição de descargas parciais com a presença de corona na montagem, isto é, com os equipamentos energizados. Para evitar o corona, deve-se reduzir ao máximo a incidência de conexões mal feitas, a existência de pontas na montagem e pequenos objetos metálicos soltos no ambiente de ensaio.

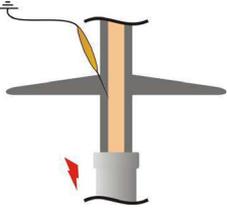
Após a realização da medição dos níveis de ruídos e com o intuito de garantir a concentração do campo elétrico, o eletrodo agudo deve ser introduzido no revestimento polimérico. O arranjo completo deve ser energizado paulatinamente até que os níveis de descargas parciais atinjam 300 pC, supondo-se que as atividades das descargas parciais sejam suficiente para causar carbonização do núcleo em análise. O valor de 300 pC foi tomado como referência baseado na experiência laboratorial do autor. Como uma tensão maior foi utilizada na aferição, garante-se que as atividades das descargas presentes são oriundas da ponta do eletrodo agudo ou das suas conexões.

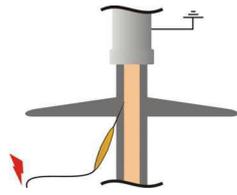
Um teste preliminar para certificação de que as descargas de fato ocorrem no eletrodo agudo deve ser implementado. Assim, o eletrodo agudo deve ser retirado do arranjo, mas toda a estrutura que o acompanha deve ser conservada. No lugar do eletrodo agudo deverá ser colocado um objeto similar, constituído de material isolante. Para se trabalhar de maneira conservativa, a tensão deve ser novamente aplicada, excedendo em 30% a tensão que se aplicou ao eletrodo agudo condutor e o nível das descargas não deve exceder ao nível apresentado com o eletrodo agudo condutor. Assim, garante-se que as descargas estarão ocorrendo em decorrência da concentração de campo elétrico proveniente do eletrodo agudo.

Os ensaios devem ser realizados durante um período de aproximadamente 168 horas, ou seja, uma semana completa. Durante todo o período dos ensaios, a aquisição dos sinais de descargas parciais deverá ser feita. As informações coletadas durante os ensaios devem ser armazenadas para avaliação e possível uso futuro no desenvolvimento de softwares baseados em inteligência artificial.

Os ensaios deverão ser desenvolvidos em três arranjos diferentes no intuito de perceber qual deles é mais eficiente na aceleração da carbonização, conforme pode ser observado na Tabela 3.2. Para tanto, duas agulhas serão utilizadas: uma agulha empregada em máquina de costura (tipo seco) e outra de uso na injeção de medicamentos (com presença de umidade).

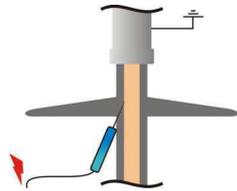
**Tabela 3.2. Variantes do método proposto.**

|  |  |
|--|--|
| <p><b>• Eletrodo aterrado, seco.</b></p>  | <p>O eletrodo é conectado à ferragem do lado aterrado do isolador, e aplicado próximo à ferragem do lado fase.</p> |
| <p><b>• Eletrodo em alta-tensão, seco.</b></p>   |  |



O eletrodo é conectado ao lado fase e aplicado próximo à ferragem do lado terra.

• **Eletrodo em alta-tensão, com presença de umidade.**



O eletrodo é conectado ao lado fase e aplicado próximo à ferragem do lado terra. A agulha utilizada é vazada, permitindo a entrada da água presente.

Após a realização dos ensaios, os isoladores devem ser desconectados do arranjo e ter o revestimento polimérico removido, deixando o núcleo exposto. Uma inspeção visual minuciosa na região onde o eletrodo agudo encostava-se ao núcleo deve ser realizada. A inspeção tem como objetivo localizar os possíveis indícios de trilhamento de núcleo, e caso estes indícios sejam pouco perceptíveis a olho nu, o microscópio óptico deverá ser empregado.

## Capítulo 4 – Resultados

Os vários tipos de ensaios descritos em Materiais e Métodos foram realizados fornecendo resultados de importância significativa para a pesquisa em desenvolvimento. A maioria dos ensaios utilizou equipamentos sofisticados de detecção de fenômenos físicos, como radiação infravermelha (termovisor), radiação ultravioleta (detector de ultravioleta) ou intensidade de descargas parciais. Todavia, alguns resultados experimentais essenciais foram obtidos através de inspeções visuais minuciosas nos isoladores empregados nos ensaios ou retirados de campo. Dentre os resultados obtidos por inspeção visual, destaca-se a detecção de ressecamento do revestimento polimérico em função do ângulo de incidência do vento no equipamento.

Os demais resultados, conforme organização adotada no Capítulo 3, serão apresentados nas seguintes seções: Resultados dos ensaios de análise dos efeitos da concentração; Resultados dos ensaios de reprodução de indícios de trilhamento.

### **4.1. Resultados dos ensaios de análise dos efeitos da concentração**

Os resultados dos ensaios de análise detalham os efeitos da concentração de campo e de temperatura em isoladores da classe 230 kV, sob influência de vários tipos de anéis de equalização, e mesmo na ausência dos anéis. Os resultados constituem-se de imagens termográficas e imagens feitas com câmera de ultravioleta.

Os ensaios de análise foram realizados em três isoladores poliméricos classe 230 kV:

- a) IN: Isolador novo e limpo;

- b) IC01S: Isolador envelhecido 5 anos no campo, com poluição;
- c) IC02S: Isolador envelhecido 4 anos no campo, com poluição;
- d) IC02L: Isolador envelhecido 4 anos no campo (mesmo usado no item c), com poluição removida.

Os isoladores envelhecidos no campo estavam instalados nas linhas com eletrodos de equalização A158. O isolador IC01S não pôde ser lavado porque constitui prova em atribuição de responsabilidades num processo acerca de uma falta ocorrida em uma linha de transmissão.

Para cada uma destas situações, foram realizadas inspeções termográficas e com câmara ultravioleta, utilizando-se nove configurações diferentes de anéis de equalização, conforme Tabela 3.1, mostrada no item 3.2.1 (página 35). Assim, no total, foram inspecionados 36 casos diferentes, variando-se isoladores, anéis e condições de poluição.

Para facilitar a avaliação das imagens térmicas, a mesma escala de temperatura deve ser tomada em todas as termovisões. Contudo, os ensaios apresentados neste trabalho manifestaram, em alguns casos, grandes variações de temperatura; em outros casos, as variações foram mínimas. Assim, caso a escala ampla de temperatura fosse mantida em todas as medições, pequenos gradientes térmicos ficariam imperceptíveis. Por outro lado, se uma escala estreita fosse adotada e fixada, grandes gradientes de temperatura seriam simplesmente omitidos. Para evitar estas distorções, em cada medição a escala de temperatura foi ajustada para cada caso.

Para facilitar a avaliação das imagens da radiação ultravioleta também foi adotado um procedimento de análise quantitativa. As aquisições deverão ter a contagem de pontos definida em toda a região do isolador captada no vídeo. Os dados exportados pelo detector de ultravioleta normalmente são apresentados na forma de vídeo. Assim, os vídeos serão fragmentados em quadros e aqueles mais representativos serão ilustrados no texto. Os valores apresentados nas imagens representam somatórios de pontos de

ultravioleta computados no último segundo, e não representam o valor médio ocorrido durante todo o experimento. O valor médio usado como parâmetro de avaliação é calculado de acordo com a equação:

$$C_M = \frac{\sum^n C_{In}}{n} - C_D \quad (6)$$

em que,

$C_M$  é o valor médio de pontos de corona durante todo tempo de medição;

$n$  é o número de valores instantâneos de pontos de corona registrados;

$C_{In}$  é um valor instantâneo de ponto de corona;

$C_D$  é o valor de pontos de corona registrado com o arranjo não energizado.

A subtração do valor  $C_D$  da média se faz necessário para uma avaliação mais precisa, já que, mesmo com o arranjo não energizado, o detector de ultravioleta capta descargas, interpretáveis como ruído de fundo. Estas supostas descargas são radiação ultravioleta advinda da iluminação natural e artificial.

A amplificação das componentes ultravioletas do sinal é regulável, permitindo a visualização de pontos sutis de corona (aumentando-se o ganho) e, quando há excesso de descargas, evitar o ofuscamento da imagem (diminuindo-se o ganho). Em todos os ensaios realizados, o ganho utilizado foi o mesmo: 120.

A experiência acumulada durante todas as inspeções realizadas com o detector de ultravioleta no decorrer deste trabalho mostrou que uma diferença de a partir de 500 descargas por minuto, entre dois arranjos diferentes, é valor significativo para um julgamento claro entre as configurações empregadas.

Foram também realizadas, para cada um dos nove arranjos ensaiados, simulações computacionais baseadas em elementos finitos que mostram de forma gráfica a

distribuição de campo elétrico aproximada para a configuração em questão, em regime permanente. Estas simulações serão apresentadas na sessão Simulações Computacionais (4.1.5).

#### 4.1.1. Isolador novo (IN)

O isolador novo foi ensaiado inicialmente e seus resultados serviram como referência para os demais ensaios.

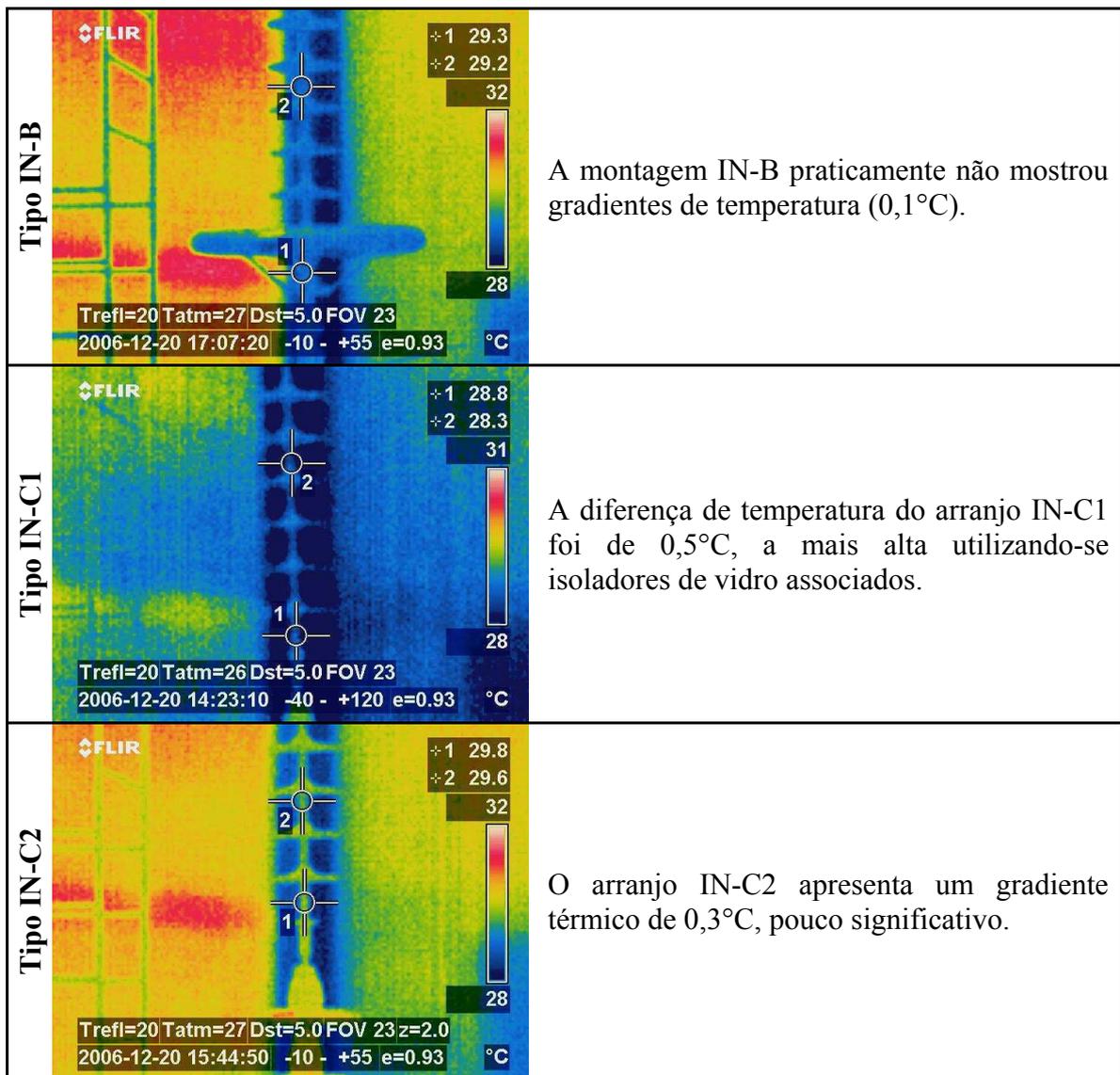
##### 4.1.1.1. Medições de temperatura

Durante o ensaio do isolador novo foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item 3.2.1. Os resultados para cada configuração estão na Tabela 4.1:

**Tabela 4.1. Resultados termográficos para isolador IN.**

|                   |  |   |
|-------------------|--|---|
| <p>Tipo IN-O</p>  |  | <p>Como esperado, o isolador perfeito, mesmo sem anel de equalização, apresentou uma temperatura praticamente uniforme em sua superfície. A diferença de temperatura entre os pontos de inspeção foi 0,1°C.</p> |
| <p>Tipo IN-A1</p> |  | <p>Na configuração IN-A1 há uma pequena diferença de temperatura entre os pontos observados (0,3°C), mas tal diferença não é significativa.</p>   |

|                   |  |   |
|-------------------|--|---|
| <p>Tipo IN-A2</p> |  | <p>O arranjo IN-A2 demonstrou um gradiente de <math>0,5^{\circ}\text{C}</math>. Este é o maior gradiente com isolador novo (IN) dentre os arranjos que utilizaram o anel tipo A158.</p> |
| <p>Tipo IN-A3</p> |  | <p>Na configuração IN-A3 há uma pequena diferença de temperatura entre os pontos observados (<math>0,3^{\circ}\text{C}</math>), pouco significativa.</p>                                |
| <p>Tipo IN-A4</p> |  | <p>O arranjo IN-A4 não demonstrou diferenças significativas de temperatura (<math>0,2^{\circ}\text{C}</math>).</p>  |
| <p>Tipo IN-A5</p> |  | <p>O arranjo IN-A5 apresenta uma pequena diferença de temperatura entre os pontos observados (<math>0,2^{\circ}\text{C}</math>), pouco significativa.</p>                               |

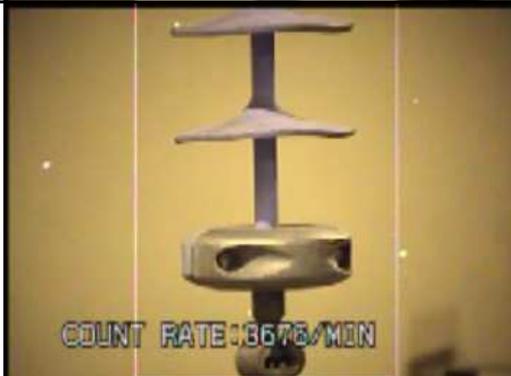


A avaliação térmica do isolador novo (IN) mostrou que, sem a presença de poluição ou envelhecimento do material polimérico, todas as configurações comportam-se de forma tolerável, com gradientes de temperatura iguais ou inferiores a  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Os piores casos aconteceram nos arranjos IN-A2 e IN-C1, enquanto os melhores casos foram os tipos IN-B e IN-O.

#### 4.1.1.2. Medições de Corona

A medição dos níveis de radiação ultravioleta emitida pelas descargas corona no isolador novo (IN) foi realizada conforme descrita na seção 3.2.1. Os resultados obtidos com estas medições de corona são apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2. Resultados de medição de corona para isolador IN.**

|            |   |   |
|------------|---|---|
| Tipo IN-O  |    | A ausência de eletrodos equalizadores permite a formação significativa de corona junto à ferragem fase do isolador. Nesta modalidade, a média de descargas foi 14.460 pontos/min. |
| Tipo IN-A1 |   | O anel de equalização, mesmo pequeno, diminui consideravelmente a ocorrência de descargas, baixando a média para 1.300 pontos/min.  |
| Tipo IN-A2 |  | A instalação incorreta do anel equalizador, neste caso, não aumentou significativamente o número de descargas, que ficou em torno de 1.540 pontos/min.                            |

|            |   |   |
|------------|---|---|
| Tipo IN-A3 |    | <p>Nesta configuração incorreta, o número de descargas foi 1.685 pontos/min, ficando relativamente próximo ao valor do tipo IN-A1.</p>  |
| Tipo IN-A4 |    | <p>A montagem incorreta IN-A4 também apresentou valores pouco expressivos de descargas, 1.563 pontos/min, ficando em conformidade com a referência.</p>   |
| Tipo IN-A5 |   | <p>O caso apreciado nesta montagem foi a mais rica em descargas por minuto, totalizando 1.723. Apesar disso, a diferença para o caso IN-A1 foi de 423 pontos/min, o que não é efetivamente significativo.</p> |
| Tipo IN-B  |  | <p>O anel de A444 apresentou 2.135 pontos/min, 835 descargas por minuto a mais que o caso IN-A1.</p>  |

|            |   |  |
|------------|---|--|
| Tipo IN-C1 |  | <p>O caso IN-C1 demonstrou 13.790 pontos/min, ficando abaixo apenas do caso IN-O, com diferença pouco significativa.</p> |
| Tipo IN-C2 |  | <p>O caso IN-C2 também não teve bom desempenho para o caso do isolador limpo, exibindo 11.341 pontos/min.</p>            |

A avaliação das descargas corona nas configurações propostas mostrou que, para o caso do isolador novo (IN), as cinco configurações que utilizam o anel equalizador de 158 mm de diâmetro (A158) têm comportamento similar, sendo a configuração IN-A5, a menos recomendável entre elas.

A instalação de isoladores de vidro associado ao isolador polimérico não reduziu a contento o número de descargas na região da ferragem fase, mantendo níveis similares ao arranjo IN-O.

O tipo IN-B, que utiliza o anel A444, apresentou níveis de descargas mais altas, o que pode ser justificado pela presença de pontas e arestas expostas nas porcas e parafusos que fazem a fixação do anel. Todavia, estas pontas e arestas não se apresentaram como pontos persistentes de ocorrência de descargas corona.

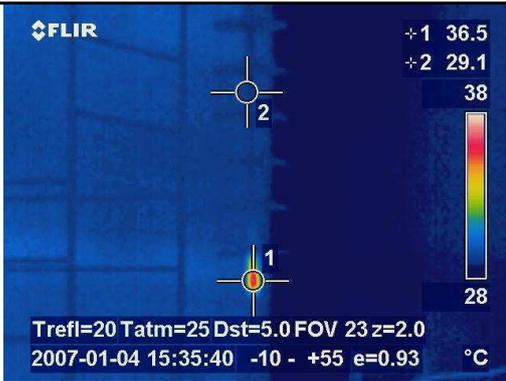
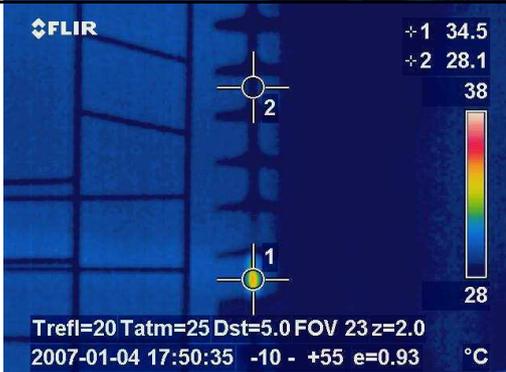
#### 4.1.2. Isolador envelhecido, com poluição (IC01S)

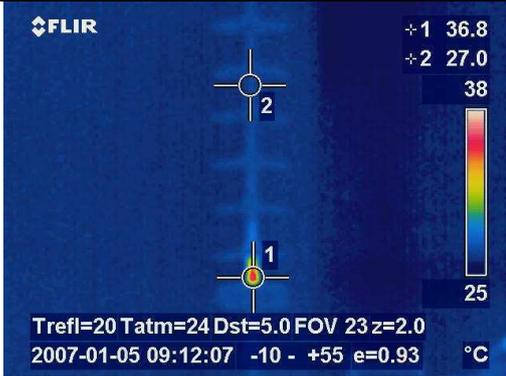
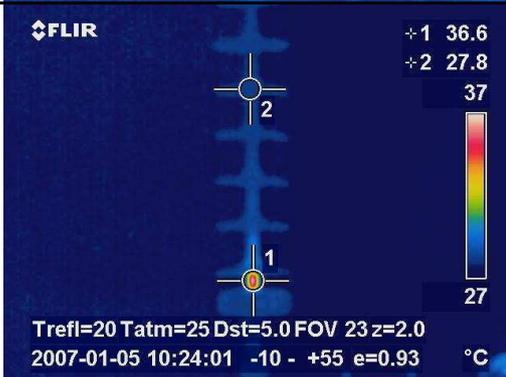
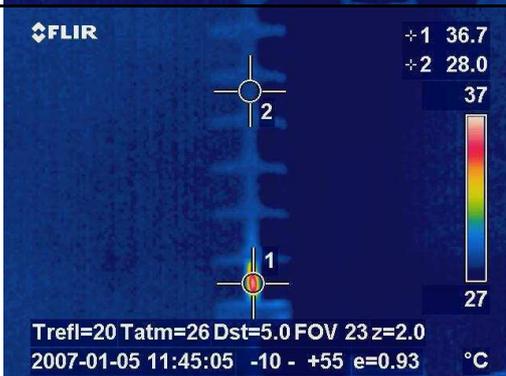
O isolador envelhecido naturalmente por cinco anos no campo foi ensaiado com diversos arranjos e seus resultados foram comparados entre si, nesta seção; e entre os outros três tipos de isoladores ensaiados, no fim deste capítulo.

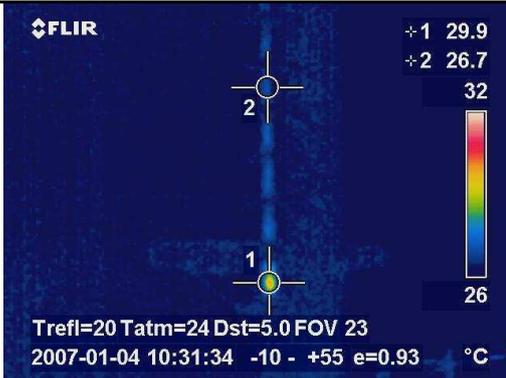
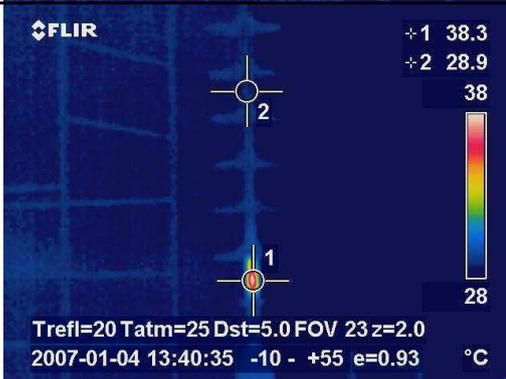
##### 4.1.2.1. Medições de temperatura

Durante os ensaios com o isolador IC01S foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item 3.2.1. Os resultados para cada configuração estão na Tabela 4.3:

Tabela 4.3. Resultados termográficos para isolador IC01S.

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Tipo IC01S-O  |   | Sem a presença de eletrodos equalizadores, o isolador envelhecido apresentou uma diferença de temperatura de 7,1°C, o que torna esta configuração nada recomendável.  |
| Tipo IC01S-A1 |  | Na configuração IC01S-A1 há uma diferença notável de temperatura entre os pontos observados (6,1°C). Esta foi a configuração de menor diferença de temperatura dos arranjos IC01S, dentre os arranjos com o anel tipo A158. |

|                      |   |  |
|----------------------|---|--|
| <p>Tipo IC01S-A2</p> |    | <p>O arranjo IC01S-A2 demonstrou diferença significativa de temperatura: 9,8°C. Este é o maior gradiente com isolador IC01S, dentre os arranjos que utilizaram o anel tipo A158.</p> |
| <p>Tipo IC01S-A3</p> |    | <p>Na configuração IC01S-A3 há uma diferença de temperatura entre os pontos observados, atingindo 8,8°C, bastante significativa.</p>   |
| <p>Tipo IC01S-A4</p> |   | <p>O arranjo IC01S-A4 também demonstrou grande diferença de temperatura (8,7°C).</p>   |
| <p>Tipo IC01S-A5</p> |  | <p>O arranjo IC01S-A5 apresenta uma diferença de temperatura entre os pontos observados de 6,6°C.</p>  |

|               |  |  |
|---------------|--|--|
| Tipo IC01S-B  |  <p>           FLIR<br/>           +1 29.9<br/>           +2 26.7<br/>           32<br/>           26<br/>           Trefl=20 Tatm=24 Dst=5.0 FOV 23<br/>           2007-01-04 10:31:34 -10 - +55 e=0.93 °C         </p>        | <p>O anel de equalização A444 apresentou diferença de temperatura de 3,2°C.</p>                            |
| Tipo IC01S-C1 |  <p>           FLIR<br/>           +1 38.3<br/>           +2 28.9<br/>           38<br/>           28<br/>           Trefl=20 Tatm=25 Dst=5.0 FOV 23 z=2.0<br/>           2007-01-04 13:40:35 -10 - +55 e=0.93 °C         </p>  | <p>A diferença de temperatura do arranjo IC01S-C1 foi de 9,4°C.</p>  |
| Tipo IC01S-C2 |  <p>           FLIR<br/>           +1 38.4<br/>           +2 27.3<br/>           38<br/>           25<br/>           Trefl=20 Tatm=25 Dst=5.0 FOV 23 z=2.0<br/>           2007-01-04 12:00:16 -10 - +55 e=0.93 °C         </p> | <p>A diferença de temperatura do arranjo IC01S-C2 foi de 11,1°C, a mais alta dentre os arranjos IC01S.</p> |

O envelhecimento dos materiais e a presença da poluição natural do isolador aumentaram significativamente os gradientes de temperatura.

O caso IC01S-O apresentou diferença considerável de temperatura, mas foi ainda superado por três casos (IC01S-A2, IC01S-A3 e IC01S-A4) que utilizaram o anel de equalização A158. Os dois casos restantes que utilizaram o anel A158 (IC01S-A1 e IC01S-A5), apresentaram também gradientes de temperatura elevados, que muito provavelmente levariam à substituição do equipamento, em casos de operação. Contudo, o arranjo IC01S-B apresentou a menor diferença de temperatura dentre os ensaios IC01S.

Os casos que utilizaram isoladores de vidro associados tiveram grandes diferenças de temperatura, não sendo recomendados em situações de isoladores envelhecidos e com poluição.

#### 4.1.2.2. Medições de Corona

Realizou-se a medição dos níveis de radiação ultravioleta emitida pelas descargas corona, no isolador IC01S. Os resultados obtidos com as medições de corona são apresentados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4. Resultados de medição de corona para isolador IC01S.**

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Tipo IC01S-O  |   | O isolador sem eletrodo equalizador novamente apresentou uma taxa elevada de descargas, com média 17.603 pontos/min.                        |
| Tipo IC01S-A1 |  | A utilização do anel equalizador A158 da forma correta, diminuiu a média de descargas para 3.158 pontos/min.                                |
| Tipo IC01S-A2 |  | A instalação incorreta do A158, elevou a média de descargas: 4.940 pontos/min. Este resultado é 1.782 pontos/min maior que o caso IC01S-A1. |

|               |   |  |
|---------------|---|--|
| Tipo IC01S-A3 |    | <p>Com a instalação do anel A158 de forma incorreta, o número de descargas foi 3.355 pontos/min, com uma diferença de 197 pontos/min a mais do que IC01S-A1.</p>                               |
| Tipo IC01S-A4 |    | <p>A montagem incorreta IC01S-A4 apresentou valores expressivos de descargas: 6.900 pontos/min, ficando 3.742 pontos/min além do caso onde houve aplicação correta.</p>                        |
| Tipo IC01S-A5 |   | <p>Para os casos IC01S que utilizam A158, esta situação apresentou a maior atividade de descargas, totalizando 7.207 pontos/min. A diferença para o caso IC01S-A1 foi de 4.048 pontos/min.</p> |
| Tipo IC01S-B  |  | <p>O anel equalizador A444 apresentou 1.955 pontos/min, ou seja, 204 pontos/min menos que o caso IC01S-A1. Além disso, foi a menor taxa de descargas dos casos IC01S.</p>                      |

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Tipo IC01S-C1 |  | <p>O caso IC01S-C1 demonstrou 13.331 pontos/min, ficando com taxa média abaixo apenas dos caso IC01S-O.</p> |
| Tipo IC01S-C2 |  | <p>O caso IC01S-C2 também não teve bom desempenho, exibindo 8.310 pontos/min.</p>                           |

O envelhecimento e a poluição demonstraram grande influência no comportamento das descargas corona nas proximidades do isolador.

Um ponto fixo de descargas foi detectado na superfície da haste isolante, como efeito da poluição. Este ponto pode ser tanto um ponto isolado de corona como também descargas superficiais. Em todos os casos este ponto é visível, exceto o IC01S-B e IC01S-A3. Em IC01S-B o ponto não aparece devido à equalização mais efetiva do campo. Já em IC01S-A3, a região de descargas fixas é diminuída, pois parte dela fica posicionada internamente ao anel de equalização.

Os casos que utilizaram anel equalizador A158 demonstraram atividade preocupante de descargas. Dentre estes, o caso IC01S-A1 foi o que apresentou a menor atividade de descargas mesmo assim, com valores altos; e o caso IC01S-A5, apresentou a maior atividade.

A configuração IC01S-A4 apresentou valores elevados de descargas corona, ficando abaixo apenas de IC01S-A5. Este valor elevado de descargas pode ser justificado

pela montagem inadequada do anel equalizador A158. A desconformidade era a montagem de forma mais desencaixada que a montagem incorreta proposta durante a seção Materiais e Métodos. Todavia, por caracterizar exceção, o caso IC01S-A4 não representa resultado conclusivo.

O caso IC01S-B, que representa o resultado do anel de equalização A444, apresentou-se com os melhores resultados dentre os arranjos IC01S.

O uso dos isoladores de vidro associados resultou em elevada atividade de descargas, tanto para o caso IC01S-C1 quanto para o caso IC01S-C2. Ambos ficaram abaixo somente do caso IC01S-O.

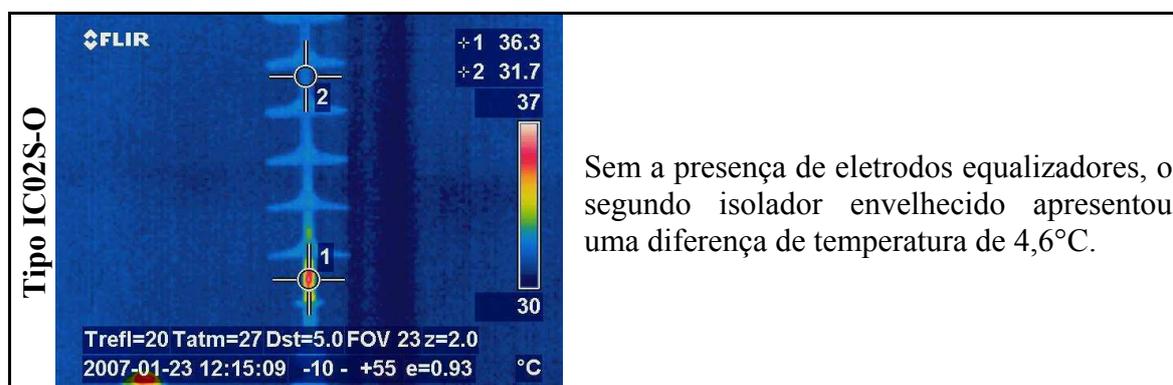
#### 4.1.3. Isolador envelhecido, com poluição (IC02S)

O isolador envelhecido naturalmente por quatro anos no campo foi ensaiado com diversos arranjos e seus resultados foram comparados entre si, nesta seção; e entre os outros três tipos de isoladores ensaiados, no fim deste capítulo.

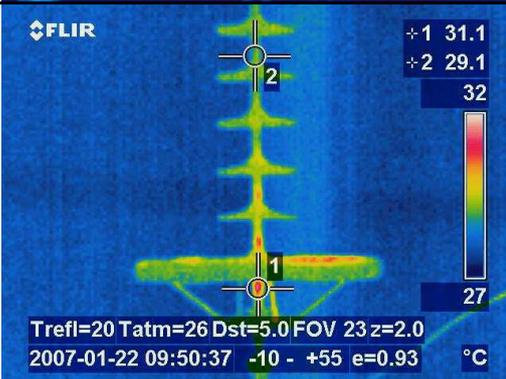
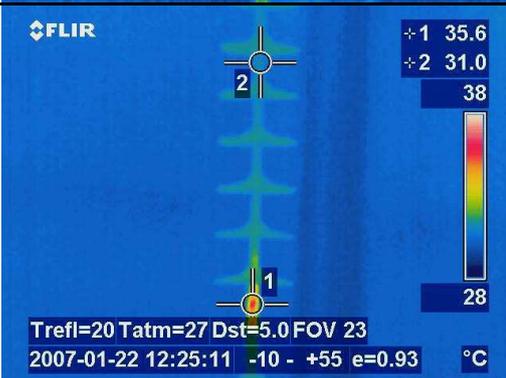
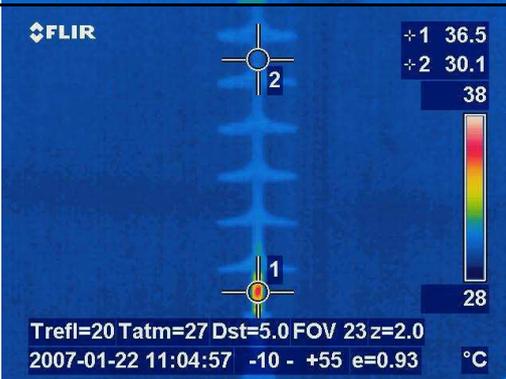
##### 4.1.3.1. Medições de temperatura

O isolador IC02S foi ensaiado e foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item 3.2.1. Os resultados para cada configuração estão na Tabela 4.5:

Tabela 4.5. Resultados termográficos para isolador IC02S.



|                      |  |   |
|----------------------|--|---|
| <p>Tipo IC02S-A1</p> |  | <p>Nesta configuração, a diferença de temperatura foi 4,5°C, praticamente igual à situação sem anel equalizador (IC02S-O).</p>  |
| <p>Tipo IC02S-A2</p> |  | <p>O arranjo IC02S-A2 demonstrou uma diferença de temperatura de 4,3°C, também próximo à situação sem anel equalizador (IC02S-O).</p>   |
| <p>Tipo IC02S-A3</p> |  | <p>Nesta configuração a diferença de temperatura entre os pontos observados foi de 2,8°C. Esta foi a menor diferença entre os casos que utilizaram anel tipo A158 com o isolador IC02S.</p> |
| <p>Tipo IC02S-A4</p> |  | <p>O arranjo IC02S-A4 demonstrou uma diferença de temperatura de 5,8°C.</p>   |

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Tipo IC02S-A5 |    | <p>O arranjo IC02S-A5 apresenta uma diferença de temperatura entre os pontos observados de 7,8°C. Esta foi a maior diferença de temperatura dentre os casos que utilizaram A158 em IC02S.</p>                           |
| Tipo IC02S-B  |    | <p>Esta configuração demonstrou diferença de temperatura de apenas 2,0°C, sendo a menor com o uso do isolador IC02S. Os pontos supostamente quentes sobre o toróide do anel equalizador são reflexos da iluminação.</p> |
| Tipo IC02S-C1 |   | <p>A diferença de temperatura do arranjo IC02S-C1 foi de 4,6°C.</p>   |
| Tipo IC02S-C2 |  | <p>A diferença de temperatura do arranjo IC02S-C2 foi de 6,4°C, a mais alta dentre os arranjos com isoladores de vidro associados.</p>  |

Os casos IC02S-B (A444) e IC02S-A3 (A158) demonstraram as menores diferenças de temperatura. Contudo, em ambos, percebe-se um aquecimento na região acima da primeira aleta. Este comportamento pode ser justificado pelo aumento da

intensidade de campo elétrico na região acima da primeira aleta, devido ao posicionamento dos eletrodos.

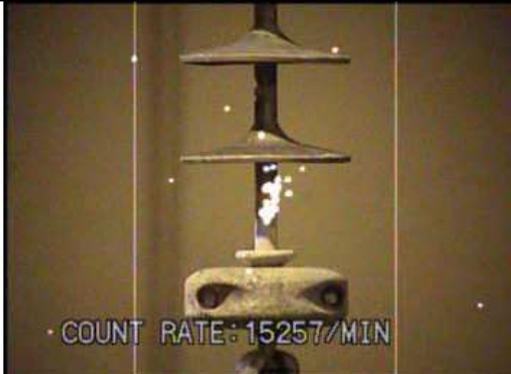
O uso de isoladores de vidro associados teve diferenças de temperatura comparáveis com casos de uso do A158, excetuando-se o caso IC02S-A3, que se beneficiou do deslocamento da intensidade do campo elétrico para cima, devido ao posicionamento do eletrodo.

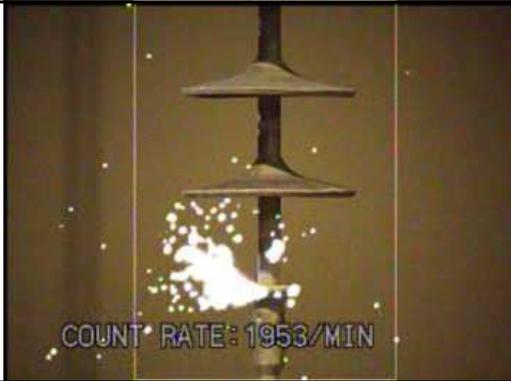
4.1.3.2. Medições de Corona

Realizou-se a medição dos níveis de radiação ultravioleta emitida pelas descargas corona, no isolador IC02S. Os resultados obtidos com estas medições de corona são apresentados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6: Resultados de medição de corona para isolador IC02S.**

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Tipo IC02S-O  |  | A média de descargas para o isolador sem eletrodo equalizador foi 8.345 pontos/min.   |
| Tipo IC02S-AI |  | Curiosamente, neste caso, o nível de descargas subiu com a aplicação do equalizador A158 na posição correta, ficando 2.618 pontos/min maior que o caso sem equalizador. O valor médio de descargas foi 11.053 pontos/min. |

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Tipo IC02S-A2 |    | Esta instalação incorreta do A158 baixou a média de descargas para 6.630 pontos/min.  |
| Tipo IC02S-A3 |    | Nesta configuração incorreta, o número de descargas foi 2.999 pontos/min, a menor dentre as montagens IC02S que utilizam A158.  |
| Tipo IC02S-A4 |   | A montagem incorreta IC02S-A4 uma média de descargas de 3.878 pontos/min.   |
| Tipo IC02S-A5 |  | Para os casos IC02S, esta situação foi a que apresentou maior número de descargas, totalizando 12.796 pontos/min. A diferença com relação ao caso IC02S-A1 foi de 1.743 pontos/min. |

|               |  |  |
|---------------|--|--|
| Tipo IC02S-B  |   | A configuração IC02S-B apresentou 2.161 pontos/min, sendo a menor taxa de descargas dos casos IC02S. |
| Tipo IC02S-C1 |   | O caso IC02S-C1 demonstrou 17.822 pontos/min, a maior taxa dos casos IC02S.                          |
| Tipo IC02S-C2 |  | O caso IC02S-C2 também não teve bom desempenho, exibindo 17.557 pontos/min.                          |

A poluição sobre IC02S, a exemplo de IC01S, também proporcionou um ponto fixo de descargas ultravioleta, na superfície do isolador. Este ponto pode ser advindo de descargas superficiais. Este ponto pode ser observado em todas as montagens, exceto IC02S-B.

A configuração IC02S-A1 apresentou média de descargas muito superior ao caso IC02S-O. Este resultado foi atípico, mas pode ser explicado pela presença de descargas superficiais na configuração IC02S-A1, causadas pelo deslocamento do campo elétrico para cima. Estas mesmas descargas superficiais devem existir no caso IC02S-O, de forma mais discreta. Isto não pode ser afirmado, pois as descargas presentes junto ao anel de

corona ofuscam as descargas superficiais, dificultando a visualização no vídeo. Esta configuração requer repetição dos ensaios e investigações mais detalhadas.

Outra vez verificou-se que, na montagem IC02S-A3, uma parcela da região onde há pontos fixos de emissão de ultravioleta ficou envolta pelo anel de equalização. Assim, o volume de descargas demonstrado por este arranjo foi notavelmente menor que os demais utilizando o mesmo eletrodo equalizador (A158).

Os ensaios com isoladores de vidro associados apresentaram os maiores valores de descargas corona, maiores que o caso IC02S-O, inclusive.

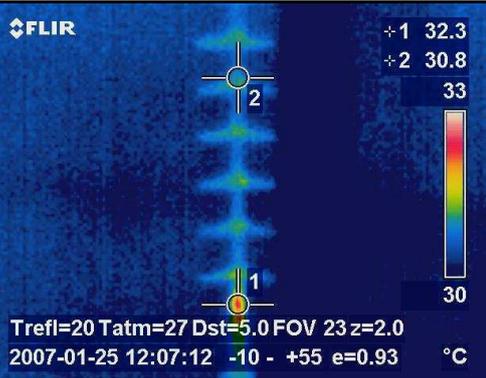
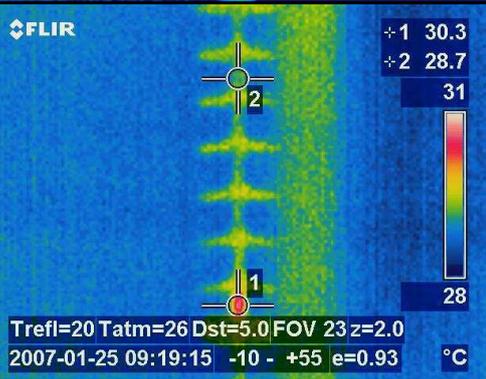
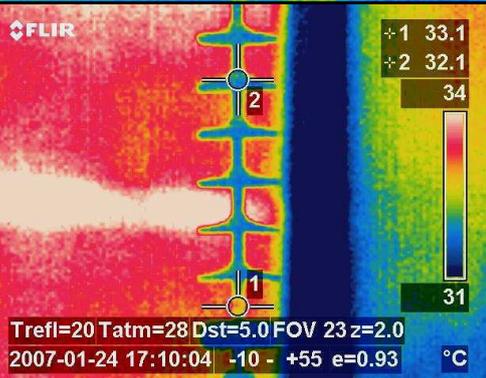
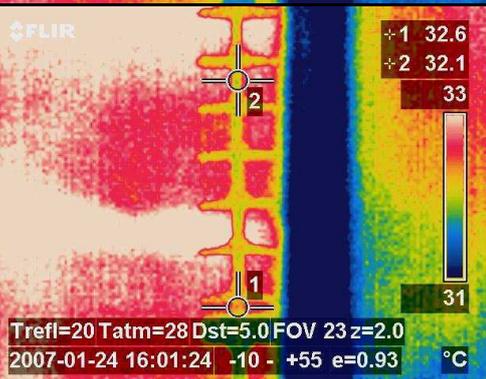
#### **4.1.4. Isolador envelhecido, com poluição removida (IC02L)**

O isolador envelhecido quatro anos em campo, ensaiado no item 4.1.3, foi lavado e teve a poluição removida, caracterizando-se como o caso IC02L. Desta forma, é possível verificar a influência da poluição no desempenho eletrotérmico do equipamento, bem como avaliar a contribuição do envelhecimento, de forma isolada. Este mesmo isolador foi ensaiado e seus resultados comparados com entre si, nesta seção; e entre os outros três tipos de isoladores ensaiados, no fim deste capítulo.

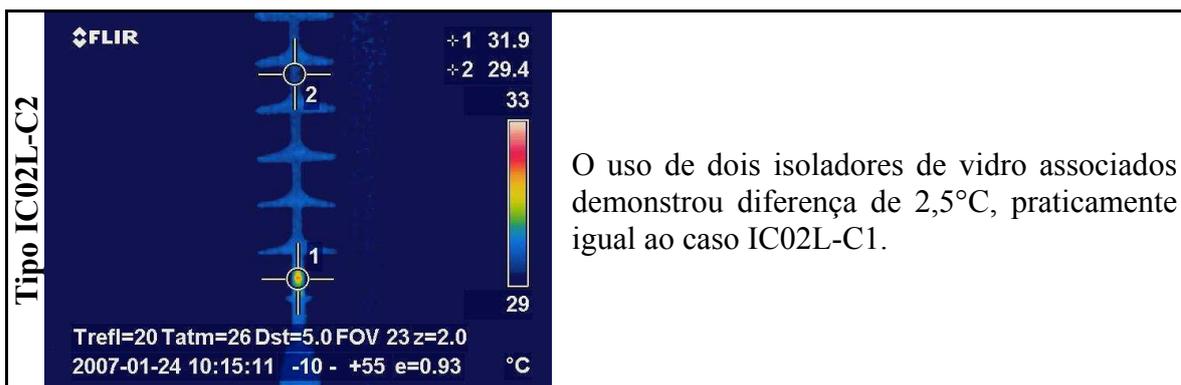
##### 4.1.4.1. Medições de temperatura

O isolador IC02L foi ensaiado e foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item 3.2.1. Os resultados para cada configuração estão na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Resultados termográficos para isolador IC02L.

|                      |   |  |
|----------------------|---|--|
| <p>Tipo IC02L-O</p>  |    | <p>Após a remoção da poluição, o isolador sem anel equalizador apresentou uma diferença de temperatura de 1,5°C.</p>       |
| <p>Tipo IC02L-A1</p> |    | <p>A aplicação correta do A158 demonstrou um gradiente de 1,6°C, praticamente igual ao caso sem anel equalizador.</p>      |
| <p>Tipo IC02L-A2</p> |   | <p>O caso IC02L-A2 mostrou uma diferença de temperatura de 1,0°C.</p>  |
| <p>Tipo IC02L-A3</p> |  | <p>IC02L-A3 exibiu um gradiente térmico de 0,5°C, sendo o menos significativo dentre os ensaios que envolveram o A158.</p> |

|                      |  |   |
|----------------------|--|---|
| <p>Tipo IC02L-A4</p> |  | <p>O caso IC02L-A4 apresentou uma diferença de temperatura de 1,3°C.</p>  |
| <p>Tipo IC02L-A5</p> |  | <p>O arranjo IC02L-A5 apresentou um gradiente de temperatura de 2,1°C, e foi o maior dentre os casos que utilizaram o A158.</p>                                       |
| <p>Tipo IC02L-B</p>  |  | <p>A aplicação do anel equalizador A444 apresentou uma diferença de temperatura de apenas 0,2°C, o menor dentre todos os ensaios que utilizaram o isolador IC02L.</p> |
| <p>Tipo IC02L-C1</p> |  | <p>A aplicação de um isolador de vidro associado apresentou um gradiente de 2,6°C, o maior dentre os ensaios que utilizaram o isolador IC02L.</p>                     |



Os casos IC02S-B e IC02S-A3 demonstraram as menores diferenças de temperatura. Além disso, após a limpeza do isolador, estes casos não apresentaram aquecimento notável acima da primeira aleta.

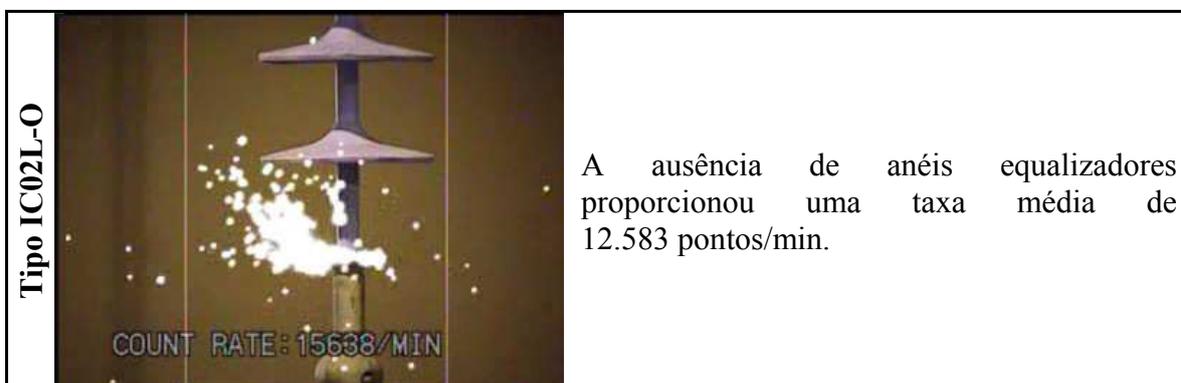
Os casos que utilizaram A158, excetuando-se IC02S-A3, tiveram desempenho semelhante ao isolador sem eletrodos equalizadores.

Os isoladores de vidro associados apresentaram as diferenças de temperatura mais acentuadas.

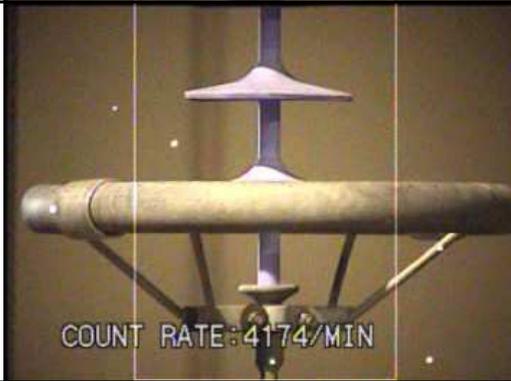
#### 4.1.4.2. Medições de Corona

Realizou-se a medição dos níveis de radiação ultravioleta emitida pelas descargas corona, no isolador IC02L. Os resultados obtidos com estas medições de corona são apresentados na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8. Resultados de medição de corona para isolador IC02L.**



|               |   |  |
|---------------|---|--|
| Tipo IC02L-A1 |    | <p>O uso do anel equalizador A158 da forma recomendada pelo fabricante reduziu o índice médio de descargas para 3.749 pontos/min.</p>  |
| Tipo IC02L-A2 |    | <p>O caso IC02L-A2 apresentou uma média de 4.145 pontos/min. Praticamente no mesmo patamar que IC02L-A1.</p>   |
| Tipo IC02L-A3 |   | <p>IC02L-A3 demonstrou 3.258 pontos/min. Este resultado foi 491 pontos/min menor que IC02L-A1, e o de menor incidência de descargas dentre os que utilizaram o anel de equalização A158.</p> |
| Tipo IC02L-A4 |  | <p>O caso IC02L-A4 apresentou uma média de descargas de 4.281 pontos/min, praticamente no mesmo patamar que IC02L-A1.</p>  |

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Tipo IC02L-A5 |    | <p>O caso IC02L-A5 foi o pior dentre os que utilizaram o anel de equalização A158, demonstrando 5.085 pontos/min.</p>   |
| Tipo IC02L-B  |    | <p>IC02L-B foi o caso que apresentou menor média de descargas dentre os arranjos que utilizaram o isolador IC02L, 1.745 pontos/min.</p>                                 |
| Tipo IC02L-C1 |   | <p>O uso de um isolador de vidro associado aumentou a taxa média de descargas com relação ao caso IC02L-O em 4.680 pontos/min. O valor médio foi 17.263 pontos/min.</p> |
| Tipo IC02L-C2 |  | <p>A média de descargas corona com dois isoladores de vidro associados também foi alto, 12.583 pontos/min.</p>  |

Os casos que utilizaram o anel equalizador A158 demonstraram níveis de descargas corona similares, não sendo fortemente dependentes da forma como o anel é instalado. O caso IC02L-A3 foi o que apresentou menor taxa, enquanto que o caso IC02L-A5 mostrou a maior taxa de descargas.

Os casos com isoladores de vidro associados e sem anel de equalização tiveram os níveis de descargas mais intensos, sendo desaconselháveis mesmo para isoladores lavados freqüentemente.

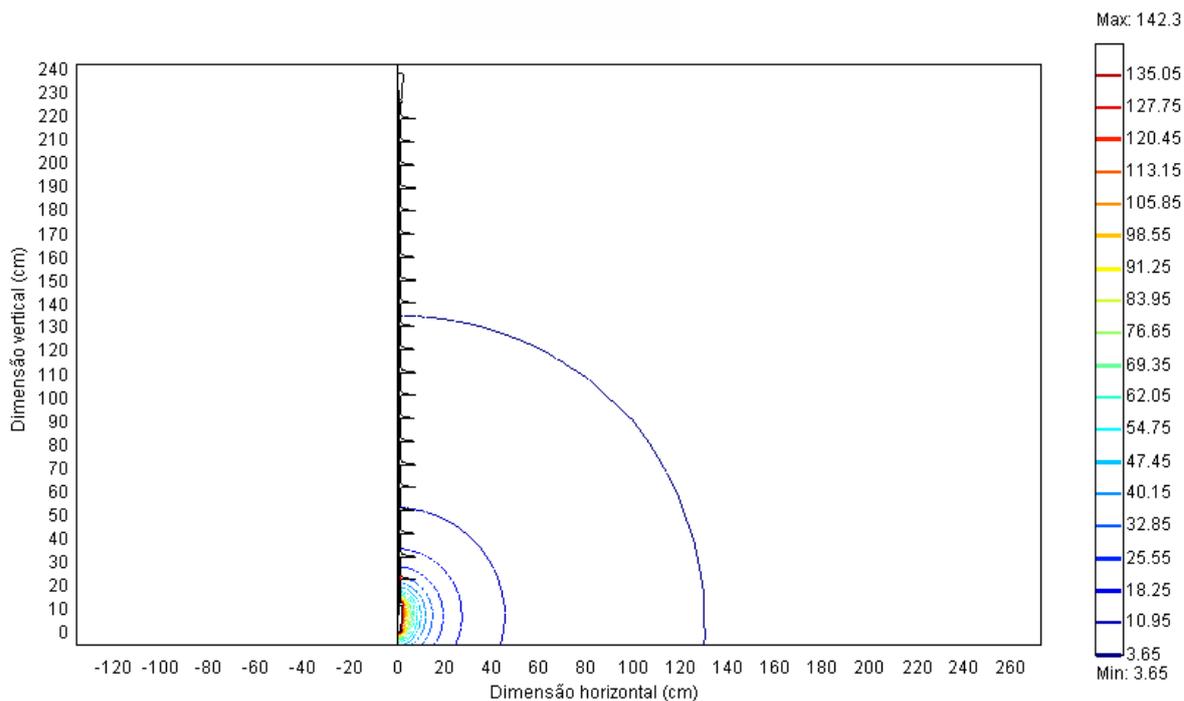
O uso do anel equalizador A444 mostrou a menor taxa de descargas.

#### **4.1.5. Simulações computacionais**

Visando um entendimento mais abrangente dos fenômenos produzidos pelo campo elétrico nos isoladores cujos efeitos foram detectados nas sessões 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4, realizaram-se simulações computacionais baseadas em elementos finitos. Com as simulações, os campos e os potenciais elétricos, ao longo da região de interesse do isolador, foram representados de forma gráfica e aproximada, em regime permanente. Além disso, as simulações permitem as simulações de anéis equalizadores fictícios, facilitando o projeto de um anel equalizador feito especificamente para aplicação em questão. No Capítulo 5 são relatados: o projeto, a construção e avaliação de um anel de equalização modelado com o intuito de minimizar os efeitos do campo elétrico nos isoladores de 230 kV estudados.

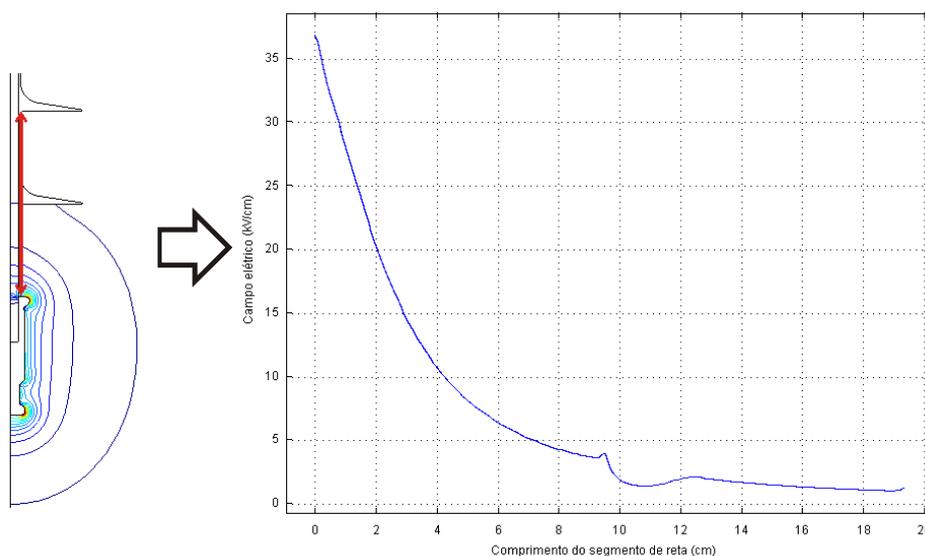
Cada um dos arranjos com anéis equalizadores e isoladores de vidro foi redesenhado em ambiente computacional, conforme as medidas originais. As simulações de distribuição de campo elétrico baseadas no Método dos Elementos Finitos foram realizadas utilizando o software FEMLAB®.

Na Figura 4.1 pode ser observada a distribuição de potencial elétrico para um isolador completo, utilizado nos ensaios de análise. Como a região de interesse no isolador fica entre a ferragem fase e a segunda aleta, os demais gráficos tratando de distribuição de potencial terão o foco aproximado nesta região.



**Figura 4.1. Representação da distribuição de potencial elétrico em um isolador completo.**

As curvas com intensidade de campo elétrico na superfície polimérica foram obtidas através de uma ferramenta do FEMLAB® que plota os valores pontuais do campo elétrico encontrados no trajeto de um segmento de reta definido pelo usuário. Desta maneira, o segmento de reta foi traçado entre a extremidade superior da ferragem fase e a extremidade inferior da segunda aleta, como pode ser visto na Figura 4.2.



**Figura 4.2. Criação dos gráficos de representação de campo elétrico na superfície polimérica**

O pico de campo elétrico presente junto aos 10 cm do comprimento do segmento de reta no gráfico da Figura 4.2 acontece devido alguns fatores físicos e computacionais, citados a seguir.

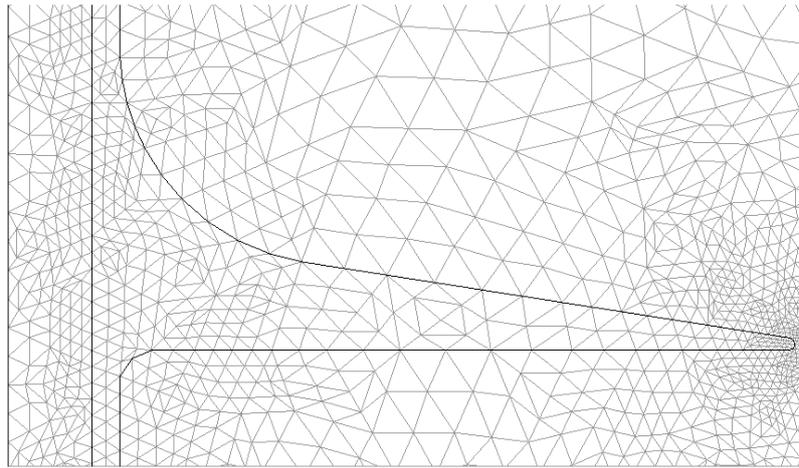
O segmento de reta que define a região plotada no gráfico permeia dois materiais diferentes, e durante o percurso transpõe a fronteira entre estes materiais, onde há uma descontinuidade da permissividade elétrica na simulação.

Por outro lado, tomando-se o ponto vista interior ao material polimérico, percebe-se que a geometria da região abaixo da aleta representa uma curva abrupta de 90°, favorecendo a concentração interna de campo.

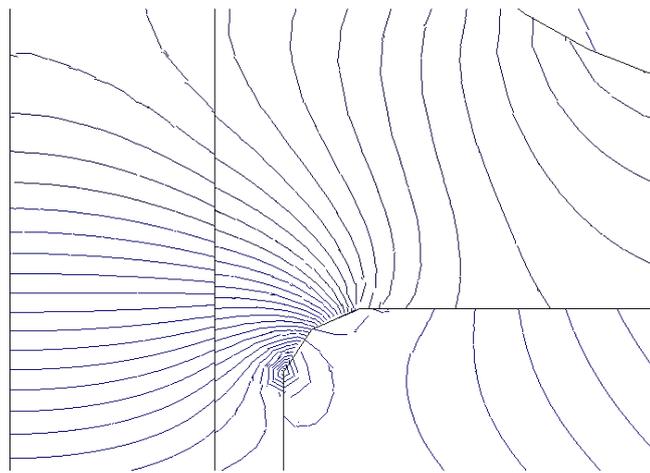
Além disso, algoritmo que define a malha sobre a qual serão computados os resultados dispõe as bordas dos elementos triangulares de forma coincidente com a borda da região. Este comportamento é esperado, todavia, como os valores finais de campo elétrico são calculados com base na geometria dos elementos, é comum que em regiões mais complexas haja superposição de valores e descontinuidades da solução.

Na Figura 4.3 podem ser vistas em detalhes a disposição de malha, a descontinuidade de solução para o campo elétrico e a permissividade na região imediatamente abaixo da primeira aleta, junto ao material polimérico.

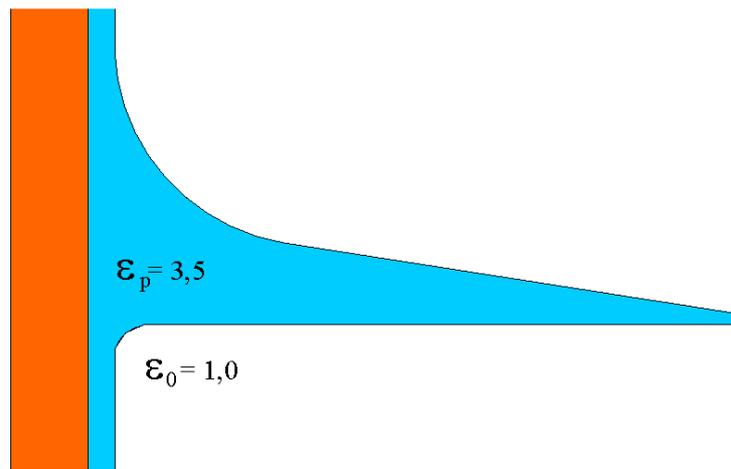
A presença do pico de campo elétrico imediatamente abaixo das aletas é um comportamento que se repete em todas as simulações apresentadas neste trabalho.



(a)



(b)

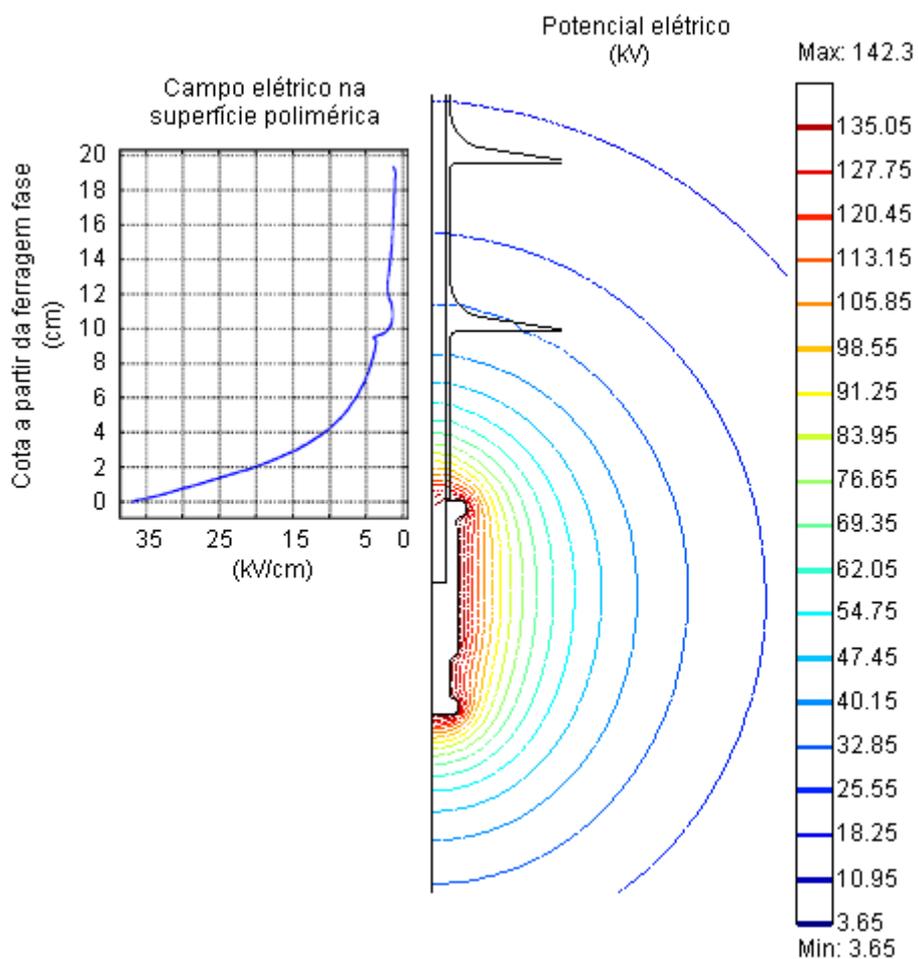


(c)

**Figura 4.3. (a) Disposições de malha, (b) continuidade de solução para o campo elétrico e (c) permissividade na região imediatamente abaixo da primeira aleta, junto ao material polimérico.**

#### 4.1.5.1. Tipo O

O caso do isolador sem anel equalizador nem isoladores de vidro associados foi simulado. A distribuição de campo elétrico na superfície polimérica do isolador e o potencial elétrico nas redondezas do equipamento podem ser vistos na Figura 4.4.



**Figura 4.4. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo O.**

Pode-se observar que a máxima intensidade do campo elétrico no equipamento é de aproximadamente 35  $\text{kV/cm}$ , junto à ferragem fase. O potencial elétrico concentra-se intensamente na ferragem fase.

#### 4.1.5.2. Tipo A1

O anel equalizador A158, aplicado corretamente, apresentou um decréscimo no valor máximo de campo elétrico em relação à configuração Tipo O. Além disso, o valor máximo de campo elétrico foi deslocado para uma região mais acima, conforme pode ser visto na Figura 4.5.

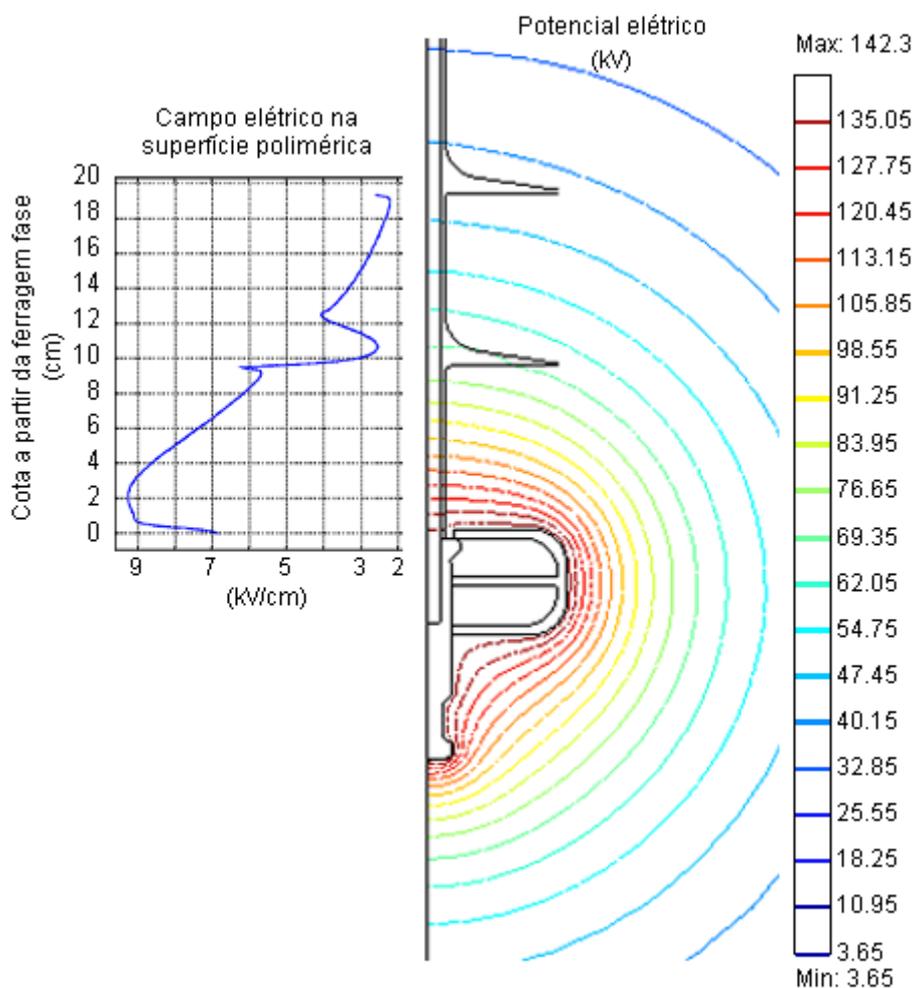


Figura 4.5. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A1.

#### 4.1.5.3. Tipo A2

Conforme pode ser visto na Figura 4.6, o pico de campo elétrico não foi menor que a configuração do Tipo A1. Além disso, observa-se uma variação brusca de campo na extremidade superior do anel equalizador.

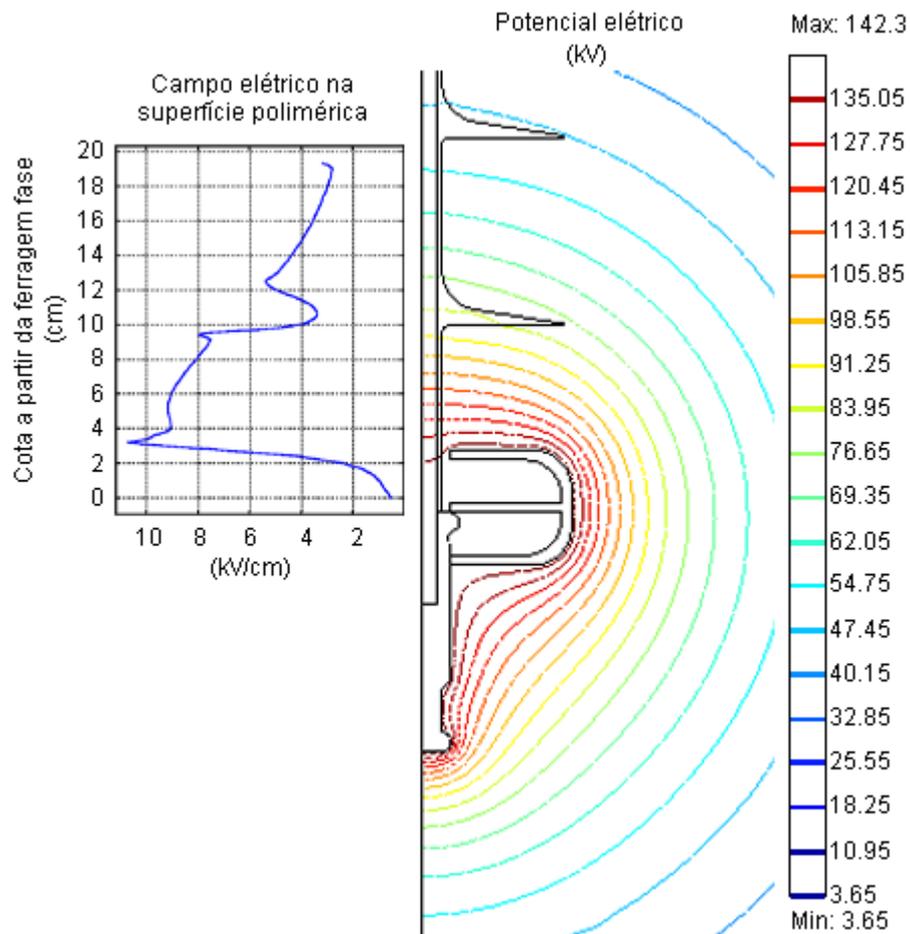


Figura 4.6. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A2.

A configuração Tipo A2 também apresentou um decréscimo no valor máximo de campo elétrico e o deslocamento para cima do campo elétrico, com relação ao Tipo O.

#### 4.1.5.4. Tipo A3

Como mostrado na Figura 4.7, a configuração A3 teve um comportamento similar à configuração A2. Contudo, a Tipo A3 exerceu um maior deslocamento do campo e do potencial elétricos na direção da ferragem terra do isolador. Este deslocamento justifica o aquecimento acima da primeira aleta, registrado nas inspeções termovisivas dos casos IC02S-A3 e IC01S-A3.

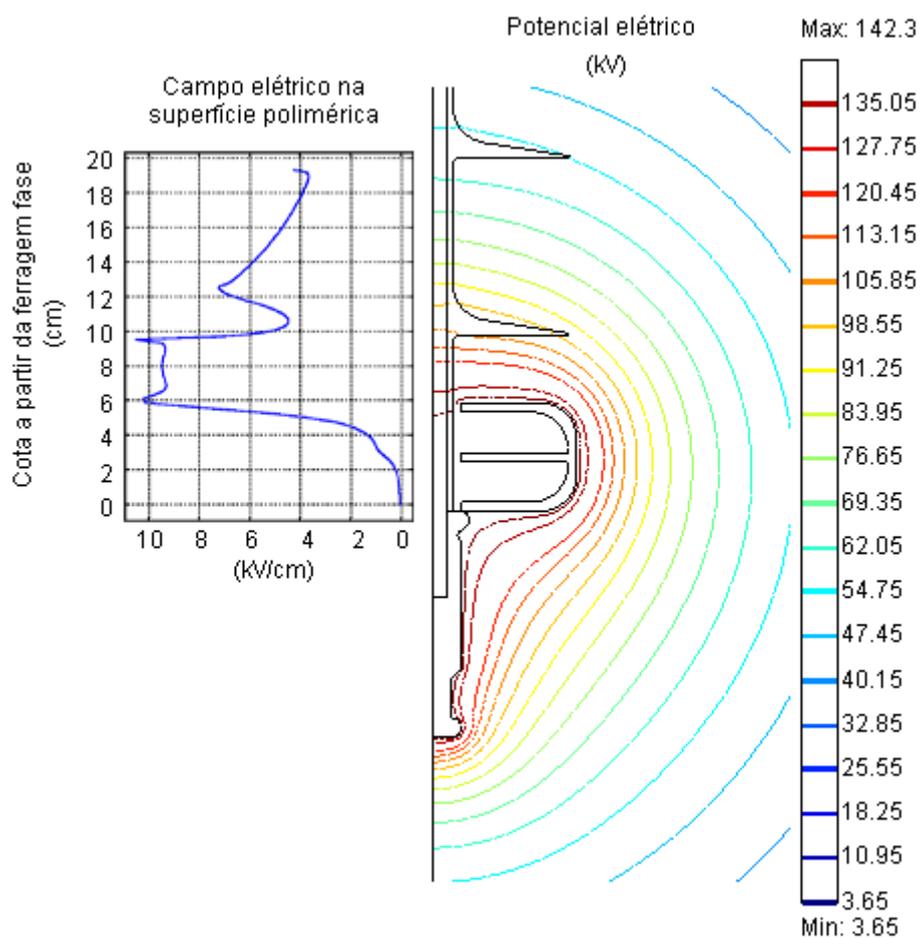


Figura 4.7. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A3.

#### 4.1.5.5. Tipo A4

O desempenho da configuração isolador/anel Tipo A4 foi muito similar ao caso A1, como mostrado na Figura 4.8. Este comportamento era esperado, pois os dados coletados nas seções 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4 também indicaram estas semelhanças.

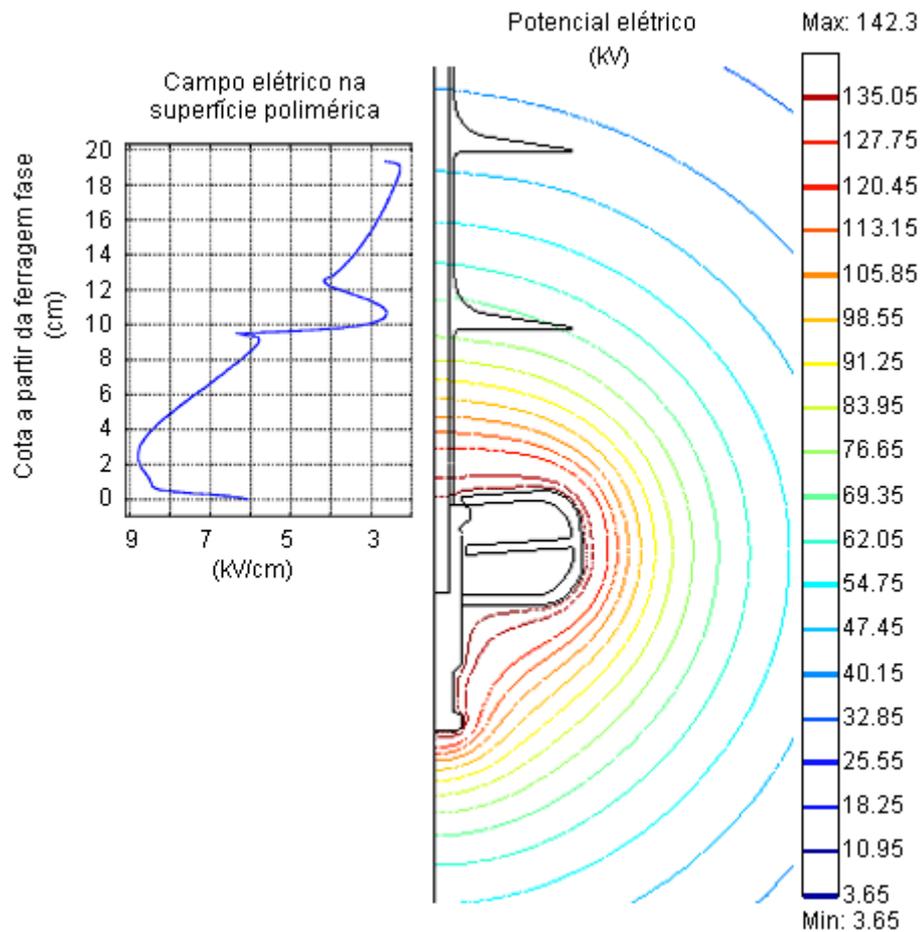


Figura 4.8. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A4.

#### 4.1.5.6. Tipo A5

A configuração A5 exibiu o maior pico de campo elétrico na superfície polimérica, dentre todos os casos que envolviam o anel equalizador A158. O posicionamento incorreto do anel A158 também eleva os potenciais na zona de interação revestimento-núcleo-ferragem fase, conforme mostrado na Figura 4.9.

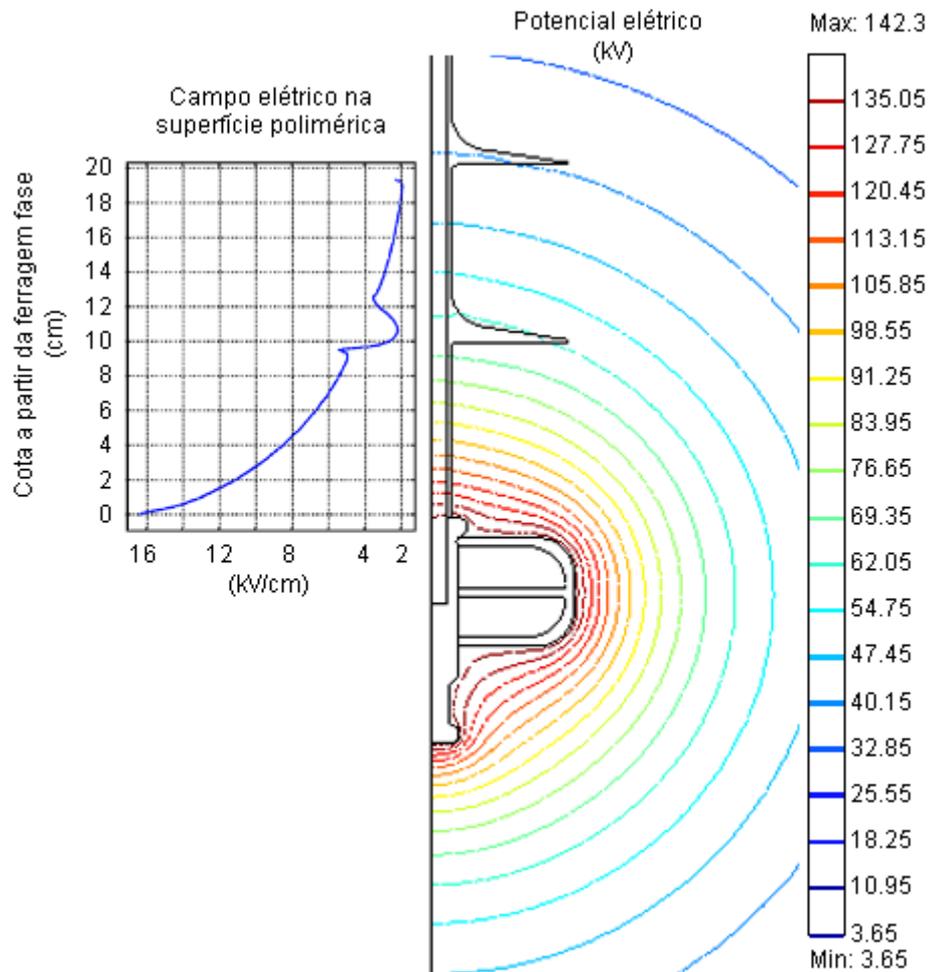


Figura 4.9. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo A5.

#### 4.1.5.7. Tipo B

A configuração B apresentou um valor máximo de campo elétrico maior que as configurações que utilizaram o anel A158. Contudo, percebe-se que a taxa de decrescimento deste campo elétrico sobre a superfície polimérica é mais acentuada. Além disso, o anel A444 produz uma distribuição de potencial mais eficaz. Na Figura 4.10 é possível observar graficamente este comportamento. Tanto o campo elétrico quanto o potencial são deslocados para cima, o que justifica o aquecimento acima da primeira aleta demonstrado nas inspeções termovisivas IC02S-B e IC01S-B.

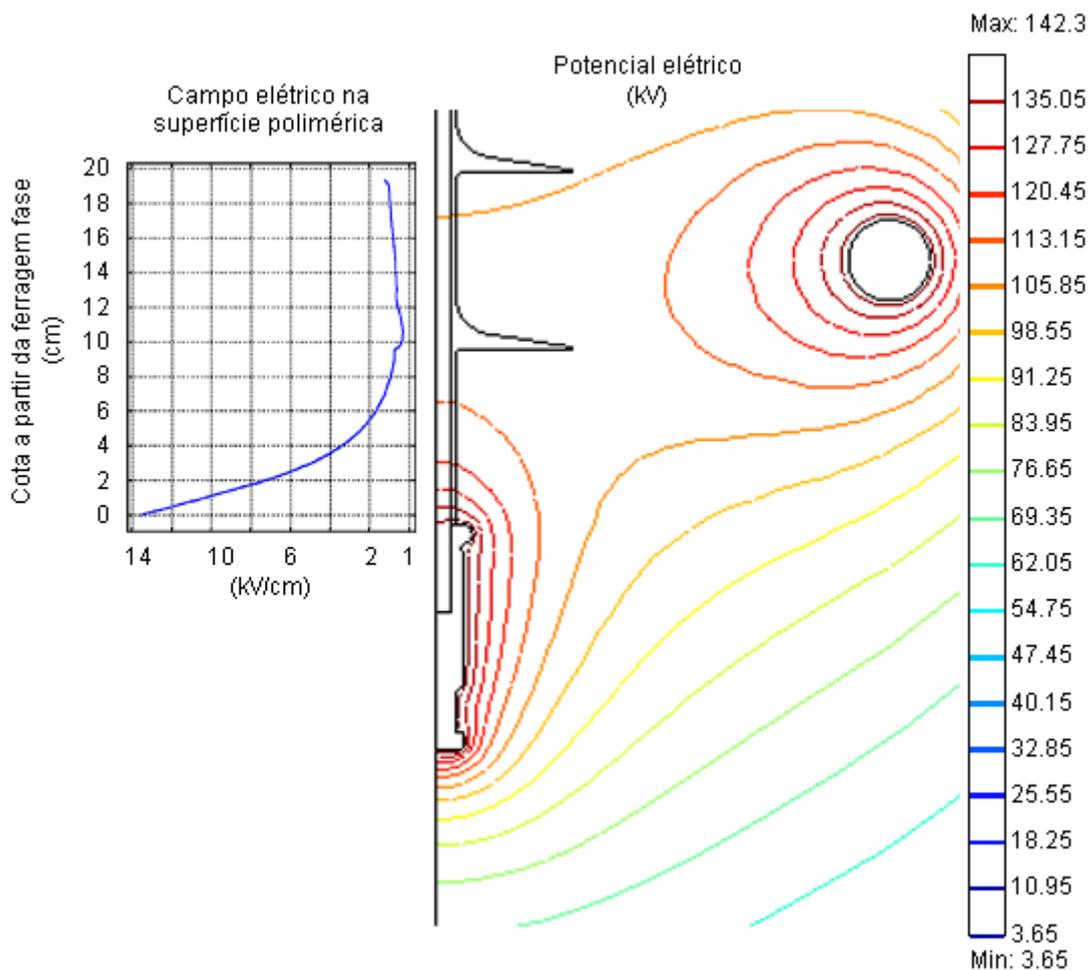


Figura 4.10. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo B.

#### 4.1.5.8. Tipo C1

A configuração que utilizou um isolador de vidro associado ao isolador polimérico apresentou o maior valor máximo de campo elétrico dentre todos os casos estudados, excetuando-se a Tipo O. O potencial elétrico concentra-se de forma mais intensa no pino do isolador de vidro, mas também é bem significativo na ferragem fase do isolador polimérico, conforme se pode observar na Figura 4.11. Este comportamento justifica o desempenho insatisfatório da configuração C1 durante os ensaios de análise.

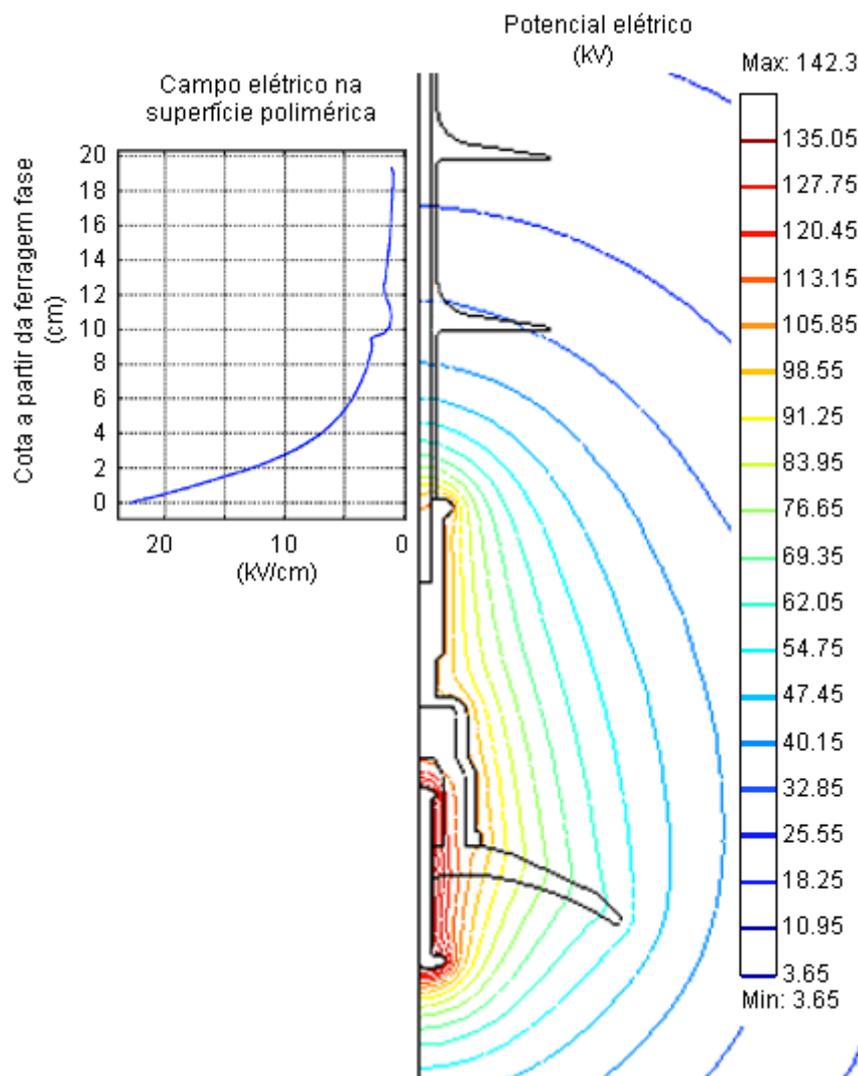
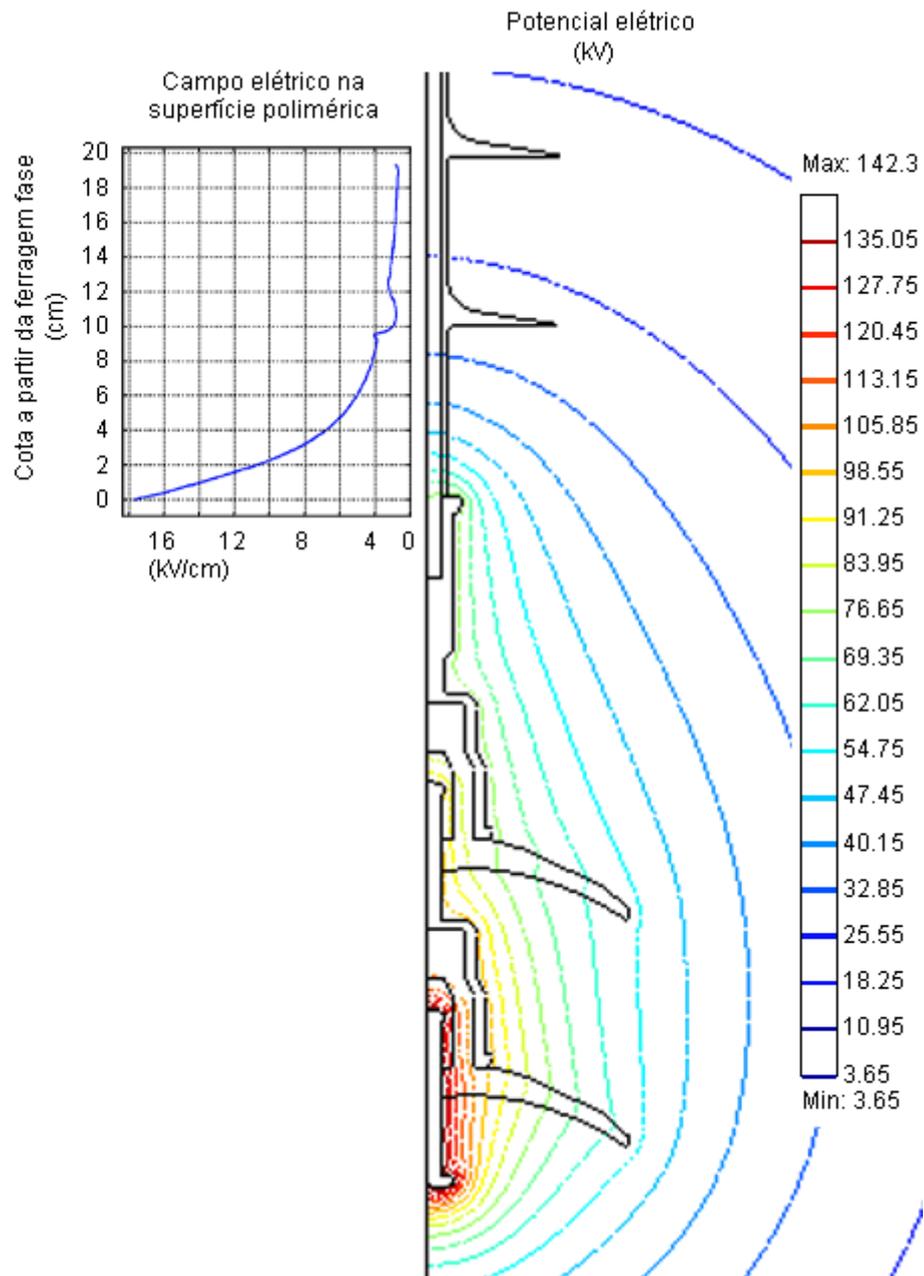


Figura 4.11. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo C1.

#### 4.1.5.9. Tipo C2

Na Figura 4.12 pode-se observar o comportamento da configuração C2.



**Figura 4.12. Representação do campo elétrico na superfície polimérica e do potencial nas redondezas da configuração Tipo C2.**

O uso de dois isoladores de vidro associados ao isolador polimérico também não demonstra um comportamento satisfatório. O potencial elétrico presente na ferragem fase do isolador polimérico atinge cerca de 50% da tensão aplicada, e como não há anel equalizador, o campo elétrico na superfície polimérica é acentuado.

#### 4.1.6. Análise dos efeitos do envelhecimento e da poluição

Esta sessão faz uma comparação analítica entre os graus de poluição e envelhecimento dos quatro casos de isoladores ensaiados: IN, IC01S, IC02S e IC02L.

Para facilitar a observação dos valores obtidos, os resultados são novamente mostrados, de forma condensada, na Tabela 4.9.

**Tabela 4.9. Agrupamento dos resultados de análise.**

| Configuração | URA (%) | TA (°C) | PQ (°C) | TDI (°C) | PQ-TDI (°C) | Tmed (°C) | VMDC (pontos/min) | DCmed (pontos/min) |       |
|--------------|---------|---------|---------|----------|-------------|-----------|-------------------|--------------------|-------|
| IN           | A1      | 69,0    | 26,0    | 28,9     | 28,6        | 0,3       | 1300              | 1562               |       |
|              | A2      | 68,0    | 26,0    | 29,0     | 28,5        | 0,5       | 1540              |                    |       |
|              | A3      | 68,0    | 26,0    | 28,0     | 27,7        | 0,3       | 1685              |                    |       |
|              | A4      | 68,0    | 26,0    | 28,7     | 28,3        | 0,4       | 1563              |                    |       |
|              | A5      | 70,0    | 26,0    | 28,9     | 28,6        | 0,3       | 1723              |                    |       |
|              | B       | 65,0    | 27,0    | 29,4     | 29,3        | 0,1       | 0,1               | 2135               | 2135  |
|              | C1      | 65,0    | 26,5    | 28,8     | 28,6        | 0,2       | 0,2               | 13790              | 12566 |
|              | C2      | 61,0    | 26,0    | 29,8     | 29,6        | 0,2       | 0,2               | 11341              |       |
| O            | 70,0    | 24,0    | 28,3    | 27,7     | 0,6         | 0,6       | 14460             | 14460              |       |
| IC01S        | A1      | 75,0    | 25,0    | 34,5     | 28,1        | 6,4       | 3158              | 5112               |       |
|              | A2      | 85,0    | 24,0    | 36,1     | 26,9        | 9,2       | 4940              |                    |       |
|              | A3      | 80,0    | 25,0    | 36,6     | 27,6        | 9,0       | 3355              |                    |       |
|              | A4      | 75,0    | 26,0    | 36,7     | 28,0        | 8,7       | 6900              |                    |       |
|              | A5      | 72,0    | 25,0    | 35,2     | 28,6        | 6,6       | 7207              |                    |       |
|              | B       | 85,0    | 24,5    | 30,1     | 27,0        | 3,1       | 3,1               | 1955               | 1955  |
|              | C1      | 81,0    | 25,0    | 38,3     | 28,9        | 9,4       | 10,3              | 13331              | 10821 |
|              | C2      | 85,0    | 25,0    | 38,4     | 27,3        | 11,1      | 10,3              | 8310               |       |
| O            | 81,0    | 25,0    | 36,3    | 28,8     | 7,5         | 7,5       | 17603             | 17603              |       |
| IC02S        | A1      | 54,5    | 28,0    | 36,7     | 32,2        | 4,5       | 11053             | 7471               |       |
|              | A2      | 50,0    | 28,0    | 35,1     | 32,3        | 2,8       | 6630              |                    |       |
|              | A3      | 53,0    | 29,0    | 35,8     | 33,2        | 2,6       | 2999              |                    |       |
|              | A4      | 65,0    | 27,0    | 36,1     | 30,3        | 5,8       | 3878              |                    |       |
|              | A5      | 70,0    | 25,0    | 36,8     | 29,0        | 7,8       | 12796             |                    |       |
|              | B       | 65,0    | 26,5    | 30,6     | 29,0        | 1,6       | 1,6               | 2161               | 2161  |
|              | C1      | 57,5    | 27,5    | 36,0     | 31,1        | 4,9       | 5,7               | 17822              | 17689 |
|              | C2      | 62,5    | 27,0    | 36,5     | 30,0        | 6,5       | 5,7               | 17557              |       |
| O            | 63,0    | 27,0    | 36,3    | 31,7     | 4,6         | 4,6       | 8435              | 8435               |       |
| IC02L        | A1      | 72,0    | 26,0    | 30,1     | 28,4        | 1,7       | 3749              | 4104               |       |
|              | A2      | 50,0    | 28,0    | 33,1     | 32,1        | 1,0       | 4145              |                    |       |
|              | A3      | 50,0    | 28,0    | 32,6     | 32,1        | 0,5       | 1,3               |                    | 3258  |
|              | A4      | 50,0    | 27,5    | 32,5     | 31,2        | 1,3       | 1,3               |                    | 4281  |
|              | A5      | 55,0    | 27,0    | 33,4     | 31,3        | 2,1       | 1,3               |                    | 5085  |
|              | B       | 68,0    | 25,0    | 27,7     | 27,4        | 0,3       | 0,3               | 1745               | 1745  |
|              | C1      | 65,0    | 26,5    | 32,5     | 29,9        | 2,6       | 2,3               | 1812               | 9537  |
|              | C2      | 65,0    | 26,0    | 31,4     | 29,4        | 2,0       | 2,3               | 17263              |       |
| O            | 67,0    | 27,0    | 32,6    | 31,1     | 1,5         | 1,5       | 12583             | 12583              |       |

Em que:

URA é a umidade relativa do ar;

TA é a temperatura ambiente;

PQ é a temperatura do ponto mais quente do isolador;

TDI é a temperatura dominante no isolador;

VMDC é o valor médio de descargas corona;

Tmed é a média dos gradientes de temperatura entre os valores apresentados por um mesmo modelo de anel equalizador;

Dcmed é a média de corona entre os valores apresentados por um mesmo modelo de anel equalizador.

A configuração tipo O, onde há ausência de anéis equalizadores e isoladores de vidro associados, apresentou o maior gradiente de temperatura no caso do isolador novo (IN). Contudo, nos isoladores envelhecidos ou com poluição (IC01S, IC02S e IC02L), a configuração tipo O não foi a responsável pelos maiores gradientes. Os maiores gradientes térmicos em isoladores envelhecidos foram apresentados pelos casos de isoladores de vidro associados.

A configuração IC02L-O (isolador limpo) apresentou um volume de descargas bastante superior à configuração IC02S-O (isolador poluído). Este comportamento não era esperado, pois o isolador limpo teve valores de descargas corona inferiores ao isolador poluído em todas as outras configurações. Provavelmente, houve um erro de medição, e o experimento relativo a estas configurações deve ser refeito.

Com relação às descargas corona, a configuração tipo O apresentou os maiores índices em três isoladores: IN, IC01S e IC02L. Apenas em IC021S os níveis com os isoladores de vidro associados foram superiores aos níveis do corona na ausência de eletrodos equalizadores.

O uso do anel de 158 mm de diâmetro (A158), colocado na posição recomendada pelo fabricante (A1), teve um desempenho eletrotérmico notável no isolador novo (IN), mas nos casos que utilizaram isoladores envelhecidos ou com poluição sempre apresentou resultados inferiores ao anel equalizador A444. Os resultados de gradientes térmicos da modalidade A1 foram superiores às demais configurações utilizando o anel A158, configurações A2, A3, A4 e A5, particularmente quando instalados no isolador IC01S.

A configuração A1, em todos os isoladores, apresentou diferenças térmicas próximas a alguma das outras configurações utilizando o anel A158. O fabricante de isolador considera as configurações A2, A3, A4 e A5 como incorretas. O comportamento instável do anel A158 demonstra que a sua utilização não é plenamente correta.

De forma geral, o uso do anel A158 melhora o desempenho do isolador, quando comparado com a ausência de anéis de equalização. Os níveis de corona são sensivelmente diminuídos, mas os gradientes térmicos não diminuem a contento. Contudo, a forma de instalação deste anel não influencia fortemente os padrões de temperatura ou de descargas corona.

Como dito anteriormente, os gradientes de temperatura para anel de equalização A444 se mostraram sempre os menores. Com respeito ao corona, o nível de descargas com o uso do anel de 444 mm de diâmetro foi, apesar de baixo, o maior quando utilizado no isolador novo (IN-B). Não obstante, com a variação do estado de deterioração e poluição do isolador, o anel A444 manteve os menores níveis de descargas, sempre compatíveis com o valor apresentado no isolador novo.

Nos arranjos tipo B e A3, para os isoladores com poluição (IC01S e IC02S), percebe-se um aquecimento mais intenso acima da segunda aleta. Este comportamento pode ser justificado pelo aumento da intensidade de campo elétrico na região acima da

primeira aleta, ocorrido em função do posicionamento dos eletrodos. Embora, com a limpeza do isolador IC02S (que se tornou IC02L), a temperatura tenha diminuído. Esta constatação está associada ao comportamento de descargas superficiais sobre o isolante.

De maneira geral, o isolador envelhecido cinco anos em campo (IC01S) apresentou gradientes térmicos mais acentuados que o isolador envelhecido quatro anos (IC02S). Todavia, o contrário aconteceu com relação aos níveis de descargas, pois o isolador IC02S teve médias de descargas mais altas que IC01S. Esta constatação pode estar diretamente relacionada com o nível de poluição, que independe da idade do isolador.

A presença de poluição mostrou-se importante tanto para a explicitação dos gradientes térmicos quanto para a explicitação da média de descargas corona. Esta afirmação pode ser feita sob a condição de pouca variação da umidade relativa do ar durante os ensaios. Em relação às descargas, foi observada nos dois isoladores poluídos (IC01S e IC02S) a manifestação de pontos fixos de emissão de ultravioleta, em regiões de intensa poluição.

Com a limpeza do isolador IC02S, que se tornou IC02L, o ponto persistente de corona foi completamente eliminado. É possível que o ponto persistente fosse, na realidade, descargas superficiais ocorrentes sobre o isolante. Além disso, tanto os gradientes térmicos quanto os níveis de descargas diminuíram acentuadamente. Assim, percebe-se a necessidade da lavagem periódica de isoladores poliméricos submetidos a este tipo de poluição. As condições de poluição a que os isoladores estavam submetidos implica na intensa aceleração da deterioração.

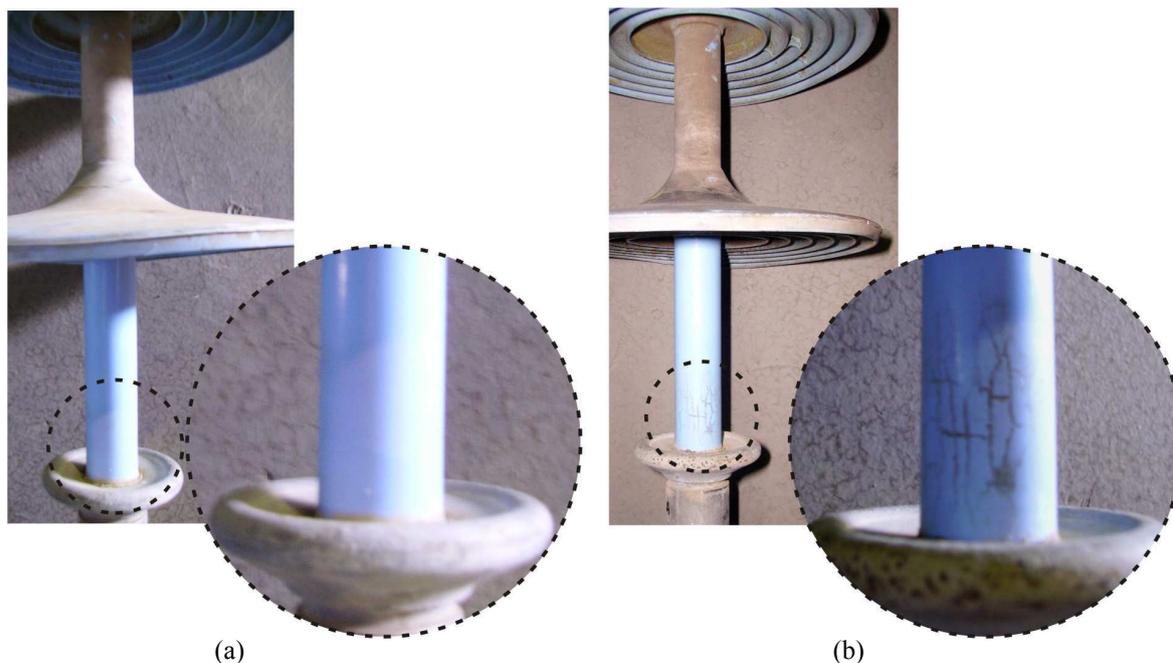
Os resultados das análises evidenciam que a ausência de anéis equalizadores ou o uso de isoladores de vidro associados é totalmente desaconselhável.

#### **4.1.7. Inspeções visuais**

A alta atividade de corona, advinda da intensificação do campo elétrico, juntamente com a conseqüente elevação de temperatura em determinadas regiões do isolador, são os primeiros sintomas e requisitos para a formação do trilhamento. Esta formação pode ser catalisada quando ocorre infiltração de umidade na interface núcleo revestimento. A infiltração, por sua vez, acontece quando o isolador perde o lacre de silicone existente entre uma das ferragens e a borracha do revestimento, ou ainda quando a borracha de silicone resseca, devido ao estresse térmico e elétrico, perdendo a tenacidade e permitindo a entrada de água.

As inspeções visuais feitas durante a realização dos ensaios mostraram que o lado do isolador no qual incide o vento durante sua operação, é um importante fator a ser levado em consideração. Isoladores retirados do campo apresentaram um estado inicial de degradação caracterizado pelo ressecamento do revestimento polimérico, na região próxima à ferragem fase. Apesar de não poder ser ainda considerado um indício claro de tendência ao trilhamento, este tipo de ressecamento pode permitir a penetração de umidade na interface revestimento-núcleo e facilitar o desenvolvimento do trilhamento de núcleo.

Nas amostras inspecionadas, o ressecamento apresentou-se apenas em um lado do revestimento, oposto à incidência do vento, conforme ilustrado na Figura 4.13. Esta ocorrência direcionada do ressecamento indica que o processo tem relação direta com as temperaturas presente na região afetada, pois o vento promove a refrigeração e a retirada da camada de poluição.



**Figura 4.13. Fotografia da região próxima ao eletrodo fase um isolador polimérico.**  
**(a) Lado do isolador onde havia incidência direta do vento.**  
**(b) Lado do isolador onde não havia incidência direta do vento.**

## **4.2. Resultados dos ensaios de reprodução de indícios de trilhamento**

Os resultados dos ensaios que mostram a reprodução de indícios de trilhamento de núcleo são apresentados neste item. Os ensaios de alta tensão com envelhecimento acelerado foram realizados no laboratório de descargas parciais. Os resultados são constituídos de sinais emitidos pelo detector de descargas parciais e fotografias com o auxílio do microscópio.

Os resultados dos trabalhos desenvolvidos mostram alguma eficiência da metodologia proposta, visto que amostras do isolador foram expostas ao método proposto no item 3.2: Eletrodo aterrado, seco; Eletrodo em alta-tensão, seco; Eletrodo em alta-tensão, com presença de umidade.

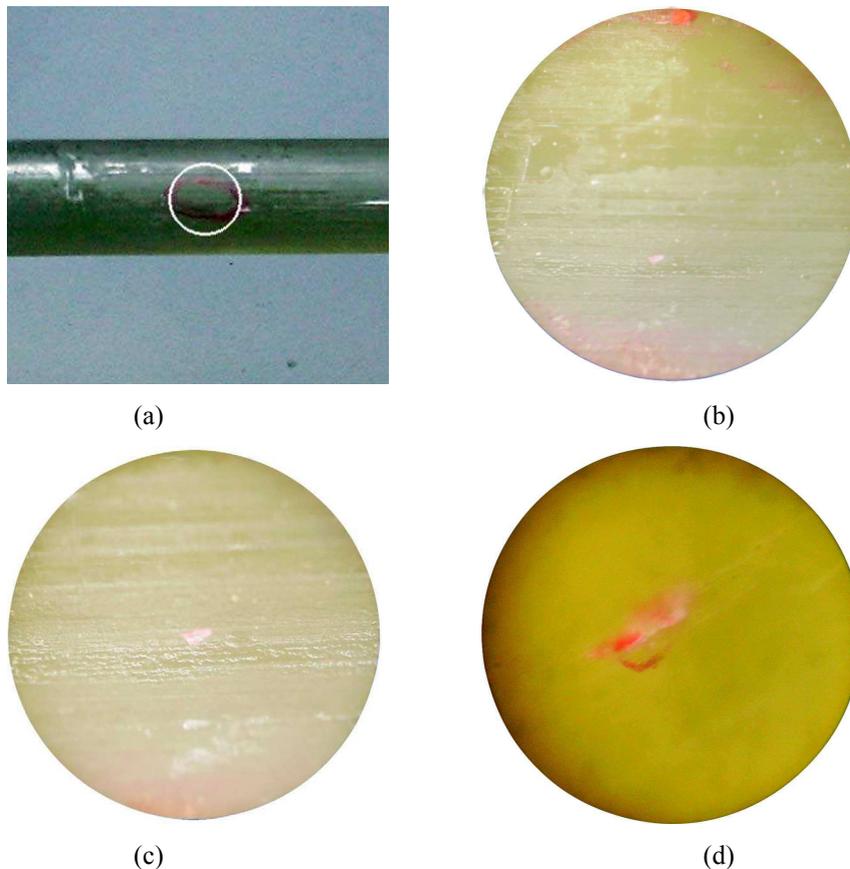
Na Figura 4.14 é mostrado o aspecto do núcleo de fibra de vidro de um isolador polimérico perfeito, para efeito comparativo. Os resultados dos ensaios são mostrados em seguida.



**Figura 4.14. Aspecto do núcleo de fibra de vidro perfeito.**  
(a) Aumento de 50 vezes; (b) Aumento de 200 vezes.

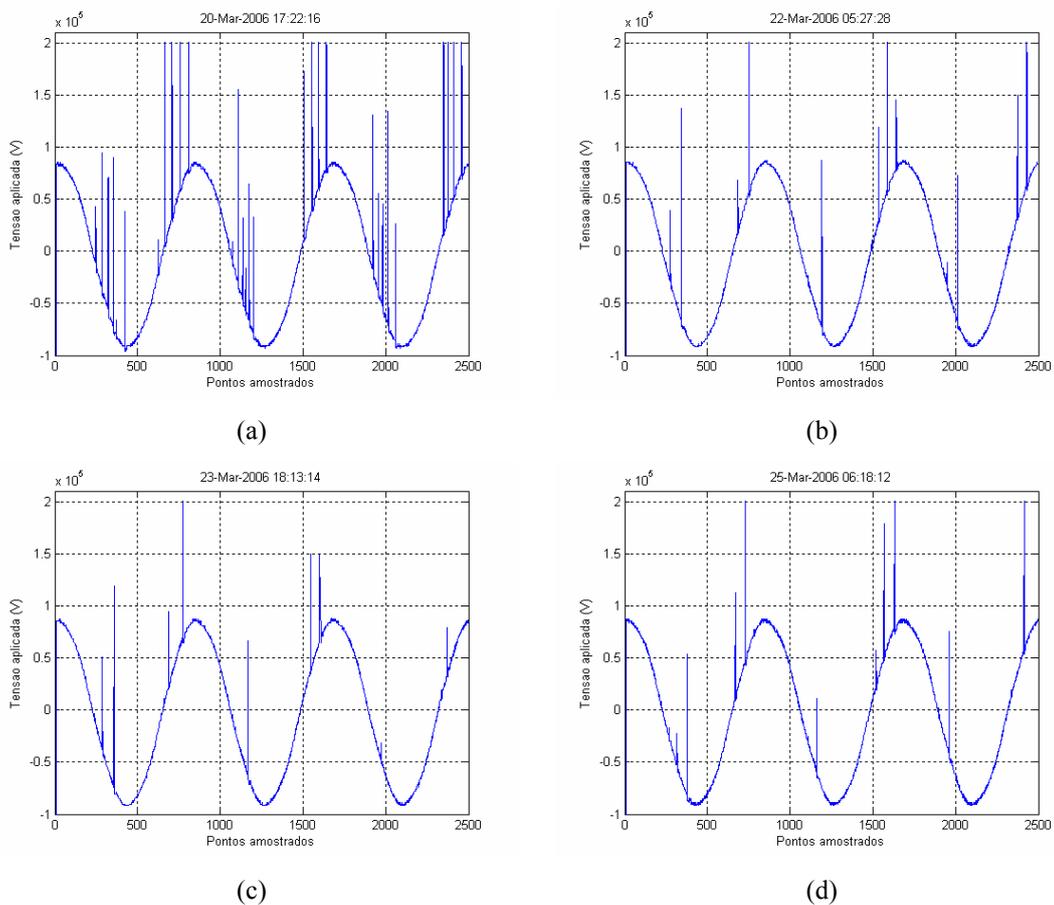
#### **4.2.1. Eletrodo aterrado, seco**

Após o período de aplicação de tensão (168 horas) não está efetiva a manifestação da carbonização, conforme mostrado na Figura 4.15. Na figura podem ser observados quatro níveis de detalhamento da região do núcleo exposta ao método.



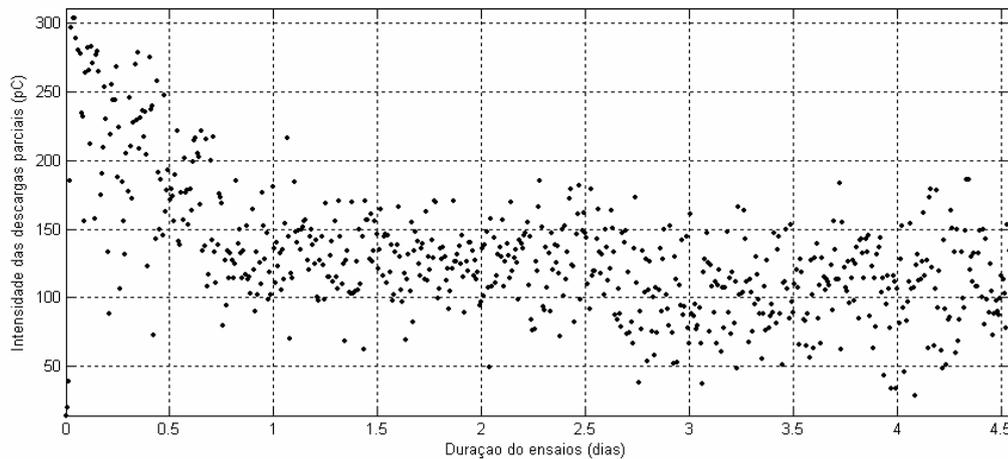
**Figura 4.15. Fotografia do núcleo no ensaio com eletrodo aterrado a seco.**  
(a) Olho nu; (b) Aumento de 25 vezes;  
(c) Aumento de 50 vezes; (d) Aumento de 200 vezes.

As imagens (c) e (d) da Figura 4.16 mostram uma pequena erosão na fibra de vidro, devido à intensa atividade de descargas parciais na região ou o efeito da inserção da agulha. Contudo, a região comprometida é muito pequena em relação ao tempo de aplicação de alta tensão. Caso esta hipótese tenha ocorrido, a variante do método é pouco atraente para a reprodução artificial do trilhamento. Os sinais de descargas parciais para esta variante do método são mostrados na Figura 4.16, em quatro momentos distintos do ensaio.



**Figura 4.16. Sinais de descargas parciais com eletrodo aterrado, seco.**  
(a) 1º dia; (b) 3º dia de ensaio;  
(c) 4º dia de ensaio (d) 6º dia de ensaio.

A Figura 4.17 mostra os valores absolutos dos níveis de descargas parciais durante toda a execução do ensaio.

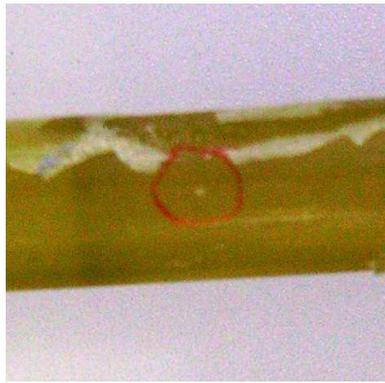


**Figura 4.17. Níveis de descargas parciais em todo o ensaio, eletrodo aterrado, seco.**

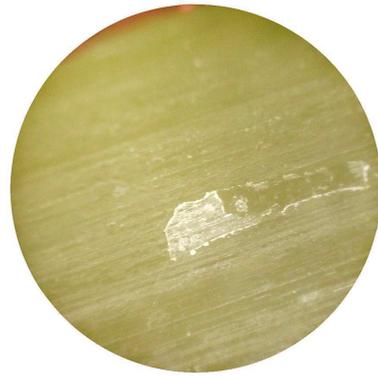
Os padrões emitidos pelo detector de descargas parciais mostram presença de corona e alguma atividade de descargas parciais. Todavia, os níveis de descargas parciais e de corona diminuem conforme o avanço do tempo. A diminuição do número de descargas parciais com o passar do tempo pode ser justificada pelo aumento da pressão na cavidade onde o eletrodo se encontra, devido à liberação de gases no processo de descargas, aquecimento e carbonização. Além disso, com o aquecimento e a formação do ozônio da região, descargas corona que poderiam ocorrer no início do ensaio foram extintas. A configuração do campo elétrico também é modificada de acordo com a deposição de carbono na região, interferindo diretamente nos padrões e número de descargas.

#### **4.2.2. Eletrodo em alta tensão, seco**

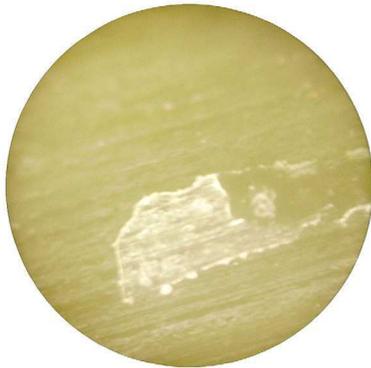
Nesta modalidade do método observou-se uma maior área de erosão no núcleo do isolador, comparado ao caso da seção 4.2.1. Também foi observada uma perda de tenacidade por parte do adesivo que promove a união revestimento-núcleo. O adesivo tornou-se quebradiço e soltava-se facilmente do núcleo, conforme pode ser observado na Figura 4.18.



(a)



(b)



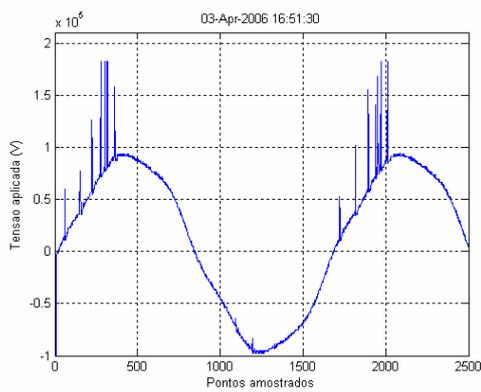
(c)



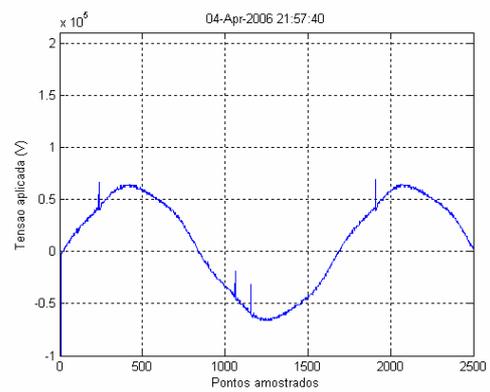
(d)

**Figura 4.18. Fotografia do núcleo no ensaio com eletrodo em alta tensão, seco.**  
**(a) Olho nu; (b) Aumento de 25 vezes;**  
**(c) Aumento de 50 vezes; (d) Aumento de 200 vezes.**

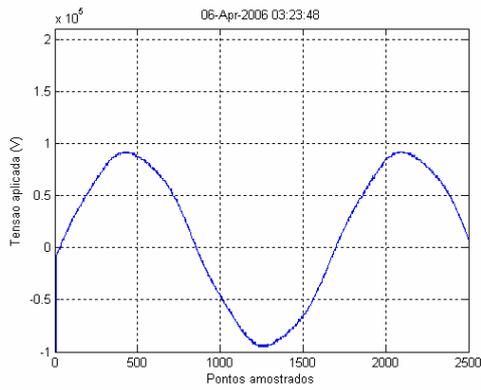
Os sinais de descargas parciais para esta modalidade do método são mostrados na Figura 4.19, em quatro momentos distintos do ensaio.



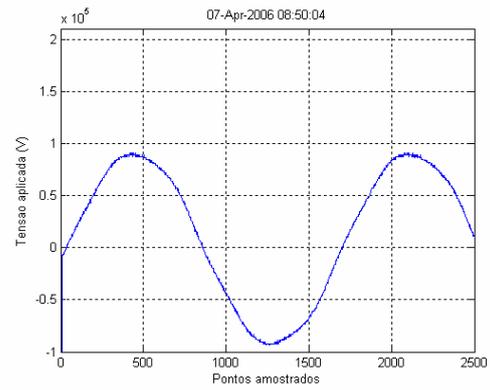
(a)



(b)



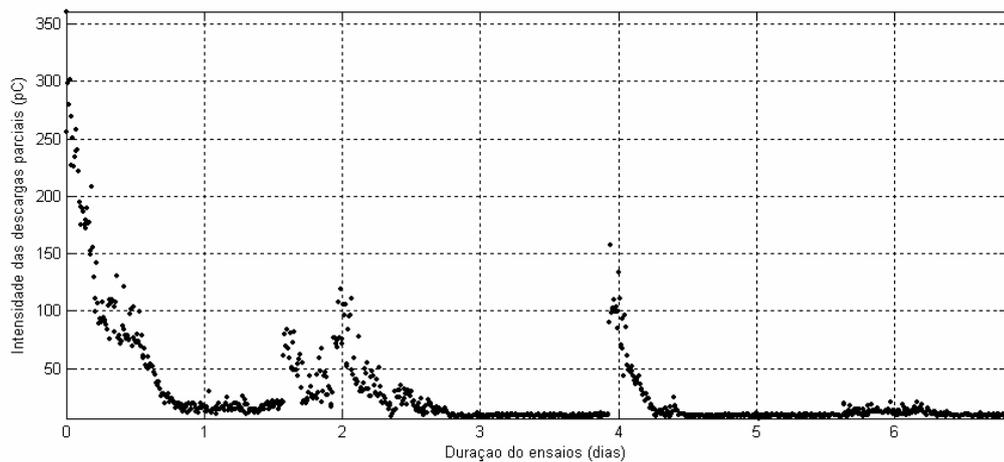
(c)



(d)

**Figura 4.19. Sinais de descargas parciais Eletrodo em alta tensão, seco.**  
**(a) 1º dia; (b) 2º dia de ensaio;**  
**(c) 4º dia de ensaio (d) 5º dia de ensaio.**

A Figura 4.20 mostra a evolução dos valores absolutos dos níveis de descargas parciais durante toda a execução do ensaio.



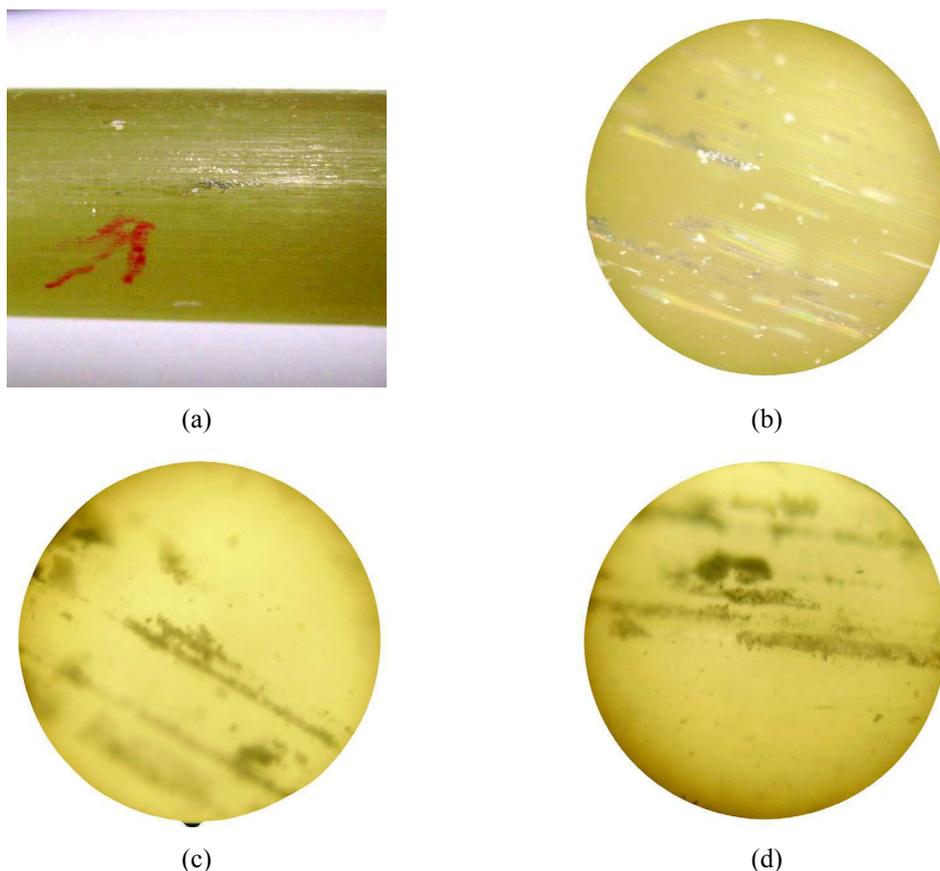
**Figura 4.20. Níveis de descargas parciais em todo o ensaio, eletrodo em alta tensão, seco.**

Os padrões emitidos pelo detector de descargas parciais mostram uma diminuição do nível de descargas e corona, conforme o avanço do tempo. A diminuição dos níveis de descargas parciais com o passar do tempo pode ser justificada pelo aumento da pressão na cavidade onde o eletrodo se encontra, devido à liberação de gases no processo de descargas, aquecimento e carbonização. Além disso, com o aquecimento e a formação do ozônio da região, descargas corona que poderiam ocorrer no início do ensaio foram extintas. A configuração do campo elétrico também é modificada de acordo com a

deposição de carbono na região, interferindo diretamente nos padrões e número de descargas. Os picos de descargas observados foram estimulados pelo aumento da tensão aplicada, visando acelerar a degradação.

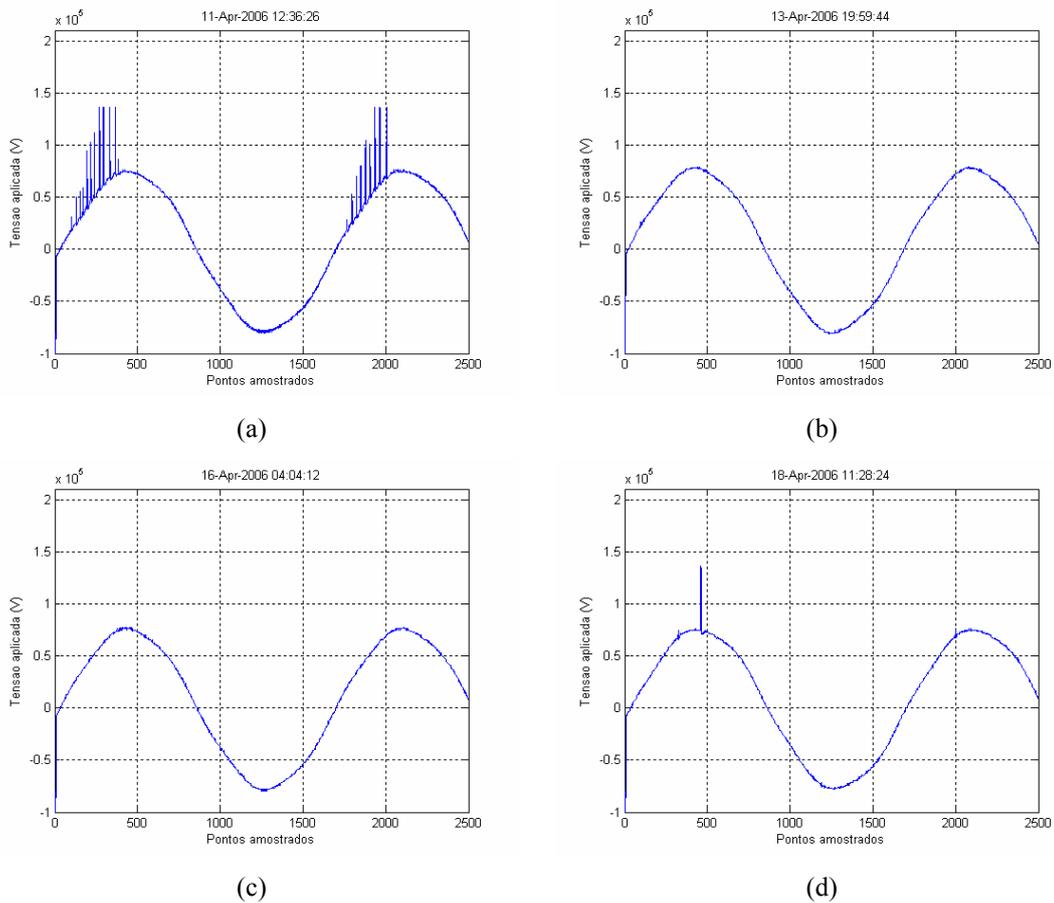
#### 4.2.3. Eletrodo em alta-tensão, com presença de umidade

A presença da umidade na interface núcleo-revestimento mostrou-se um fator importante no desenvolvimento do trilhamento. A região em torno do ponto de contato do núcleo com o eletrodo sofreu carbonização e erosão. Os resultados foram mais promissores nesta modalidade do método. Na Figura 4.21 pode ser observado o início do processo de trilhamento do núcleo.



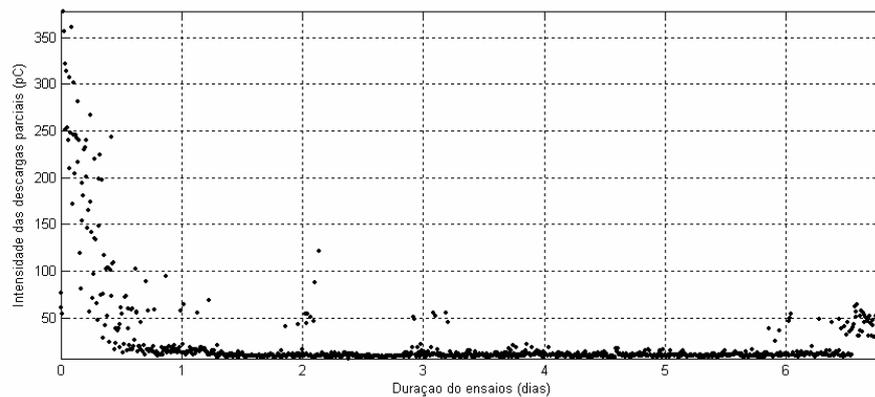
**Figura 4.21. Fotografia do núcleo no ensaio com eletrodo em alta tensão, com presença de umidade.  
(a) Olho nu; (b) Aumento de 25 vezes;  
(c) Aumento de 50 vezes; (d) Aumento de 200 vezes.**

Os sinais de descargas parciais para esta modalidade do método são mostrados na Figura 4.22, em quatro momentos distintos do ensaio.



**Figura 4.22. Sinais de descargas parciais eletrodo em alta tensão, seco.**  
**(a) 1º dia de ensaio; (b) 3º dia de ensaio;**  
**(c) 6º dia de ensaio (d) 7º dia de ensaio.**

A Figura 4.23 mostra os valores absolutos dos níveis de descargas parciais durante toda a execução do ensaio.



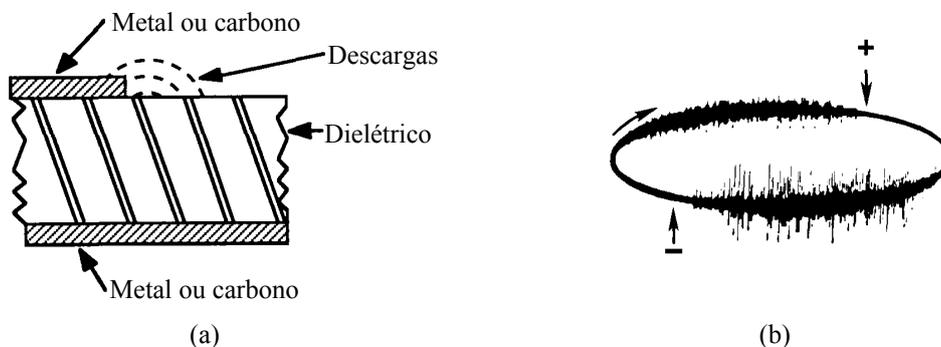
**Figura 4.23. Níveis de descargas parciais em todo o ensaio, eletrodo em alta tensão, úmido.**

Os padrões de descargas parciais e corona emitidos pelo detector mostram uma predominância do corona no sinal, com tendência de minimização conforme o avanço do tempo. Além disso, com o aquecimento e a formação do ozônio da região, descargas corona que poderiam ocorrer no início do ensaio foram extintas. Os picos de descargas observados foram estimulados pelo aumento da tensão aplicada, visando acelerar a degradação.

A predominância das descargas corona no sinal detectado se dá frente à minimização das descargas parciais, devido à presença de água na cavidade. A configuração do campo elétrico também é modificada de acordo com a deposição de carbono na região e a presença da água, interferindo diretamente nos padrões e número de descargas.

Observou-se que em todos os ensaios de reprodução do trilhamento de núcleo a presença de descargas corona mascarando os sinais de descargas parciais. Além disso, os sinais de descargas parciais não eram simétricos.

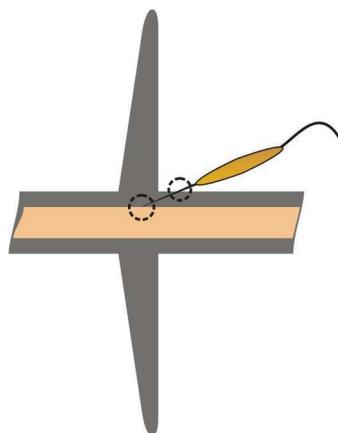
Natrass (1988) explica que o padrão de descargas para regiões metálicas com terminação abrupta, em contato com a superfície dielétrica, como visto na Figura 4.24. O padrão de descargas é assimétrico e a configuração tende a apresentar padrões poucos definidos de descargas caso a tensão aplicada cresça demasiadamente.



**Figura 4.24. Padrão de descargas para regiões metálicas com terminação abrupta, em contato com a superfície dielétrica. (a) Diagrama esquemático; (b) Padrão de descargas.**

Um desenho do arranjo utilizado é mostrado na Figura 4.25. O eletrodo agudo é inserido até a interface núcleo-revestimento. A figura revela que existem dois locais de ocorrências das descargas, um interno e outro externo. O externo é formado por um eletrodo fino (agulha), o ar e o material isolante e apresenta grande probabilidade de ocorrência de descargas com grandes intensidades. O seu padrão é semelhante ao arranjo da Figura 4.24. A segunda região se apresenta circunscrita a um material sólido, com um eletrodo agudo e campo elétrico muito intenso, contudo a presença de um material com alta rigidez dielétrica dificulta a ocorrência das descargas, sendo necessária a formação de uma cavidade, que só será possível em campos bastante elevados através da emissão eletrônica.

A presença de água modifica completamente o mecanismo de formação da arborescência em arranjos considerados aquosos. Os microcanais criados pelo início da arborescência são preenchidos com água, e as descargas parciais acontecem somente nas pontas da arborescência, sem concentrarem-se na ponta da agulha (MORITA et al., 2003). Em alguns períodos a atividade ocorre sem a detecção de descargas parciais.



**Figura 4.25. Esboço das regiões de ocorrência de descarga parciais e corona.**

# Capítulo 5 – Anel de equalização proposto

Com base na experiência adquirida durante os ensaios realizados, e tomando-se como motivação os desempenhos dos anéis equalizadores ensaiados, propõe-se projetar, construir e avaliar um anel de equalização. O anel foi concebido especialmente para ser utilizado no isolador polimérico classe 230 kV, estudado nos ensaios de análise.

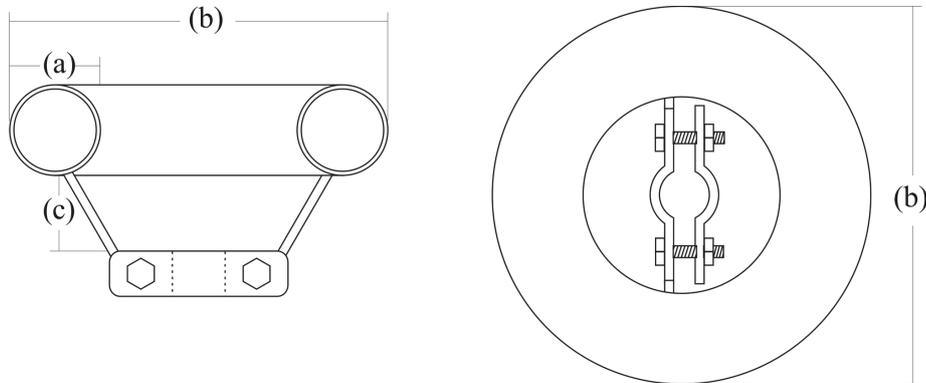
## 5.1. Proposição do anel de equalização

Avaliando-se criteriosamente todas as configurações abordadas nos ensaios de análise (sessão 4.1), percebe-se que o anel de equalização recomendado pelo fabricante do isolador (anel equalizador A158) tem desempenho eletrotérmico insatisfatório, especialmente em situações com presença de poluição. Além disso, muitas vezes o A158 tem desempenho comparável com a situação de ausência de anéis equalizadores.

Por outro lado, a configuração que se demonstrou mais eletrotermicamente estável (anel equalizador A444), foi concebida para cadeias de isoladores cerâmicos, sendo geometricamente superdimensionada para a aplicação em isoladores poliméricos.

Com base em simulações de distribuição de campo elétrico realizadas no software FEMLAB®, utilizando o método dos elementos finitos, foi possível testar outras configurações de eletrodos equalizadores associados ao isolador polimérico. Além de um desempenho eletrotérmico superior para o conjunto isolador-anel, o anel equalizador proposto visa o não superdimensionamento e a conseqüente economia de material e mão de obra em serviços de instalação, evitando também o aumento de peso e a redução da ação do vento na estrutura.

No total, sete propostas diferentes de anéis equalizadores tiveram suas distribuições de campo elétrico simuladas através do MEF. A Figura 5.1 ilustra os parâmetros do eletrodo de equalização que foram variados nas simulações.

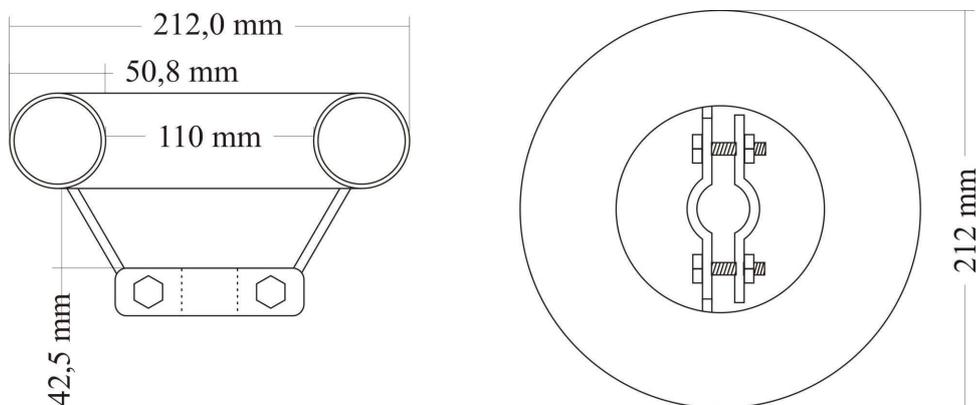


**Figura 5.1. Parâmetros variados durante simulações.**  
**(a) O diâmetro do tubo que compõe a toróide;**  
**(b) O diâmetro da própria toróide;**  
**(c) A distância entre o toróide e a presilha de fixação.**

Foram realizados estudos em sete configurações. Cinco configurações simuladas apresentaram resultados de distribuição de potencial deficiente e similar entre si. As duas configurações descritas a seguir apresentaram os melhores resultados.

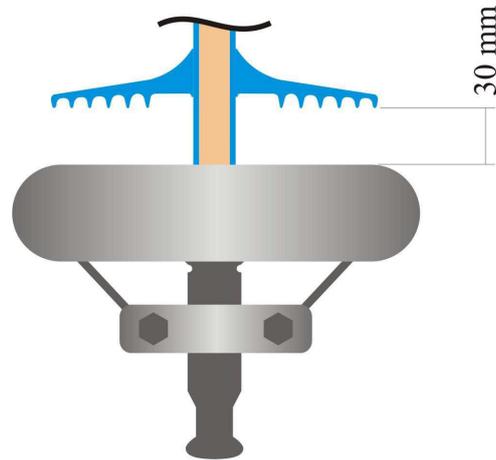
### 5.2.1. Configuração 1

A Configuração 1 utiliza um tubo de 50,8 mm (2") de diâmetro na constituição do toróide. As demais dimensões do equipamento podem ser visualizadas na Figura 5.2.



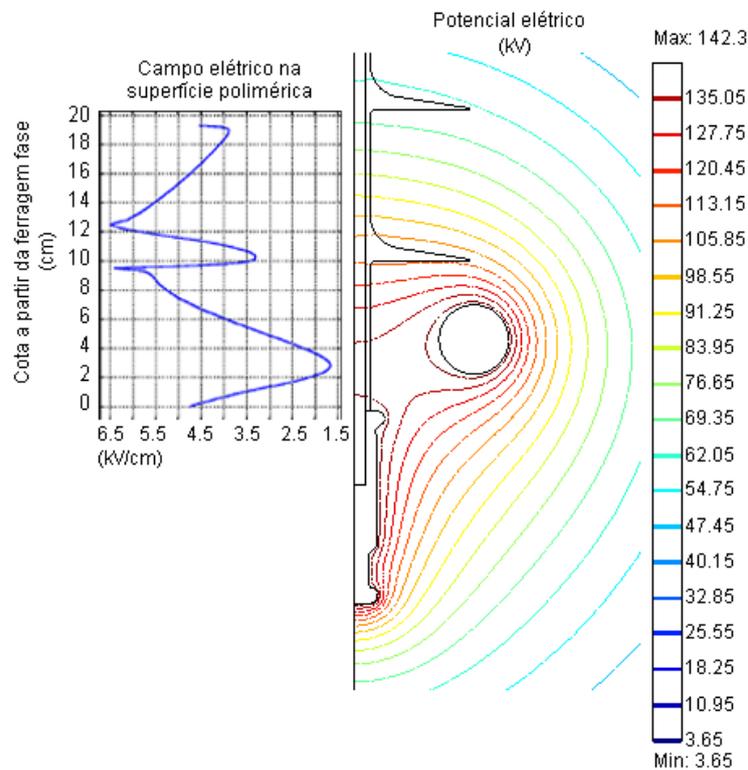
**Figura 5.2. Configuração 1 com as suas dimensões.**

Além das distâncias mostradas no diagrama da Figura 5.2, é importante destacar a distância entre o topo do anel e a primeira aleta do isolador, um parâmetro fundamental para o funcionamento adequado do conjunto. Neste caso, esta distância foi 30 mm, como mostrado na Figura 5.3.



**Figura 5.3. Distância entre a extremidade superior do toróide e a primeira aleta.**

As distribuições de campo e potencial elétricos para este conjunto isolador-anel equalizador podem ser observadas na Figura 5.4.



**Figura 5.4. Distribuição de potencial elétrico e campo na superfície do isolador da Configuração 1.**

Observa-se que o valor máximo de campo elétrico na superfície do isolador é de aproximadamente 6,5 kV/cm. Este resultado é 27,77 % inferior ao melhor resultado simulado, que consta na seção 4.1.5 e foi a configuração A1, com um pico de campo elétrico na superfície polimérica de 9,5 kV/cm.

O eletrodo foi posicionado de modo proposital para que o valor máximo de campo elétrico na superfície do isolador ocorra na primeira aleta. Como a primeira aleta não configura zona de interação, o isolador é preservado.

### 5.2.2. Configuração 2

Na Configuração 2, o tubo utilizado para construir o toróide do anel equalizador mede 66 mm de diâmetro. As demais dimensões do anel equalizador podem ser observadas na Figura 5.5.

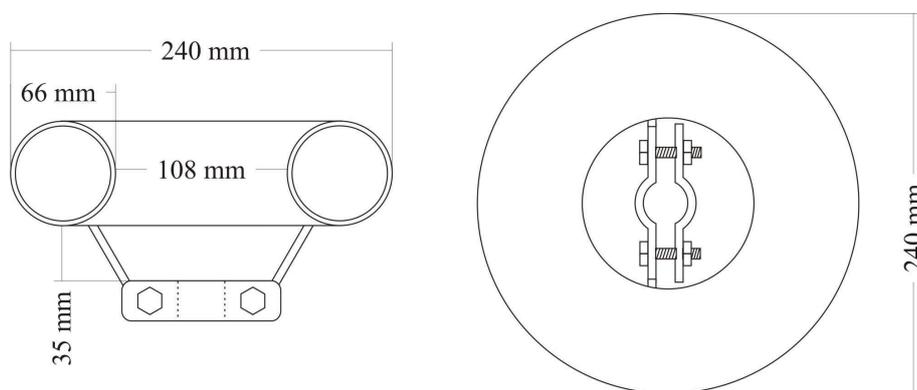
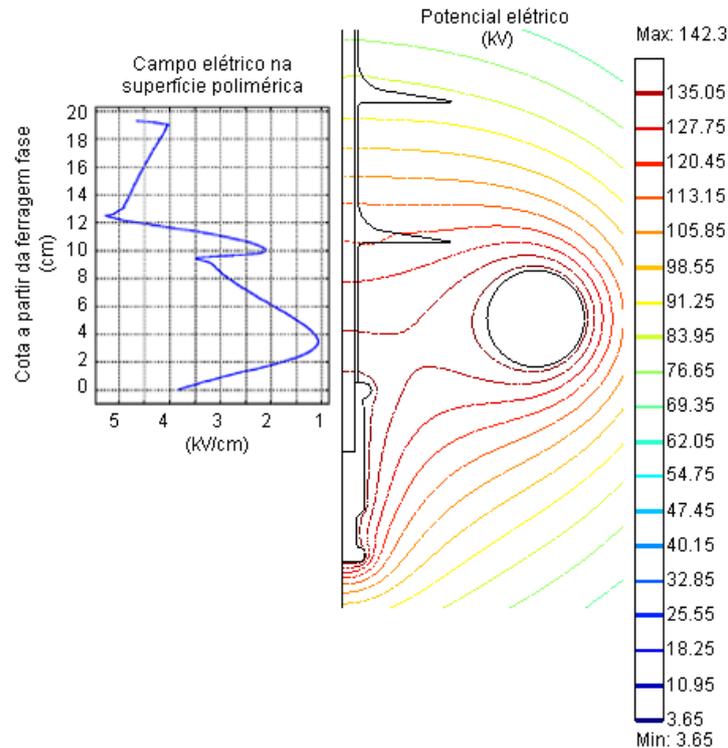


Figura 5.5. Configuração 2 com as suas dimensões.

As simulações de distribuição de campo e potencial elétricos, mostradas na Figura 5.6, apresentam comportamento elétrico superior à Configuração 1. Todavia, o tubo utilizado na construção do toróide não é comercial, o que encareceu o projeto. Uma solução seria o uso da bitola comercial mais próxima (63,5 mm, equivalente a 2,5”), mas esta opção também torna o projeto oneroso a ponto de não justificar a melhoria de 20 % no desempenho do conjunto isolador-anel equalizador, com relação à Configuração 2.



**Figura 5.6. Distribuição de potencial elétrico e campo na superfície do isolador da Configuração 2.**

Ponderando-se os custos associados e distribuição de campo e de potencial elétricos obtidos, optou-se pela construção do protótipo da Configuração 1, visto que ambos os valores absolutos são baixos.

## 5.2. Projeto e construção do anel de equalização

Devido ao seu desempenho satisfatório nas simulações e custo aceitável, o projeto de anel equalizador sugerido na Configuração 1 (seção 5.2.1) foi executado.

Todavia, algumas limitações técnicas foram encontradas. A maior delas diz respeito ao método utilizado para se fabricar o toróide, principal parte do anel equalizador.

Para contornar esta limitação, foi s

ugerida a solda de quatro curvas de 90° e bitola 50,8 mm, formando os 360° do toróide. Infelizmente, as curvas comercialmente disponíveis no mercado têm raio externo de 130 mm, enquanto o raio externo previsto na configuração proposta é 106 mm. Desta

maneira, o diâmetro final do toróide construído foi 260 mm. O projeto foi finalizado, e suas dimensões estão apresentadas na Figura 5.7.

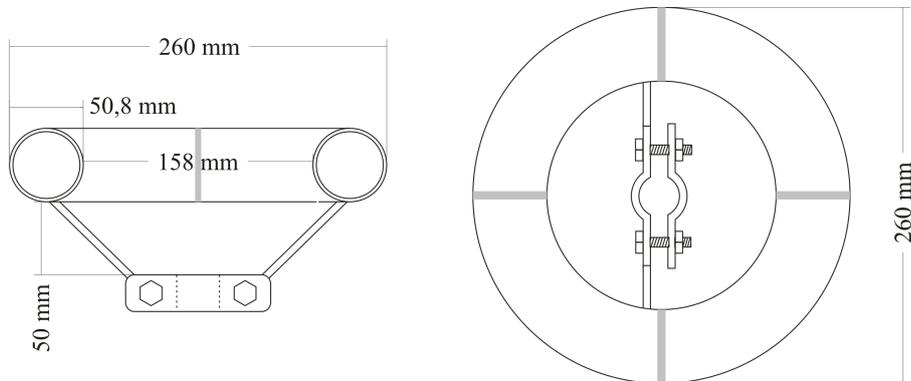


Figura 5.7. Diagrama esquemático do protótipo construído.

### 5.3. Avaliação do anel de equalização proposto

Após a construção, o protótipo foi avaliado nas seguintes configurações: Isolador novo e limpo (IN); Isolador envelhecido 5 anos no campo, com poluição (IC01S); e Isolador envelhecido 4 anos no campo, com poluição removida (IC02L). O caso que envolvia o isolador envelhecido 4 anos no campo com poluição (IC02S) não pôde ser avaliado, porque a sua poluição foi removida (IC02L).

Na Figura 5.8 pode-se observar o protótipo do anel equalizador montado no isolador polimérico IC01S, momentos antes da realização dos ensaios.



**Figura 5.8. Protótipo do anel equalizador proposto montado no isolador IC01S.**

O comportamento eletrotérmico do conjunto isolador-anel equalizador proposto foi avaliado com os mesmos métodos descritos na seção 3.2.1. Os resultados das termografias realizadas nos três isoladores ensaiados são mostrados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1. Resultados termográficos para os isoladores IN, IC01S e IC02L, utilizando o protótipo.**

|                     |  |   |
|---------------------|--|---|
| <p>Tipo IN-P</p>    |  | <p>Quando instalado no isolador novo, o anel de equalização proposto apresentou uma diferença de temperatura de 0,1°C.</p>                            |
| <p>Tipo IC01S-P</p> |  | <p>A diferença de temperatura no isolador sujo e envelhecido 5 anos foi 0,9°C.</p>  |
| <p>Tipo IC02L-P</p> |  | <p>No isolador envelhecido, mas com poluição removida, o anel equalizador proposto permitiu um aquecimento de 0,2°C entre os pontos de interesse.</p> |

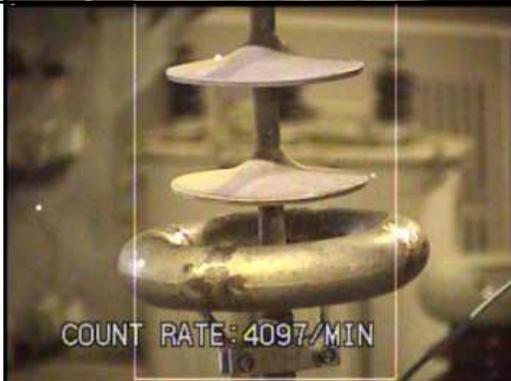
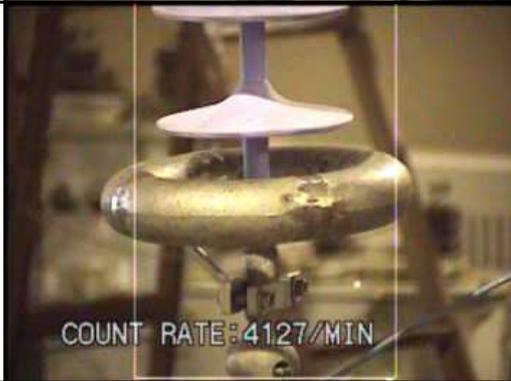
Os resultados das termografias nos isoladores ensaiados utilizando o anel equalizador proposto foram excelentes. Nos três isoladores, os diferenciais térmicos

foram menores ou iguais aos melhores casos apresentados como resultados dos ensaios de análise (IN-B: 0,1°C; IC01S-B: 3,1°C e IC02L-B: 0,3°C).

Quando se analisa o efeito da poluição utilizando o anel projetado, percebe-se uma diminuição na temperatura final dos ensaios. A diferença térmica entre o ponto de maior aquecimento e a temperatura predominante não ultrapassou 0,9°C.

As inspeções com o detector de descargas ultravioletas foram realizadas e os resultados coletados são apresentados na Tabela 5.2. A umidade relativa do ar durante os ensaios oscilou entre 60% e 73%.

**Tabela 5.2. Inspeções de corona para os isoladores IN, IC01S e IC02L, utilizando o protótipo.**

|              |   |   |
|--------------|---|---|
| Tipo IN-P    |   | No isolador limpo, o uso do protótipo proporcionou 2.272 pontos/min.  |
| Tipo IC01S-P |  | No isolador sujo, curiosamente, a média foi menor: 1.982 pontos/min.  |
| Tipo IC02L-P |  | O isolador que teve sua poluição removida, quando associado ao anel equalizador construído, apresentou uma média de 1.779 pontos/min. |

Os níveis de descarga corona para o conjunto isolador-anel equalizador projetado foram compatíveis com os valores encontrados nos ensaios de análise. De maneira geral, os ensaios dos três isoladores com o anel proposto tiveram nível de descargas similares entre si. A diferença entre a maior e a menor média não excedeu 500 pontos, o que atesta o comportamento estável do conjunto frente às adversidades.

Com o isolador novo, o melhor resultado nos ensaios de análise de corona foi o arranjo IN-A1, que apresentou 1.300 pontos/min. Para este mesmo isolador, a configuração empregando o anel construído (IN-P), demonstrou uma média de 2.272 pontos/min. Pode-se justificar este resultado porque o arranjo IN-P utilizou parafusos com arestas expostas .

Com o isolador poluído e envelhecido (IC01S-P), o anel equalizador projetado resultou em uma média de descargas de 1.982 pontos/min. Este resultado é praticamente igual ao melhor caso obtido nos ensaios de análise (IC01S-B), que resultou em 1.955 pontos/min.

Por fim, o isolador que teve a poluição removida e utilizou o anel equalizador construído (IC02L-P) apresentou uma média de descargas de 1.779 pontos/min. Durante os ensaios de análise, quando se utilizando o mesmo isolador, o melhor resultado (IC02L-B) apresentou uma média de 1.745 pontos/min.

## Capítulo 6 – Conclusões

Neste trabalho foi estudado o fenômeno do trilhamento de núcleo em isoladores poliméricos, sob várias perspectivas. Uma técnica de criação de indícios de trilhamento de núcleo em laboratório foi criada, e apesar de estar em fase de aperfeiçoamento, apresentou resultados promissores. Uma outra perspectiva é a necessidade do monitoramento da degradação dos isoladores, que conduziu à observação e à quantificação de dois indicadores físicos de origem e propagação do trilhamento de núcleo:

- Descargas corona nas proximidades do isolador, indicador direto da intensidade de campo elétrico na região.
- Temperaturas superficiais nos isoladores.

O estudo dos fatores de deterioração dos isoladores levou a elaboração de experimentos de análise dos efeitos da concentração, dos quais se podem extrair as seguintes conclusões:

- 1) Nos isoladores novos, a configuração de eletrodos equalizadores não demonstra grande influência nos padrões térmicos nem de descargas corona, inicialmente. Com o tempo, o projeto de eletrodos equalizadores subdimensionados levará a temperaturas mais altas junto à ferragem fase, tornando o surgimento do trilhamento mais provável.

- 2) Nos isoladores envelhecidos foram registrados os maiores diferenciais térmicos e médias de descargas corona por minuto.
- 3) As condições de poluição a que os isoladores classe 230 kV estavam submetidos implica na intensa aceleração da deterioração.
- 4) No isolador limpo e envelhecido foram registradas reduções substanciais na temperatura e nos níveis de descargas corona, quando comparados com os níveis do mesmo isolador na condição poluído.
- 5) A comparação entre um isolador envelhecido naturalmente poluído e posteriormente limpo indica que, ao contrário do que alegam os fabricantes, os isoladores poliméricos também devem ser lavados periodicamente.
- 6) A instalação de isoladores de vidro associados a isoladores poliméricos pode ser tão prejudicial ao isolador polimérico quanto o não uso de equalização.
- 7) A análise dos experimentos com anéis equalizadores aplicados a isoladores poliméricos evidencia a necessidade de que os projetos de anéis equalizadores levem em consideração o local de instalação, o grau de poluição e o clima a que eles serão submetidos.
- 8) O anel A158 instalado como recomendado mostrou-se eficiente somente quando o isolador polimérico estava novo.
- 9) O anel A158 mesmo instalado como recomendado, mas aplicado a um isolador envelhecido e poluído apresentou um comportamento instável, o que demonstra que a sua utilização não é plenamente satisfatória.

10) O anel A158 instalado em isoladores envelhecidos, poluídos ou não, proporcionam uma redução dos níveis de corona. Contudo, os gradientes térmicos não são reduzidos a contento.

11) O anel A158 instalado em isoladores envelhecidos, poluídos ou não, não influencia fortemente os padrões de temperatura ou de descargas corona quando se varia a sua posição de instalação, recomendada ou não.

12) O anel A444 instalado em quaisquer isoladores apresentou desempenho estável com relação à descarga corona e gradientes térmicos.

13) O anel de equalização projetado e construído apresentou-se como uma alternativa que agregou melhoria de desempenho da cadeia quando avaliado sobre os aspectos abordados neste trabalho. Assim, torna-se uma opção viável e funcional para uso nos isoladores poliméricos classe 230 kV estudados.

Assim pode-se concluir que a ausência de anéis equalizadores ou o uso de isoladores de vidro associados é totalmente desaconselhável e que, ao contrário do que alegam os fabricantes, os isoladores poliméricos devem ser lavados periodicamente. Como também, fica evidente a necessidade de um bom sistema de equalização de campo elétrico para os isoladores envelhecidos e poluídos.

Os ensaios de análise em laboratório tiraram proveito do ambiente abrigado, e apresentaram resultados experimentais claros. Todavia, resultados colhidos em campo podem não parecer tão nítidos, devido principalmente à influência do vento e da radiação solar nas medições.

Os resultados dos ensaios idealizados para a reprodução de indícios de trilhamento de núcleo mostraram alguma eficiência da metodologia, necessitando de um maior tempo de exposição à alta tensão.

Os ensaios de reprodução do trilhamento de núcleo também demonstraram que a presença de umidade na interface núcleo-revestimento polimérico é um fator de risco, podendo promover o início do processo de trilhamento.

Como motivação para a continuidade do trabalho, sugerem-se o aperfeiçoamento do método de criação do trilhamento de núcleo em laboratório, com resultados mais extensos; a criação de um modelo mais eficiente de eletrodo agudo, que gere um volume menor de descargas corona; maior tempo de aplicação de tensão, etc.

Os ensaios mostraram que o aumento da temperatura está relacionado com a intensidade do campo elétrico nos isoladores poliméricos e que a temperatura também é o fator de aceleração da degradação. Assim, várias configurações de anéis equalizadores, condições de distribuição de campo e potencial elétrico foram simuladas, permitindo uma compreensão mais abrangente do fenômeno e dos fatores que o influenciam. Por fim, um anel equalizador otimizado para aplicação em isoladores poliméricos classe 230 kV foi projetado, construído e avaliado, visando prolongar a vida útil dos isoladores. Conclui-se assim, que os objetivos deste trabalho foram atingidos.

Durante o decorrer do curso de mestrado foram publicados ou aceitos os seguintes artigos relacionados com o trabalho desenvolvido:

1. “Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2006”, realizado em Campina Grande, Paraíba, em junho de 2006. O título do trabalho foi “**Propagação de Calor em Isolador Polimérico**”;
2. “15th International Symposium on High Voltage Engineering”, a ser realizado em Ljubljana, Eslovênia, em agosto de 2007. O título do trabalho foi “**Tracking and Erosion in Polymeric Insulators’ Core**”;

3. “15th International Symposium on High Voltage Engineering”, a ser realizado em Ljubljana, Eslovênia, em agosto de 2007. O título do trabalho foi “**Polymeric Insulator Monitoring with Corona Detector**”;
4. “15th International Symposium on High Voltage Engineering”, a ser realizado em Ljubljana, Eslovênia, em agosto de 2007. O título do trabalho foi “**Study of the Propagation of Heat in Polymeric Insulators**”.
5. “XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica”, a ser realizado no Rio de Janeiro, em outubro de 2007. O título do trabalho foi “**Desempenho de Isolador Polimérico por Medição de Temperatura e Corona**”;
6. “XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica”, a ser realizado no Rio de Janeiro, em outubro de 2007. O título do trabalho foi “**Trilhamento e Erosão em Núcleos de Isoladores Poliméricos**”;

# Referências Bibliográficas

ABENDE. **Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos e Inspeção - Termografia**. Disponível na internet via URL: <http://www.abende.org.br/termografia.html>. Arquivo capturado em janeiro de 2006.

BARTNIKAS, R.; McMAHON, E. J. **Engineering Dielectrics - Corona Measurement and Interpretation**. vol. I, Philadelphia: ASTM Special Technical Publication STP 669, 1979.

COMSOL AB. **Electromagnetics Module User's Guide for FEMLAB 3**. © COPYRIGHT 1994–2004 by COMSOL AB. All rights reserved

CONNOR, P.; JONES, J. P.; LLEWELLYN, J. P.; LEWIS, T. J. **A Mechanical Origin for Electrical Ageing and Breakdown in Polymeric Insulation**. IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Västerås, Sweden. June 22 25, 1998.

COSTA, E. G. **Ruptura Elétrica em Resina Epoxi**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1981.

De NIGRIS. **CESI research activities in the field of corona visualisation**. Third UV Inspection User's Group Meeting. Orlando, Florida, USA. February 11-13, 2004.

EPPERLY, R.A.; HEBERLEIN, G.E.; EADS, L.G. **Thermography, a tool for reliability and safety**. Industry Applications Magazine, IEEE, Volume: 5, Issue: 1, Jan.-Feb. 1999. Pages: 28 – 36.

FLIR; **Infrared Detection for the Predictive Maintenance Industry**. Disponível na internet via URL: <http://www.flirthermography.com/industries/industry/1001/>. Arquivo capturado em janeiro de 2006.

FONTGALLAND, G.; SILVA, E. M.; BEZERRA, J. M. B.; NERI, M. G. G.; DO VALLE, R. R. M.; DE MELO, M. A. B. **On the behavior of Electromagnetic interference measured from glass insulator**. The 10th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, 2004, Winnipeg, Manitoba, Canada. p. 301 – 304. ISBN-0-9692563-9-6.

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

HALL, J. F. **History and Bibliography of Polymeric Insulators for Outdoor Applications**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993.

HUEBNER, K.H.; THORNTON, E.A. **The finite element method for engineers**. 627 p. New York: John Wiley, 1995.

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

KREUGER, F.H. **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment.** Butterworth & Co. (Publisher) Ltd, 1989.

LEWIS, T. J. **Interfaces and Nanodielectrics are Synonymous.** Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Volume 2, 5-9 July 2004 Page(s):792 - 795 Vol.2.

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.

LINDNER, M.; ELSTEIN, S.; LINDNER, P.; TOPAZ, J.M.; PHILLIPS, A.J. **Daylight corona discharge imager.** High Voltage Engineering Symposium. (Conf. Publ. No. 467), Volume: 4, 23-27 Aug. 1999 Pages: 349 - 352.

LINDNER, M. **Third UV Inspection User's Group Meeting.** Orlando, Florida, USA. February 11-13, 2004.

MORITA, M.; WU, K.; KOMORI, F.; SUZUOKI, Y. **Investigation of electrical tree propagation from water tree by utilizing partial discharge and optical observation.** Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. June 1-5, 2003, Nagoya.

NERI, M. G. G. **Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

NATTRASS, D. A.. **Partial discharge measurement and interpretation.** IEEE Electrical Insulation Magazine, IEEE, Volume 4, May-June 1988. Pages 10-23.

NELSON, J. **The ABCs of FEA,** Disponível na internet via URL: <http://www.compositesworld.com/ct/issues/2006/October/1458>. Arquivo capturado em novembro de 2006.

PEREIRA, L. A. **Método dos Elementos Finitos 2D Aplicado ao Eletromagnetismo,** Disponível no sítio da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul na internet via URL: [http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/fem2000/FEM2D\\_Eletromagnetismo.pdf](http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/fem2000/FEM2D_Eletromagnetismo.pdf), 2004. Arquivo capturado em novembro de 2006.

PEREIRA, O. J. B. A. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos na Análise de Problemas Planos de Elasticidade.** Disponível no sítio da Universidade Técnica de Lisboa na internet via URL: <http://www.civil.ist.utl.pt/ae2/IMEFAPPE.pdf>, 2005. Arquivo capturado em novembro de 2006.

RODURFLEX. **Hihg-Voltage Insulators.** Disponível na internet via URL: <http://www.lappinsulator.com/downloadcenter/catalogs.asp>. Arquivo capturado em dezembro de 2005a.

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

SADIKU, M. N. O. **A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems.** IEEE Transactions on Education, Vol. 32, No. 2, May 1989.

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.

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.

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.

TETEX Information No. 21 **Partial Discharge Measuring Techniques.** TETEX AG Instruments, Zürich, 1984.

TIPLER, P. A. **Física.** Editora Guanabara Koogan S.A. Volume 4. 3º edição, 1995.

TURNER, M. J., CLOUGH, R. W., MARTIN H. C., TOPP, L. C. **Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures.** Journal of Aerospace Science, 1956.

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.

WANDERLEY NETO, E. T.; COSTA, E. G. DA; MAIA, M. J. A. **Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging.** Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES. Aug. 2006 Page(s):1 - 4

WIKIPEDIA. **Radiação infravermelha.** Disponível na internet via URL: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Infravermelho>. Arquivo capturado em janeiro de 2006a.

WIKIPEDIA. **Radiação Ultravioleta.** Disponível na internet via URL: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Radiação\\_ultravioleta](http://pt.wikipedia.org/wiki/Radiação_ultravioleta). Arquivo capturado em fevereiro de 2007a.

YAMAMOTO, H.; ZHU, Y.; OTSUBOL, M.; HONDA, C.; TAKENOUCI, 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)

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.

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.