

ROSEMERI CRUZ FAGUNDES

**AVALIAÇÃO DE ACESSÓRIOS POLIMÉRICOS DE REDES
COMPACTAS PROTEGIDAS POR MEIO DE ENSAIO DE
MULTIESTRESSAMENTO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Vitoldo Swinka Filho

Curitiba
2008

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos pelo apoio, afeto e confiança, e a todos que de alguma maneira ajudaram na realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Vitoldo Swinka Filho pela orientação segura durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Guilherme Cunha da Silva pelo apoio e aconselhamento durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Dr. Renê Robert pelos conhecimentos transmitidos no dia a dia.

À Dra. Marilda Munaro pela disposição em ceder fotos e materiais.

Aos colegas Walmor, Guilherme, Rafael e Eduardo pelo companheirismo.

Ao Professor Berleze e ao Marcão da secretaria por terem me encorajado a enfrentar mais esta etapa da vida.

Aos amigos Daisy, Cris, Patrícia e Sombrio pela ajuda e humor diários.

Ao meu namorado Rodrigo, o Chinês, pelo carinho, paciência e confiança.

A todos os amigos e amigas do CAHK pelas boas horas vividas.

Agradeço a todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

À Companhia Paranaense de Energia, COPEL, e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, pelo suporte financeiro e viabilidade de execução deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho mostra uma avaliação de acessórios poliméricos de redes compactas protegidas pelo ensaio de multiestressamento e, também, por simulações computacionais. O objetivo destes ensaios e simulações é identificar os defeitos mais comuns, bem como os conseqüentes danos, em isoladores tipo pino e tipo bastão, espaçador losangular e anéis de amarração usados na rede compacta de energia. Foram simulados por intermédio do *software* Comsol Multiphysics® defeitos tais como vazio no interior dos isoladores poliméricos tipo pino, falta de adesão entre o núcleo e a camada polimérica de isoladores poliméricos tipo bastão e vazios no interior de espaçadores poliméricos losangulares. Obtiveram-se valores referentes à distribuição de campo elétrico nesses conjuntos sem e com defeitos, a fim de compará-los. Notou-se que cada defeito responde de forma diferente, mas que pode, de alguma maneira, comprometer o bom funcionamento da rede elétrica. O ensaio de multiestressamento mostrou a resposta de acessórios da rede compacta quando sujeitos a condições de estresses elétrico, térmico, mecânico e ambiental. As condições deste ensaio foram modificadas, procurando otimizar o processo já existente. Pelas inspeções visuais, termografias e ensaios de resistência de isolamento comparou-se em quais acessórios ocorreram incidências de acúmulo salino, trilhamento elétrico, corrente de fuga e queda de resistência de isolamento, buscando assim obter os conjuntos que pior e melhor resistiram aos estresses.

Palavras-chave: Isolador polimérico. Espaçador polimérico. Campo elétrico. Simulação computacional. Multiestressamento.

ABSTRACT

The present work shows the behavior of polymeric equipment used in spacer cable systems through multi stress tests and computational simulations. The main goal of these tests and simulations is to understand the most common faults and the most common effects in pin type and dead-end type insulators, spacers and rings ties used in spacer cable lines. Some imperfections such as, voids inside pin type insulators and spacers, poor adhesion between core and polymeric layer in dead-end insulators were simulated aided by Comsol Multiphysics® program. The electrical field distribution of unfailed and failed accessories were measured and compared. It was observed that each fault presented a different response to electrical field affecting the equipment performance. The equipment behavior was evaluated when submitted to electric, thermal and environmental stress. Visual inspection, thermograph and insulation resistance were carried out to show which of these devices presented salt accumulation, tracking, leakage current and insulation resistance decrease allowing to determine the good or bad performance of everyone.

Key-words: Polymeric insulator. Polymeric Spacer. Electric Field. Computational simulation. Multi stress.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Rede compacta: a) cabo coberto, espaçador e amarração; b) cabo coberto apoiado em isolador polimérico tipo pino; c) isolador de ancoragem	5
Figura 2 - Acessórios da rede compacta: a) espaçador losangular, b) isolador pino, c) isolador bastão, d) anel de amarração	7
Figura 3 - Capacitor de placas paralelas (a) e capacitor com material dielétrico (b)	10
Figura 4 - Material dielétrico formado por dipolos intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo	12
Figura 5 - Dielétrico formado por dipolos intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo \vec{E} , e formação do campo elétrico dos dipolos \vec{E}_d e do campo total interno macroscópico \vec{E}_{int}	12
Figura 6 - Constituintes apolares de um dielétrico sem momentos de dipolo intrínsecos	13
Figura 7 - Dielétrico apolar sujeito a um campo externo não nulo	13
Figura 8 - Descargas parciais em cavidades	15
Figura 9 - Representação de descarga parcial superficial em um material dielétrico polimérico	16
Figura 10 - Representação de arborescência	16
Figura 11 - Distribuição de tensão em isoladores	19
Figura 12 - Simulação computacional para materiais com constantes dielétricas não compatíveis (a) e compatíveis (b)	19
Figura 13 – Fotos de cortes em espaçadores poliméricos mostrando material não uniforme	21
Figura 14 - Configuração utilizada para as simulações do isolador polimérico tipo pino	25
Figura 15 - Pontos fixados no isolador tipo pino	25
Figura 16 - Radiografias de isolador polimérico tipo pino, com bolha centralizada (a) e duas bolhas descentralizadas (b)	26
Figura 17 - Montagem para isolador tipo bastão	27
Figura 18 - Pontos fixados para o isolador bastão	27

Figura 19 - Componentes para a montagem do sistema com espaçador	28
Figura 20 - Pontos fixados para o espaçador	28
Figura 21 - Fotos que mostram a existência de bolhas no interior de espaçadores poliméricos	29
Figura 22 - a) isolador polimérico do fabricante b, b) conjunto espaçador- amarração do fabricante c e c) conjunto espaçador-amarração do fabricante b	30
Figura 23 - Arranjo experimental onde são realizados os ensaios de multiestressamento	31
Figura 24 - Arranjo experimental utilizado para as medidas de resistência de isolamento em espaçadores	32
Figura 25 - Posições das medidas de resistência de isolamento	33
Figura 26 - Distribuição de campo elétrico (v/m) para isolador tipo pino em: a) sem defeitos com $\varepsilon = 3$, b) sem defeitos com $\varepsilon = 5$, c) com bolha centralizada, d) com bolha descentralizada, e) com o pino solto em cima, f) com o pino solto dos lados e g) com borda de água	34
Figura 27 - Gráfico do campo elétrico (V/m) nos pontos fixados para os isoladores tipo pino	36
Figura 28 - Distribuição de campo elétrico (v/m) para isolador bastão: sem defeito (a), com bastão solto da camada polimérica (região da primeira saia) (b)	40
Figura 29 - Gráfico do campo elétrico (V/m) nos pontos fixados para os isoladores tipo bastão	41
Figura 30 - Distribuição de campo elétrico (V/m) para o espaçador sem defeito (a), e com vazio (bolha) (b)	42
Figura 31 - Gráfico do campo elétrico (V/m) nos pontos fixados para os espaçadores	43
Figura 32 - Anéis de amarração do fabricante b com elevada deformação permanente e trilhamento elétrico, após 40 dias	45
Figura 33 - Espaçador do fabricante b. Imagem do berço, após 40 dias, apresentando (a) acúmulo de sal, (b) e (c) trilhamento elétrico e (d) alterações superficiais devido à passagem de corrente de fuga	45
Figura 34 - a) e b): detalhes da ocorrência de alterações superficiais em regiões	

afastadas do berço do espaçador do fabricante b, após 40 dias	46
Figura 35 - Anéis de amarração do fabricante d com pequena deformação permanente e leve trilhamento elétrico, após 40 dias	46
Figura 36 - Detalhe das alterações superficiais ocorridas no espaçador do fabricante c devido a passagem de corrente de fuga no material durante o ensaio de multiestressamento, após 40 dias	47
Figura 37 - Anéis de amarração do fabricante c: nenhuma alteração significativa, após 40 dias	47
Figura 38 - Isolador de pino apresentando acúmulo de sal na região de apoio do cabo coberto, após 40 dias	47
Figura 39 - Documentação fotográfica do ensaio de multiestressamento após 21 dias de ensaio	48
Figura 40 - Disposição dos equipamentos e acessórios do ensaio de multiestressamento no arranjo experimental	50
Figura 41: Termografia de espaçador sem elevações de temperatura (a) e com elevação de temperatura (b)	51
Figura 42 - Termografias, com o sistema de aquecimento desligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 10 dias de ensaio	52
Figura 43 - Termografias, com o sistema de aquecimento desligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 15 dias de ensaio	54
Figura 44 - Termografias, com o sistema de aquecimento ligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 15 dias de ensaio	56
Figura 45 - Termografias, com o sistema de aquecimento desligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 28 dias de ensaio	58
Figura 46 - Termografias, com o sistema de aquecimento ligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 28 dias de ensaio	60
Figura 47 - Termografias, com o sistema de aquecimento desligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de	

multiestressamento, decorridos 40 dias de ensaio	62
Figura 48 - Termografias, com o sistema de aquecimento ligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 28 dias de ensaio	64
Figura 49 - Documentação fotográfica do espaçador do fabricante C (L1-2)	67
Figura 50 - Documentação fotográfica do espaçador do fabricante B (L1-4)	67
Figura 51 - Documentação fotográfica do espaçador do fabricante B (L2-3)	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CAMPO ELÉTRICO (V/m) PARA OS ISOLADORES TIPO PINO	36
TABELA 2 - CAMPO ELÉTRICO (V/m) PARA OS ISOLADORES TIPO BASTÃO	40
TABELA 3 - CAMPO ELÉTRICO (V/m) PARA OS ESPAÇADORES	43
TABELA 4 – RESULTADOS DAS TERMOGRAFIAS	65
TABELA 5 - RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO NOS ESPAÇADORES NOVOS	66
TABELA 6 - RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO, APÓS O ENSAIO DE MULTIESTRESSAMENTO, PARA O ESPAÇADOR DO FABRICANTE C	66
TABELA 7 - RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO, APÓS O ENSAIO DE MULTIESTRESSAMENTO, PARA O ESPAÇADOR DO FABRICANTE B	68

LISTA DE SIGLAS

CAD	- Computer Aided Design
CODI	- Comitê de Distribuição – Setor Elétrico Brasileiro
COPEL	- Companhia de Energia Elétrica do Paraná
EPDM	- Borracha de etileno propileno
HDPE	- Polietileno de alta densidade
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LDPE	- Polietileno de baixa densidade
XLPE	- Polietileno reticulado
L1-1(B)	- Linha 1, espaçador 1, fabricante B
L1-2(C)	- Linha 1, espaçador 2, fabricante C
L1-3(B)	- Linha 1, espaçador 3, fabricante B
L1-4(B/D)	- Linha 1, espaçadores 4, fabricantes B e D
L2-1(C)	- Linha 2, espaçador 1, fabricante C
L2-2(B)	- Linha 2, espaçador 2, fabricante B
L2-3(B)	- Linha 2, espaçador 3, fabricante B
L2-4(B)	- Linha 2, espaçador 4, fabricante B

LISTA DE SÍMBOLOS

C_0	- capacitância inicial
C_d	- capacitância do dielétrico
\vec{E}	- vetor campo elétrico
E_0	- campo elétrico inicial
\vec{E}_d	- vetor campo elétrico produzido por dipolos em um dielétrico
\vec{E}_{int}	- vetor campo elétrico no interior de um dielétrico
\vec{E}_m	- vetor campo elétrico molecular
ε	- permissividade elétrica
ε_0	- permissividade elétrica do vácuo
ε_r	- permissividade relativa
K	- constante dielétrica
q	- carga do capacitor
R	- resistência elétrica
V_0	- tensão inicial
V_d	- tensão aplicada no dielétrico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivo	3
1.3 Apresentação do trabalho	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Rede compacta protegida	5
2.1.1 Acessórios usados na rede compacta	7
2.2 Materiais dielétricos	8
2.2.1 Polarização dos materiais	8
2.2.2 Condução em materiais dielétricos	9
2.2.3 O capacitor de placas planas e paralelas	10
2.2.4 Campo elétrico em meios dielétricos	11
2.3 Mecanismos de envelhecimento elétrico e degradação de materiais poliméricos	14
2.3.1 Descargas parciais internas	15
2.3.2 Descargas parciais superficiais	16
2.3.3 Arborescência elétrica	16
2.3.4 Arborescência em água	17
2.3.5 Trilhamento elétrico e corrente de fuga	17
2.3 Simulação computacional e o <i>software</i> Comsol Multiphysics®	22
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	24
3.1 Simulação computacional	24
3.1.1 Isolador tipo pino	25
3.1.2 Isolador bastão	27
3.1.3 Espaçador losangular	28
3.2 Ensaio de compatibilidade elétrica (multiestressamento)	29
3.2.1 Medida de resistência de isolamento	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Simulações computacionais	34
4.1.1 Isolador tipo pino	34
4.1.2 Isolador tipo bastão	39

4.1.3 Espaçador losangular	42
4.2 Ensaio de compatibilidade elétrica (multiestressamento)	44
4.2.1 Inspeção visual	44
4.2.2 Termografia	50
4.2.3 Medida de resistência de isolamento nos espaçadores novos e após o ensaio de compatibilidade elétrica (multiestressamento)	66
5 CONCLUSÕES	70
6 TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

As redes compactas protegidas surgiram na década de 50, nos Estados Unidos, quando Bill Hendrix desenvolveu um sistema que utilizava cabos cobertos, denominado cabo-espaçador (*spacer cable system*). Este sistema foi desenvolvido para que a rede aérea tivesse uma compactação próxima a encontrada nas redes subterrâneas, possibilitando a utilização de até quatro circuitos na mesma posteação e aumentando a confiabilidade e segurança do sistema de distribuição aéreo [1, 2].

A rede compacta protegida é composta por três condutores cobertos com uma camada de material polimérico apoiados em espaçadores ou em separadores poliméricos e sustentados por um cabo mensageiro de aço. Outros elementos envolvidos na configuração de uma rede aérea compacta protegida são os isoladores poliméricos tipo pino e bastão e os acessórios de amarração (anéis, laços e fios).

O sistema isolante dos equipamentos e acessórios da rede compacta protegida é constituído por materiais poliméricos diversos, como o polietileno entrecruzado (XLPE), polietileno de alta densidade (HDPE), epóxi, silicone, borracha de etilenopropileno com formulação e processamento diferente.

Por não possuírem blindagem metálica e apresentarem campo elétrico não nulo em sua superfície, os cabos utilizados nas redes compactas não são considerados isolados, apenas protegidos ou cobertos. A forma construtiva desses cabos permite que os mesmos fiquem mais próximos uns dos outros, bem como de galhos de árvores, sem risco de curto circuito e propiciando a diminuição das interrupções do fornecimento de energia elétrica. Além da diminuição do túnel de poda, obtém-se uma melhoria na estética e diminuição do número de podas. Em resumo, este tipo de rede apresenta a versatilidade e economia próprias de um sistema aéreo convencional, com a vantagem de compactação e confiabilidade próprias de um sistema utilizando cabos isolados [3].

A geometria dos espaçadores, isoladores e acessórios de fixação tem efeito sobre a distribuição de campo elétrico e no modo como ocorre aprisionamento de contaminantes [4].

Quando em operação a rede compacta protegida está sujeita a estresses múltiplos, tais como variação de temperatura, campo elétrico, solicitações mecânicas e influência do meio, podendo, portanto, apresentar diferentes comportamentos frente às diversas solicitações. A ação individual ou combinada destas solicitações é responsável pelo envelhecimento e degradação dos materiais poliméricos, podendo levar o sistema

isolante à perda de requisitos mínimos de suportabilidade para continuidade de operação.

A suportabilidade dielétrica de uma superfície isolante é substancialmente reduzida quando submetida a determinadas condições climáticas como chuva ou alta umidade. Tal redução pode se tornar mais acentuada quando a superfície isolante é exposta a uma atmosfera poluída. Entende-se como atmosfera poluída, do ponto de vista elétrico, uma atmosfera que num certo período de tempo propicia a formação, sobre a superfície isolante, de uma camada constituída por substâncias que dissolvidas em água produzem soluções condutoras. Não ocorre variação considerável no comportamento dielétrico da superfície se a camada se mantém seca, quando comparada com a superfície limpa. Entretanto, se ocorre um processo de umidificação que dissolva, mas não remova os sais contidos na camada, parcial ou totalmente, pode ocorrer a formação de arcos sobre a superfície iniciando um processo que poderá culminar com uma descarga disruptiva. Além disso, os arcos formados podem gerar ozônio (agente oxidante), sendo este um dos responsáveis pela corrosão da ferragem dos isoladores [5].

O defeito mais comum nos isoladores poliméricos tipo pino é a existência de vazios (bolhas de ar ou trincas). Isoladores poliméricos tipo pino estão sendo cada vez mais utilizados e ganhando uma fatia do mercado de componentes elétricos devido às suas vantagens em relação aos isoladores tradicionais de vidro ou cerâmicas, como por exemplo, baixo peso, alta resistência mecânica, melhor resistência ao vandalismo, melhores resistência às condições de poluição em ambientes úmidos e melhor desempenho elétrico. Nestes isoladores pode haver a presença de vazios na estrutura polimérica originados pela formação de bolhas de ar durante o processo de injeção do polímero. Podem ainda aparecer trincas ocasionadas pela fadiga devido aos estresses mecânicos e térmicos causados durante a operação ou pela má colocação de massa de fixação no isolador. O campo elétrico aplicado e a existência de condições adequadas, como a pressão do gás no interior do vazio, propiciam a ocorrência de descargas parciais dentro do defeito. A ocorrência contínua de descargas parciais no interior desses defeitos forma caminhos condutores no polímero conhecidos como arborescência elétrica, os quais levarão o material à ruptura elétrica. O isolador danificado pode levar ao desligamento da linha, gerando custos de manutenção com a reposição desses componentes e o aumento do tempo interrupção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores [6].

1.1 Motivação

Os fatores que motivaram este trabalho foram:

- necessidade do desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação e a qualificação de conjuntos espaçador-amarração utilizados em redes compactas protegidas. A metodologia atualmente utilizada está baseada somente na inspeção visual destes materiais;
- estudo da distribuição de campo elétrico em isoladores tipo pino e bastão, e espaçadores, em bom estado e com defeitos para identificar regiões onde o campo elétrico é mais intenso. As determinações dos valores máximos de campo elétrico são importantes na caracterização dos pontos críticos de degradação.

1.2 Objetivo

Os objetivos deste trabalho são:

- propor uma nova metodologia para avaliação de conjuntos espaçador-amarração;
- avaliar isoladores poliméricos tipo pino e tipo bastão e espaçadores poliméricos para verificar áreas de concentração de campo elétrico, por meio de simulação computacional.

1.3 Apresentação do trabalho

No primeiro Capítulo está apresentada a Introdução, mostrando o histórico e o estado atual da rede compacta protegida e seus componentes.

No Capítulo 2 está apresentada a Revisão Bibliográfica. Está apresentada a rede compacta protegida, bem como os equipamentos e materiais que a constituem. Os principais mecanismos de envelhecimento responsáveis pela redução da vida útil dos materiais isolantes são abordados. Finalizando o capítulo estão apresentadas as vantagens da utilização da simulação computacional pelo *software* Comsol Multiphysics®.

No Capítulo 3 está mostrada a metodologia experimental, a qual foi dividida em duas partes: simulação computacional e ensaio de multiestressamento.

A apresentação dos resultados e discussão está contida no Capítulo 4, o qual também foi dividido em duas partes: simulação computacional e ensaio de multiestressamento. Está, também, apresentada a nova metodologia desenvolvida para avaliação dos conjuntos espaçador-amarração.

No Capítulo 5 estão apresentadas as conclusões e, por fim, no Capítulo 6 os trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Rede compacta protegida

No Brasil a maior parte da energia elétrica é distribuída por meio de redes aéreas. Existem dois tipos de redes aéreas primárias utilizadas: a convencional e a compacta protegida. A rede aérea convencional utiliza condutores nus apoiados sobre isoladores em cruzetas de madeira. Este tipo de rede apresenta saturação tecnológica tanto em confiabilidade quanto em relação à preservação do meio ambiente [1, 7]. A rede compacta protegida é uma rede aérea de distribuição de energia elétrica instalada em postes nas vias públicas e composta basicamente de três condutores cobertos com uma camada de material isolante polimérico, sustentados por um cabo de aço por meio de espaçadores, também de material polimérico. Os cabos cobertos são fixados aos espaçadores por intermédio de acessórios de amarração. O cabo mensageiro, que serve de sustentação do conjunto de espaçadores e cabos cobertos é, por sua vez, fixado aos postes por meio de uma ferragem denominada braço suporte L [7]. Na cruzeta dos postes os cabos são apoiados em isoladores poliméricos tipo pino. Na Figura 1 estão apresentados os equipamentos e acessórios que compõem uma rede compacta protegida.

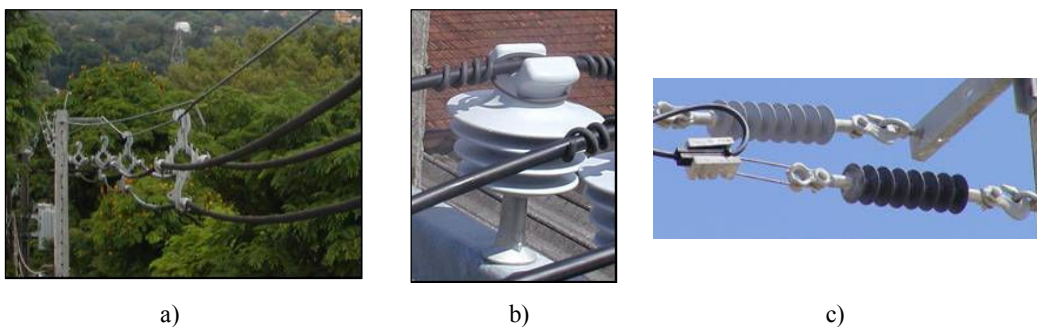


Figura 1 - Rede compacta: a) cabo coberto, espaçador e amarração; b) cabo coberto apoiado em isolador polimérico tipo pino; c) isolador polimérico tipo bastão

Os materiais poliméricos utilizados na cobertura dos cabos são o polietileno reticulado (XLPE) e o polietileno de alta densidade (HDPE), podendo ser encontrados cabos com cobertura em dupla camada (camada interna em polietileno de baixa densidade, LDPE, e externa em HDPE). Para os espaçadores e isoladores de pino o material mais utilizado é o HDPE. Nos isoladores tipo bastão os materiais mais utilizados são o silicone e a borracha de etilenopropileno (EPR). Além dos espaçadores

e isoladores, outros elementos envolvidos na configuração de uma rede compacta protegida são os acessórios de amarração (anéis, laços e fios) geralmente manufacturados com material polimérico de constante dielétrica próxima a do polietileno, para evitar a ocorrência de concentração de campo eléctrico. Alguns materiais utilizados nos acessórios de amarração, particularmente nos anéis, são o silicone e o EPR [2, 8, 9, 10].

A rede compacta protegida tem se mostrado uma boa solução para o convívio harmonioso entre os cabos de energia eléctrica e a arborização de vias públicas, sendo a solução mais económica para atender as diretrizes ecológicas vigentes. O fato dos condutores serem cobertos por uma camada de material isolante permite que eles possam ficar mais próximos uns dos outros e também de galhos de árvores, sem o risco de provocar curto-circuito em caso de toque de galhos ou entre condutores. Isso resulta na compactação da rede eléctrica, que passa a ocupar um espaço bastante reduzido e também na menor agressão às árvores devido a poda [2, 3, 4].

Outro fato importante é que esta rede pode usar os mesmos acessórios e as mesmas técnicas construtivas, operacionais e de manutenção da rede aérea convencional. Isto possibilita que o custo da rede compacta protegida seja menor em relação a rede subterrânea e a rede aérea com cabos isolados [11]. A rede convencional com cabos nus pode ser transformada em uma rede compacta protegida, usando-se o mesmo traçado e quase a totalidade da posteação existente, diminuindo a necessidade de obras civis. Ainda, a desmontagem da rede antiga e a construção da nova podem ser feitas em etapas, com desligamento programado de curta duração em cada trecho, diminuindo o transtorno à população. Assim, o custo de substituição é menor que a construção de uma rede eléctrica nova. Um levantamento realizado pela COPEL, concessionária de energia eléctrica do Estado do Paraná, sul do Brasil, mostrou que há uma redução nos custos de manutenção na ordem de 70% em comparação com a rede convencional, considerando manutenção corretiva e preventiva da rede e o serviço de poda das árvores. Ainda, observou-se uma redução de 75% da interrupção no fornecimento de energia eléctrica com relação à rede convencional. Com relação aos custos de construção, a rede compacta protegida custa 1,8 vezes mais que a rede convencional com cabos nus, enquanto que a construção da rede subterrânea é em média 15 vezes maior [7].

2.1.1 Acessórios usados na rede compacta

Na construção da rede compacta protegida são necessários acessórios para fixação, separação e conexão dos cabos e, também, para a proteção de certos pontos vivos da rede (pontos que podem ficar sem cobertura polimérica isolante). Os materiais normalmente usados na fabricação dos acessórios são polímeros compatíveis com os dos cabos, sendo algumas vezes constituídos do mesmo tipo de polímero. São acessórios da rede compacta protegida os espaçadores poliméricos, isoladores poliméricos e o anel de amarração [7].

Os espaçadores têm como função manter o limite de separação entre os cabos. Normalmente confeccionado em HDPE, possui dois formatos para adaptação em pontos diferentes da rede, losangular e vertical. Na Figura 2a está ilustrado um espaçador losangular. Os isoladores têm a finalidade de isolar eletricamente um corpo condutor de outro corpo qualquer. Numa rede compacta protegida pode-se encontrar dois tipos de isoladores poliméricos: tipo pino (Figura 2b) ou tipo bastão, (Figura 2c).

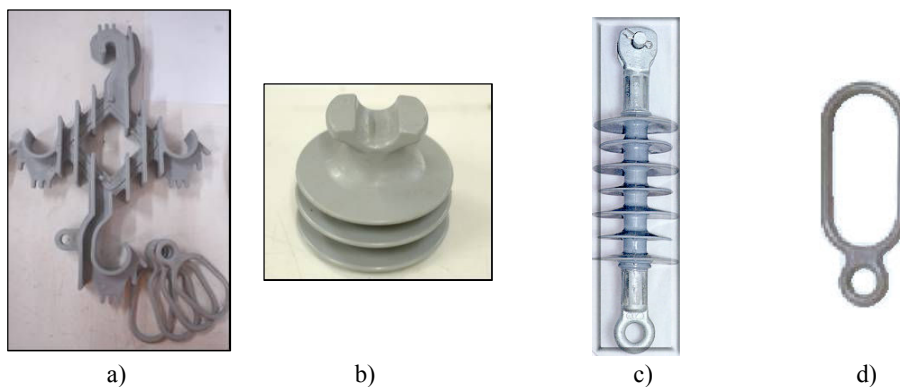


Figura 2 - Acessórios da rede compacta: a) espaçador losangular, b) isolador pino, c) isolador bastão, d) anel de amarração

O isolador tipo pino polimérico é um isolador dotado de orifício rosqueado e provido de pino, constituído por um único corpo isolante e que para fixação dos cabos cobertos requer o uso de amarrações externas. A parte externa (saias) é destinada a aumentar a distância de escoamento. Normalmente é confeccionado em HDPE [12]. Já o isolador bastão é constituído por três partes principais: o bastão ou núcleo de fibra de vidro, que tem por finalidade resistir aos esforços mecânicos provenientes do condutor; o revestimento de borracha, que tem propriedades isolantes e protege o núcleo da ação dos agentes externos mais hostis e impõe o isolador, pelas suas saias, às distâncias

elétricas necessárias para o seu bom funcionamento; e os terminais, que são metálicos e têm a finalidade principal de realizar as conexões isolador/condutor e isolador/estrutura de sustentação. O anel de amarração (Figura 2d) é projetado para fixar cabos cobertos e cabos mensageiros instalados em espaçadores verticais e losangulares, e também para amarração de cabos cobertos (15 e 35 kV) instalados em isoladores de pino. Os materiais utilizados são o silicone e o EPR [13, 14].

2.2 Materiais dielétricos

Os materiais dielétricos são definidos e conhecidos por possuírem a propriedade fundamental de se polarizarem quando sujeitos a um campo elétrico, ao passo que os materiais são ditos isolantes por apresentarem uma condutividade suficientemente pequena, para serem empregados na separação de partes condutoras submetidas a uma diferença de potencial elétrico. Esses dois termos, dielétrico e isolante, são muitas vezes empregados como sinônimos, apesar do termo dielétrico ser mais abrangente [15].

2.2.1 Polarização dos materiais

Um material dielétrico ideal é o que não tem cargas livres. Contudo, todos os meios materiais se compõem de moléculas, que, por sua vez, se constituem de entidades carregadas (núcleos atômicos e elétrons); as moléculas do dielétrico são certamente afetadas pela presença de um campo elétrico. O campo elétrico produz uma força que se deve exercer sobre cada partícula carregada, sendo partículas positivas empurradas no sentido do campo e partículas negativas no sentido inverso, de forma que as partes positivas e negativas de cada molécula sejam deslocadas de suas posições de equilíbrio em sentidos opostos. Estes deslocamentos são, todavia, limitados (na maioria dos casos a frações muito pequenas de um diâmetro molecular) por intensas forças restauradoras formadas pela mudança da configuração de carga na molécula. O efeito total, do ponto de vista macroscópico, é mais facilmente visualizado como um deslocamento no dielétrico de toda a carga positiva em relação à carga negativa. Diz-se então que o dielétrico está polarizado.

Um dielétrico polarizado, mesmo eletricamente neutro, produz em média um campo elétrico, tanto em pontos exteriores como no interior do dielétrico. Como resultado, defronta-se com o que parece ser uma situação complexa: a polarização do dielétrico depende do campo elétrico total do meio, porém uma parte do campo elétrico é produzida pelo próprio dielétrico. Além disso, o campo elétrico distante do dielétrico pode modificar a distribuição de cargas livres nos corpos condutores e isto, por sua vez, alterará o campo elétrico dentro do dielétrico. No item 2.2.4 serão apresentados alguns mecanismos de polarização [16].

2.2.2 Condução em materiais dielétricos

O conhecimento dos processos dos mecanismos de condução e ruptura elétrica é fundamental para o emprego de materiais poliméricos sólidos como isolantes elétricos. Os isolantes poliméricos quando submetidos a elevados campos elétricos polarizam-se. Essa polarização é uma forma de ordenamento espacial das partículas eletricamente carregadas em seu interior, sob a ação de um campo elétrico. Tanto a polarização quanto a corrente de condução (corrente que representa o movimento de deslocamento dos portadores de carga num meio neutro) que se estabelecem no dielétrico são causados pelo movimento de partículas eletricamente carregadas. Durante a polarização as cargas ligadas às moléculas da matéria são postas em movimento, no entanto estas cargas não podem deixar os limites da molécula, enquanto a condução é realizada pelo movimento de portadores com cargas livres. A presença de pequenas quantidades de impurezas é que determina a condução, a qual não é atribuída à substância básica do dielétrico. A polarização pode ser vista como o deslocamento elástico de cargas no interior da matéria (corrente de deslocamento). Quando a tensão aplicada é retirada, as cargas tendem a retornar à sua posição inicial. A corrente capacitiva pode existir no dielétrico por um longo período de tempo sob a ação de um campo elétrico alternado [15, 17].

Os estudos experimentais que têm sido desenvolvidos mostram que inúmeros fatores influenciam o processo de ruptura elétrica e podem ser associados não só às impurezas que permeiam um composto isolante, mas, também, à existência de cargas espaciais e, ainda, à morfologia das cadeias poliméricas, ou seja, sua cristalinidade. Como exemplo associa-se a rigidez elétrica do polietileno ao seu grau de cristalinidade,

que diminui com o crescimento das regiões amorfas. No entanto, para a maioria das aplicações as falhas elétricas são influenciadas pelo projeto, impurezas, ambiente de uso e tensão aplicada [15,18].

2.2.3 O capacitor de placas planas e paralelas [19]

Considera-se um capacitor de placas paralelas, existindo vácuo ou ar entre suas placas, como no caso da Figura 3a.

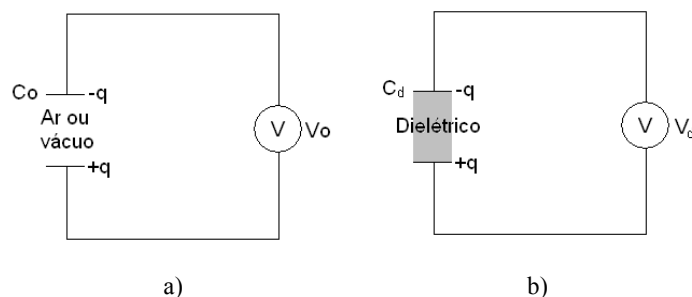


Figura 3 - Capacitor de placas paralelas (a) e capacitor com material dielétrico (b)

Sendo q a carga do capacitor e V_0 a leitura do voltímetro, a capacitância C_0 desse capacitor será:

$$C_0 = \frac{q}{V_0} \quad (1)$$

Supondo agora uma situação um pouco diferente. É introduzido entre as placas do capacitor um material dielétrico qualquer, como mostra a Figura 3b, de modo que a carga permaneça a mesma do caso anterior. Como a carga é a mesma nos dois casos citados pode-se escrever:

$$C_0 V_0 = C_d V_d \quad (2)$$

Mas, a observação das leituras no voltímetro indica que $V_d < V_0$. Então se conclui:

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{C_d}{C_0} \quad (3)$$

donde se tira que:

$$\frac{C_d}{C_0} > 1 \quad (4)$$

ou,

$$C_d > C_0 \quad (5)$$

Então, a capacitância do capacitor contendo um dielétrico é maior que a capacitância do capacitor que contém ar ou vácuo entre suas placas. Esse resultado é geral, qualquer que seja o dielétrico.

Pode-se escrever que,

$$V_0 = KV_d \quad (6)$$

$$E_0 = KE_d \quad (7)$$

$$C_d = KC_0 \quad (8)$$

que informa que a capacitância de um capacitor aumenta de um fator K ao ser introduzido um dielétrico entre suas placas. Esse fator K recebe o nome de *constante dielétrica*, sendo dada por um número adimensional. Define-se $K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, onde ε é a permissividade do material e ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo [16].

2.2.4 Campo elétrico em meios dielétricos [20]

Serão discutidos fisicamente os processos que ocorrem em materiais dielétricos quando submetidos a um campo elétrico externo.

Do ponto de vista microscópico, um dielétrico sob a ação de um campo externo está sujeito a uma combinação de dois fatores: os momentos de dipolo intrínsecos dos seus constituintes podem ser orientados na direção do campo elétrico externo, ou então, se o material não tem dipolos intrínsecos, o campo externo pode provocar o aparecimento de dipolos elétricos induzidos. São apresentados separadamente cada um desses fatores. Quando um campo elétrico externo age sobre um dielétrico formado por constituintes que possuem dipolos elétricos intrínsecos, como ocorre com a água, esses dipolos estão submetidos a ação de forças elétricas, o que causa torques que tendem a orientar os vetores momento de dipolo na mesma direção e sentido que o campo externo aplicado. Esta orientação não é perfeita, tendo em vista que o dipolo é também influenciado pela temperatura do sistema, que tende a perturbar o alinhamento, introduzindo um fator entrópico. Na Figura 4 está apresentada uma representação esquemática para um material dielétrico submetido a um campo elétrico externo.

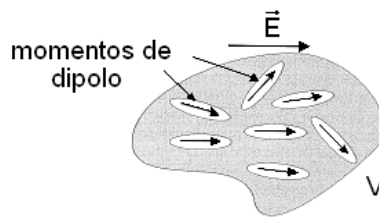


Figura 4 - Material dielétrico formado por dipolos intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo

Como consequência do alinhamento parcial dos vetores momento de dipolo na direção e sentido do campo externo aplicado, aparece um momento de dipolo microscópico resultante, que é a soma dos momentos de dipolo individuais.

Os dipolos, ao se orientarem na direção e sentido do campo elétrico externo, produzem eles próprios um campo elétrico \vec{E}_d macroscópico resultante, que é a soma vetorial dos campos elétricos gerados por cada dipolo. O campo elétrico de um dipolo é mais intenso na região central entre as duas cargas que o compõem, e nessa região o campo elétrico tem sentido oposto ao do vetor momento de dipolo, o que significa que o campo elétrico \vec{E}_d , que é a soma dos campos elétricos dos dipolos, é orientado, principalmente, na direção do campo elétrico externo, mas no sentido oposto, o que diminui o valor do campo elétrico macroscópico dentro do dielétrico. Quando isso ocorre, os próprios dipolos são atingidos, pois sua orientação é devida ao campo elétrico total que age sobre eles, e assim, o campo produzido por eles afeta e é afetado sucessivamente pelo campo externo, até que se chega à situação de equilíbrio entre o campo externo e o campo \vec{E}_d produzido pelos dipolos. Mesmo na situação de equilíbrio, o campo elétrico \vec{E}_{int} macroscópico dentro do dielétrico é menor do que o campo externo. Esta situação é apresentada na Figura 5. O campo elétrico que atua sobre o dipolo individual não é o campo macroscópico \vec{E} ou \vec{E}_{int} , e sim um campo elétrico microscópico molecular \vec{E}_m .

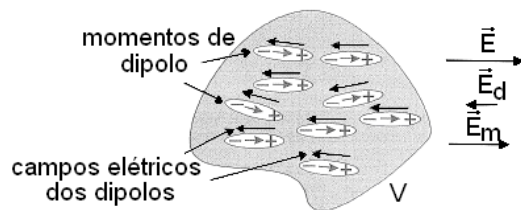


Figura 5 - Dielétrico formado por dipolos intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo \vec{E} , e formação do campo elétrico dos dipolos \vec{E}_d e do campo total interno macroscópico \vec{E}_{int}

Um material dielétrico que não possui momentos de dipolo intrínseco também pode ter a influência de campos elétricos externos. Isso porque, apesar de não ter moléculas ou outros constituintes polares, ele é formado por apolares, nos quais o centro “geométrico” das cargas positivas coincide com o centro das cargas negativas, como na Figura 6, desde que não exista um campo elétrico externo atuando.



Figura 6 - Constituintes apolares de um dielétrico sem momentos de dipolo intrínsecos

Quando expostas a um campo externo, as cargas negativas e positivas, que antes estavam, em média, na mesma posição, estão sob a ação do campo elétrico e da força elétrica por ele causada, de modo que elas se separam por uma certa distância. Essa separação não aumenta indefinidamente, porque também existe a força elétrica entre as cargas, que afinal, é o fator responsável pela existência das moléculas do dielétrico. Assim, é como se cada molécula fosse “esticada”, estando as cargas negativas unidas às positivas por uma “mola” microscópica, como pode se ver na Figura 7.

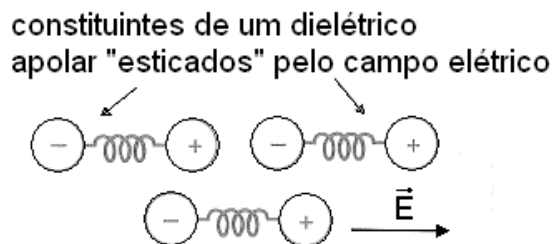


Figura 7 - Dielétrico apolar sujeito a um campo externo não nulo

Quando o campo externo não existe mais, as “molas” fazem com que as cargas voltem a ficar situadas no mesmo lugar. Quanto maior o campo externo, mais distendidas ficam as molas, e se o campo for muito grande, as moléculas são partidas, como ocorre com uma mola submetida a um esforço muito grande, e o material pode ser destruído.

O campo externo induz a formação de dipolos elétricos, chamados por esse motivo de dipolos induzidos. Os vetores momento de dipolo dos dipolos se orientam na mesma direção e sentido que o campo externo, e assim aparece uma polarização, da mesma forma como o caso dos dipolos intrínsecos. De fato, após a formação dos dipolos induzidos, os dois processos se assemelham muito, porque como o campo elétrico pelos dipolos é mais intenso na direção do vetor momento de dipolo, mas no sentido contrário aparece um campo elétrico \vec{E}_d macroscópico devido aos dipolos, orientado na direção contrária à do campo externo, e desse modo, o campo total macroscópico \vec{E}_{int} dentro do dielétrico fica menor do que o campo externo, da mesma forma como ocorre quando os dipolos são intrínsecos. Como em geral as substâncias são formadas por constituintes polares e apolares, o campo elétrico externo aplicado orienta os dipolos intrínsecos na direção e sentido do campo elétrico, além de produzir dipolos induzidos, que também se orientam da mesma forma que o campo externo. Esta orientação de dipolos, todavia, significa que o campo elétrico \vec{E}_d gerado por eles é mais intenso na mesma direção, só que no sentido oposto do campo externo, o que produz um campo elétrico macroscópico \vec{E}_{int} menor do que \vec{E} dentro do dielétrico. Esta é uma descrição qualitativa bastante boa para o comportamento dos dielétricos em presença de um campo elétrico externo, desde que ele não seja muito intenso. Quando ele é, a rigidez dielétrica do material pode ser quebrada e ele passa de dielétrico a condutor.

2.3 Mecanismos de envelhecimento elétrico e degradação de materiais poliméricos

Denomina-se envelhecimento ao processo de mudança não reversível das características isolantes do material que ocorre com o passar do tempo de uso. Os fatores de envelhecimento podem ser internos ou externos e estabelecem seus mecanismos pela conjunção de vários fatores, devido a solicitações das seguintes naturezas, e que podem se dar em conjunto ou separadamente: elétrica, térmica, mecânica e química [21].

2.3.1 Descargas parciais internas

Em dielétricos líquidos e gasosos após a ruptura elétrica e a tensão aplicada ser removida, a mobilidade das partículas do isolante permite que a região que sob tal ação de descarga recupere integralmente sua rigidez elétrica. Nos dielétricos sólidos, ao contrário, a ruptura elétrica representa a destruição do dielétrico na porção onde se realizou. As descargas parciais internas nos isolantes ocorrem devido à existência de microvazios ou à heterogeneidade do material com pontos de elevada condutividade, ou ainda, nas imperfeições das interfaces de isolantes dispostos em camadas, tal como ocorre nos pontos de defeitos nos semicondutores junto ao isolante. Esses defeitos levam à concentração das linhas de campo elétrico nas suas proximidades. Essa concentração de linhas de campo dá início ao processo de descargas parciais que erodem as cavidades no interior do dielétrico até a sua perfuração [15, 22, 23].

Na Figura 8 está mostra esquematicamente como pode se dar a descarga parcial em um dielétrico.

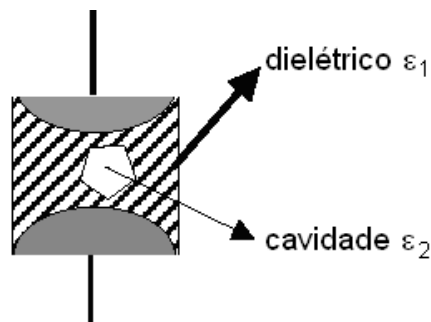


Figura 8 - Descargas parciais em cavidades

Como visto da Equação 7, $E_0 = KE_d$ e $K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$, de onde tem-se:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (9)$$

assim pode-se verificar que a existência de um dielétrico submetido a um campo elétrico levará à concentração do campo elétrico no material na razão inversa das constantes dielétricas. Por exemplo, para $\epsilon_1 = 3\epsilon_0$ e $\epsilon_2 = \epsilon_0$, tem-se $E_2 = 3 E_1$ [15].

2.3.2 Descargas parciais superficiais

Descarga parcial superficial é a descarga que ocorre na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo de um eletrodo para a superfície. Quando o campo elétrico paralelo à superfície excede certo valor crítico, inicia-se o processo de descarga superficial. Assim como as descargas internas, as descargas superficiais ocasionam alterações na superfície iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Estes caminhos condutores conhecidos como trilhamento também podem levar o isolamento à ruptura total. Na Figura 9 está representado um caso típico esquemático onde há uma descarga superficial.

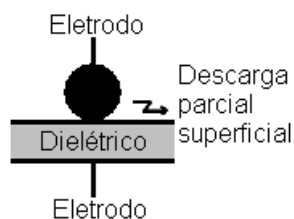


Figura 9 - Representação de descarga parcial superficial em um material dielétrico polimérico

Este tipo de descarga normalmente ocorre em cabos protegidos, em saias de isoladores e no sistema de alívio de barra de geradores [22, 24, 25].

2.3.3 Arborescência elétrica

Este fenômeno de pré-ruptura está associado principalmente à existência de vazios e impurezas no interior da isolação e com a ocorrência de descargas parciais quando o dielétrico está submetido a um campo elétrico. As descargas parciais causam o aquecimento de pontos localizados, conforme já visto. Esse processo de degradação é reconhecido pela formação de canais, a partir do ponto de origem, que apresentam a forma de um arvoredo, como pode ser visto nas representações da Figura 10 [9, 15, 26].

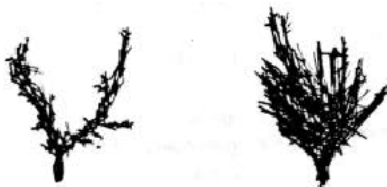


Figura 10 - Representação de arborescência

As arborescências elétricas produzem cavidades em forma de canais, com encaminhamento paralelo ao campo elétrico aplicado, e são resultantes da decomposição do material. Este fenômeno pode ser controlado quando são aprimoradas as técnicas de produção do material isolantes, como a tripla extrusão, limpeza do material e do processamento, e a injeção de aditivos que inibem reações iônicas necessárias ao desenvolvimento da arborescência [9,15, 26].

2.3.4 Arborescência em água

A arborescência em água relaciona-se com a difusão de umidade ou vapor de água pelo dielétrico, comum aos materiais poliméricos que apesar da aparência consistente e da baixa permeabilidade, têm essa característica. Diferente da arborescência elétrica, que apresenta um crescimento rápido levando à ruptura do polietileno em pouco tempo, a arborescência em água tem crescimento lento e a ruptura do material ocorre com seu processo de envelhecimento, em torno de dez anos de vida. A arborescência em água consiste de caminhos filamentosos entre pequenas cavidades, paralelos ao campo elétrico, pelos quais a umidade penetra sob a ação de um gradiente elétrico. A umidade pode estar no estado líquido ou de vapor e com a temperatura de trabalho do dielétrico. Os pontos com água serão os mais quentes e, portanto, submetidos a alta pressão e grande concentração de campo elétrico. Essas condições levam o vapor de água a se difundir a partir do ponto inicial para as proximidades. Pode-se dizer que este fenômeno não é ainda conhecido em detalhes, apesar de serem conhecidos aditivos que conferem alguma resistência a ele [9, 15, 26].

2.3.5 Trilhamento elétrico e corrente de fuga

Os processos naturais de umidificação, oxidação e contaminação das superfícies de isolantes elétricos empregados para uso externo (ao tempo) produzem uma elevada condução de corrente elétrica, com a diminuição da resistividade superficial do material elétrico. A trilha é definida como um caminho condutor permanente formado na superfície do isolante [15, 27].

A circulação de corrente em superfícies com a condutividade aumentada, como por exemplo pela umidade, leva a um aquecimento do local que causa a evaporação da água e conseqüentemente diminui a condutividade e cria regiões secas com valores elevados de temperatura. Durante a repetição dos processos de umidificação e secagem da superfície, pequenos arcos ocorrem entre pontos mais condutores, produzindo a carbonização do material isolante (trilhamento) ou a perda do material (erosão). Esse fenômeno é, portanto, caracterizado pela formação de resíduos carbonosos acompanhados por cintilações luminosas, chamadas corrente de fuga, e leva à deterioração do material isolante com a formação de trilhas [15, 28].

Corrente de fuga é o termo geralmente utilizado para indicar o fluxo de corrente anormal ou indesejada em um circuito elétrico. O crescente depósito condutivo decorrente de poluição que se fixa na superfície dos isoladores propicia o surgimento de caminhos de correntes elétricas também superficiais. Estas correntes são denominadas correntes de fuga, e percorrem o caminho entre o condutor de alta tensão e o potencial de terra. Apesar de estas correntes serem da ordem de algumas dezenas de miliampéres, quando multiplicadas pelo número de isoladores pertencentes a uma zona de alimentação e acrescidas da corrente normal da linha, podem alcançar valores elevados suficientes para acionar os dispositivos de proteção contra sobre-corrente, provocando interrupções no fornecimento de energia elétrica àquela região [29].

Materiais isolantes para uso externo, principalmente quando sujeitos a campos elétricos não uniformes, devem ser avaliados quanto à capacidade de resistir ao trilhamento elétrico. Para tanto diversos ensaios são previstos em normas pertinentes, que permitem selecionar os isolantes que suportam melhor o fenômeno e que sejam mais adequados aos ambientes em que serão aplicados. Outra situação que pode contribuir ou agravar a ocorrência de trilhamento elétrico diz respeito à compatibilidade dielétrica quando diferentes isolantes são empregados em conjunto e estão sujeitos a elevados campos elétricos. Na Figura 11 pode-se verificar o efeito do emprego de diferentes dielétricos e o comportamento do campo elétrico em cada material, como no caso de um cabo coberto sobre isolador [15].

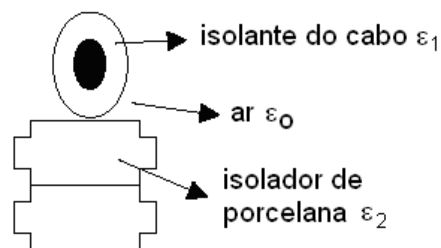


Figura 11 - Distribuição de tensão em isoladores

Segundo viu-se da Equação 3, $\frac{V_0}{V_d} = \frac{C_d}{C_0}$. Na Equação 8 está mostrado que

$C_d = KC_0$, assim pode-se escrever:

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{C_d}{C_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (10)$$

ou então:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (11)$$

Por exemplo, seja um cabo coberto com isolante a base de polietileno ($\varepsilon_1 = 2,3$) apoiado sobre um isolador de porcelana ($\varepsilon_2 = 8$). Os potenciais estarão distribuídos nos dielétricos envolvidos de modo que V_1 (potencial no polietileno) $\cong 4 V_2$ (potencial na porcelana). Este resultado, $V_1 \cong 4 V_2$, indica que a maior parcela da tensão estará sobre a cobertura do condutor, o que pode contribuir para estabelecer as condições do processo de trilhamento elétrico. Caso o material empregado para o isolador seja compatível com o material da cobertura do cabo, ou seja, com a mesma constante dielétrica, as tensões seriam distribuídas equilibradamente entre os isolantes, como mostrado na Figura 12.

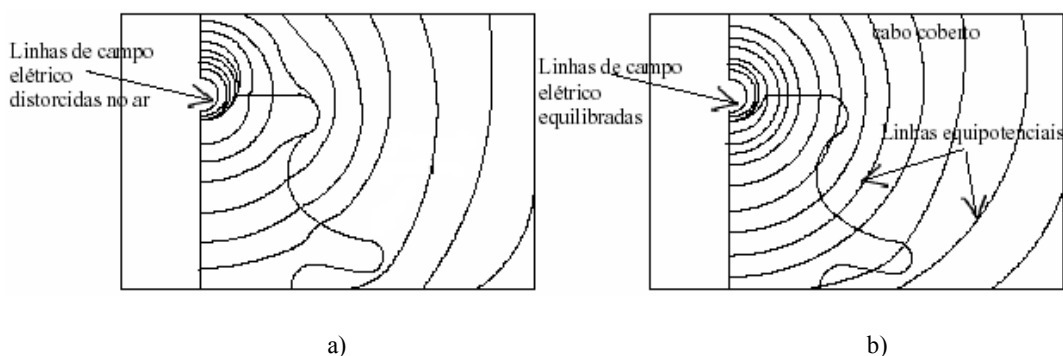


Figura 12 - Simulação computacional para materiais com constantes dielétricas não compatíveis (a) e compatíveis (b)

Nesta Figura estão ilustradas as duas situações, apresentando resultados obtidos por meio de simulação computacional pelo método dos elementos finitos [15, 21].

Como visto, vários processos elétricos podem causar envelhecimento e degradação dos materiais poliméricos. A geometria dos espaçadores, isoladores e acessórios de fixação afeta não só a distribuição de campo elétrico, mas, também, o aprisionamento de contaminantes e poluentes. O sistema aéreo de distribuição está sujeito ainda a solicitações múltiplas como variações de temperatura, solicitações mecânicas e influência do meio podendo, portanto apresentar diferentes comportamentos frente às diversas solicitações [30]. O sinergismo destes fatores degrada os materiais poliméricos e pode causar para o sistema isolante a perda dos requisitos mínimos de suportabilidade para continuidade de operação [31, 32].

O alto valor da resistividade superficial dos polímeros isolantes usualmente empregados em redes compactas limita a circulação de correntes superficiais responsáveis pelo fenômeno de trilhamento. Entretanto, fatores ambientais tais como contaminação superficial, poluentes industriais, sal e outros depósitos, na presença de umidade, podem reduzir drasticamente a resistência superficial da isolação, criando assim condições para fluir correntes entre pontos de diferentes potências [15, 33, 34]. Além do estresse elétrico, outros fatores podem influenciar no envelhecimento superficial de polímeros isolantes, tais como os estresses mecânico, térmico e ambiental, notadamente a incidência de radiação ultravioleta. Os fenômenos de trilhamento e erosão ocorrem nos pontos de contato do cabo com objetos aterrados, tais como galhos de árvores, e nos pontos de amarração do cabo nos isoladores. Além disso, o uso de diferentes materiais nos cabos, isoladores e acessórios em diversos arranjos em uma mesma rede compacta pode acarretar a ocorrência de pontos de concentração de campo elétrico e de acumulação de carga espacial na interface [5, 35, 36, 37].

Assim a distribuição de campo elétrico tem enorme relevância quando se trata de isolamento. Se o campo elétrico for muito intenso em algum ponto do material a rigidez dielétrica deste material pode ser quebrada e ele passa de dielétrico a condutor. As imperfeições simuladas mostram a distribuição não-homogênea de campo elétrico, o que pode provocar sobrecarga de tensão em alguns pontos e assim causar danos à rede de energia.

Os danos causados pelos isoladores poliméricos tipo pino, são, na maioria das vezes, causados por:

- descarga parcial interna devido à heterogeneidade do material (presente também em espaçadores poliméricos), pois o material de que o isolante é constituído difere do material do cabo bem como do ar existente nos vazios, além do material poder ser não homogeneizado no processo de fabricação. Esses defeitos levam à concentração das linhas de campo elétrico nas suas proximidades provocando o processo de descargas parciais que erodem as cavidades no interior do dielétrico até a sua perfuração. A Figura 31 mostra duas fotos de cortes feitos em espaçadores poliméricos que indicam a má homogeneidade do material que os constitui.

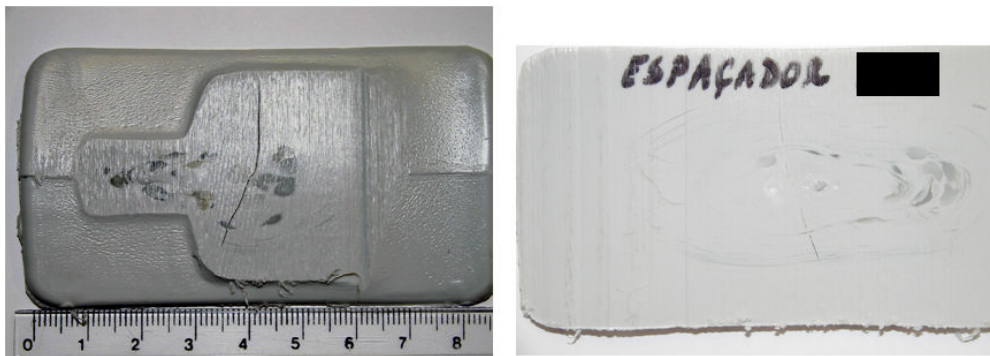


Figura 13 – Fotos de cortes em espaçadores poliméricos mostrando material não uniforme

- descarga parcial superficial devido a campo elétrico que excede valor crítico, causando alterações na superfície seguido de trilhamento elétrico e erosão.
- trincas devido a exposição solar (raios ultravioletas) e altas temperaturas, podendo comprometer as propriedades elétricas e mecânicas do material [38].
- contaminação da superfície devido a impurezas e a presença de água, levando ao processo de arborescência em água. A contaminação da superfície propicia o surgimento de caminhos de correntes elétricas superficiais, as correntes de fuga, que apesar de serem da ordem de algumas dezenas de miliampéres, quando multiplicadas pelo número de isoladores pertencentes a uma zona de alimentação e acrescidas da corrente normal da linha, podem alcançar valores elevados suficientes para acionar os dispositivos de proteção contra sobre-corrente, provocando interrupções no fornecimento de energia elétrica àquela região.

Os danos causados pelos isoladores poliméricos tipo bastão, são, na maioria das vezes, causados por:

- descarga parcial superficial devido a campo elétrico que excede valor crítico, causando alterações na superfície, seguido de trilhamento elétrico e erosão.
- trincas devido à exposição solar (raios ultravioletas) e altas temperaturas podendo comprometer as propriedades elétricas e mecânicas do material. As altas temperaturas podem provocar imperfeições como perda de aderência entre bastão e camada polimérica, ou até a formação de vazios, principalmente quando o material está sujeito a grandes tensões elétricas.
- contaminação da superfície devido a impurezas e a presença de água, levando ao processo de arborescência em água e ao surgimento de correntes de fuga.

Os danos causados pelos espaçadores poliméricos losangulares, são, na maioria das vezes, causados por:

- descarga parcial superficial devido a campo elétrico que excede valor crítico, causando alterações na superfície, seguido de trilhamento elétrico e erosão.
- trincas devido à exposição solar (raios ultravioletas) e altas temperaturas podendo comprometer as propriedades elétricas e mecânicas do material.
- contaminação da superfície, principalmente nos berços, devido a impurezas e a presença de água. Quando em regiões litorâneas os berços desses espaçadores podem acumular, além de outras impurezas, o sal, contribuindo ainda mais para o surgimento de correntes de fuga.

2.3 Simulação computacional e o *software* Comsol Multiphysics®

Nos últimos anos a simulação computacional vem assumindo uma importância cada vez maior como ferramenta de aquisição de conhecimento. A partir de seu uso vários testes com configurações diferentes do problema podem ser realizados sem a necessidade de construção de protótipos, o que economiza tempo e dinheiro. Na simulação desenvolvida nos primórdios da pesquisa operacional, os problemas eram resolvidos por meio da obtenção dos melhores resultados possíveis para cada parte individual do modelo. Entretanto, à medida que a complexidade dos problemas cresceu, surgiu a necessidade de se utilizar uma abordagem mais sistêmica e generalista [39].

Atualmente tem-se vários programas utilizados para simulações computacionais nas diversas áreas da Física, entre eles o Comsol Multiphysics®.

Este *software* apresenta uma interface gráfica que permite a visualização dos desenhos em escala, que podem ser importados de programas CAD, dependendo da complexidade da geometria. A caracterização das superfícies e dos contornos com os valores desejados também é feita na interface principal do programa. Os resultados podem ser observados de várias maneiras, entre elas em forma de linhas equipotenciais ou por mapa de cores. Contudo, para a resolução de problemas é necessário definir a geometria da região para a qual o problema deve ser resolvido, indicam-se as condições de contorno e as características da região. O programa discretiza a região e realiza os cálculos fornecendo os resultados do tipo de simulação desejada. Durante a resolução do problema o *software* gera uma malha composta por elementos triangulares de tamanhos variados, os elementos finitos; quanto mais simples for a geometria do desenho maior serão os triângulos, com o aumento da complexidade da geometria, menores serão os elementos triangulares [40, 41]. A malha pode ser refinada algumas vezes para se obter um resultado mais preciso, no entanto quanto maior o refinamento maior será a exigência computacional, ou seja, o computador precisará de uma alta capacidade de processamento. O programa transforma um conjunto de equações diferenciais parciais em uma forma mais apropriada para fazer uma análise numérica e em seguida, com desempenho elevado, resolvê-las usando o método dos elementos finitos. O programa permite também simulações em 3D, no entanto, mesmo para uma geometria simples é necessária uma alta capacidade de processamento [42].

Diversos pesquisadores estão utilizando este *software* em todo o mundo, nas mais diversas áreas. Alguns estudos são sobre o silicone usado em isoladores [43], a propagação de ondas em cabos de energia [44], o estresse elétrico em buchas de borracha [45] e muitos outros, além da aplicação deste software nos estudos em medicina, química, engenharias e outras áreas.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Simulação computacional

Para identificar pontos críticos de concentração de campo elétrico foram realizadas simulações computacionais, utilizando o *software* Comsol Multiphysics®, em diversos acessórios utilizados na rede compacta protegida, a saber: isolador polimérico tipo pino, isolador polimérico tipo bastão e espaçador polimérico losangular. As simulações estão representadas por uma escala cromática decrescente onde a cor vermelha representa a maior intensidade de campo elétrico. Foram simulados defeitos e situações que ocorrem em campo. Os defeitos foram:

- em isoladores poliméricos tipo pino:
 - sem defeito com $\varepsilon = 3$;
 - sem defeito com $\varepsilon = 5$;
 - com vazio centralizado;
 - com vazio descentralizado;
 - com pino solto na parte superior;
 - com pino solto nas laterais;
 - com água na superfície;
- em isoladores poliméricos tipo bastão:
 - sem defeitos;
 - com falta de adesão entre o núcleo e camada polimérica (região próxima da primeira saia);
- em espaçadores poliméricos losangulares:
 - sem defeitos;
 - com vazio (bolha).

3.1.1 Isolador polimérico tipo pino

Na Figura 14 está mostrada esquematicamente a configuração utilizada para as simulações do isolador polimérico tipo pino.

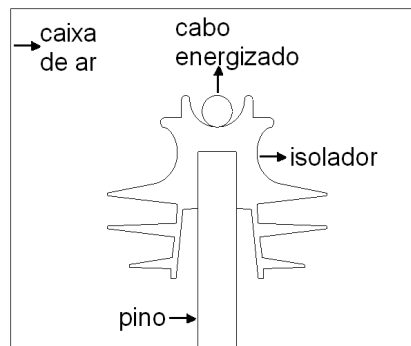


Figura 14 - Configuração utilizada para as simulações do isolador polimérico tipo pino

O material do isolador polimérico tipo pino é o polietileno de alta densidade (HDPE), o qual deve possuir permissividade máxima igual a 3 [46]. A tensão elétrica simulada foi de 8 kV fase-terra (pois a tensão usada em isoladores classe 15 kV é de 13,8 kV entre as fases, mas entre fase e terra é de 8 kV). O pino é metálico e está aterrado. Envolvendo o sistema foi inserida uma caixa com ar de permissividade $\epsilon = 1$, com a função de compor os limites do sistema considerado. Na simulação que envolve água, a superfície com água tem 0,3 mm de espessura. A permissividade da água é de $\epsilon = 80$.

Foram escolhidos 15 pontos para aquisição de valores do campo elétrico para posterior análise e comparação entre eles, como mostrado na Figura 15.

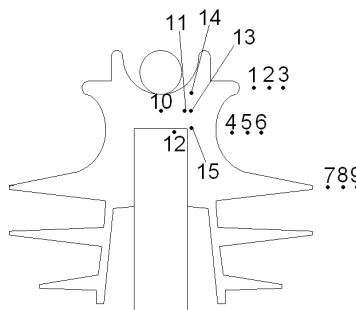


Figura 15 - Pontos fixados no isolador tipo pino

Estes pontos foram escolhidos para poder se ter a distribuição de campo elétrico não só dentro como fora do isolador. Ainda, nos isoladores poliméricos tipo pino a maior incidência de vazios (bolhas) ocorre na parte superior do isolador (próximo dos

pontos 10 a 15), como pode ser visto na Figura 16 que mostra radiografias de isoladores poliméricos com defeitos.

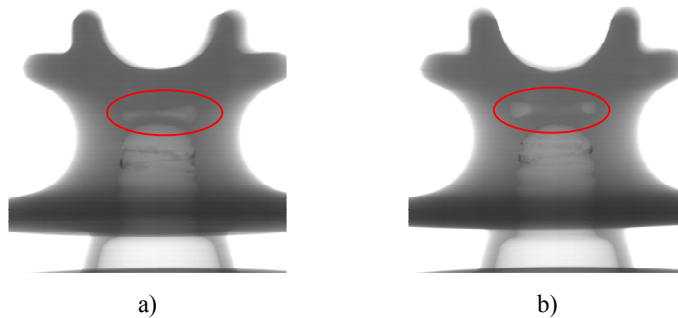


Figura 16 – Radiografias de isoladores poliméricos tipo pino, como bolha centralizada (a) e duas bolhas descentralizadas (b)

Para o isolador tipo pino foram realizadas sete simulações:

- sem defeito com $\varepsilon = 3$. Esta simulação será tomada como padrão, servindo de referência para as demais;
- sem defeito com $\varepsilon = 5$. Pretende-se com esta simulação mostrar os efeitos e motivos de não se usar permissividade elevada para o material do corpo isolante;
- com vazio centralizado. Os vazios encontrados neste tipo de isolador se concentram na região superior do isolador e apresentam diversos tamanhos e formas. Pretende-se, então, simular um vazio considerado grande e com posição centralizada;
- com vazio descentralizado. Nesta simulação será encontrado um vazio menor que no caso anterior e também em outra posição da parte superior do isolador, pois existem vazios de tamanhos e formas diferentes, bem como posições distintas dentro da região de ocorrência dos defeitos;
- com pino solto na parte superior. Defeito este causado pela má colocação de massa de fixação no isolador, podendo deixar um espaço vazio entre o ponto de encaixe do pino ao isolador;
- com pino solto nas laterais;
- com água na superfície. A presença de água (proveniente da chuva ou névoa) nos sistemas de isolamento pode comprometer o seu funcionamento. Nesta simulação serão vistas as mudanças encontradas na distribuição de campo elétrico quando o isolador está molhado.

3.1.2 Isolador polimérico tipo bastão

Os isoladores poliméricos tipo bastão são constituídos de um invólucro polimérico, geralmente silicone ou EPR, com permissividade $\epsilon = 3$, o núcleo com fibra isolante ($\epsilon = 6,5$) e os terminais metálicos. As extremidades dos terminais tem um lado energizado (tensão 8 kV) e outro aterrado. Na Figura 17 está mostrada a configuração utilizada para a simulação do isolador bastão.

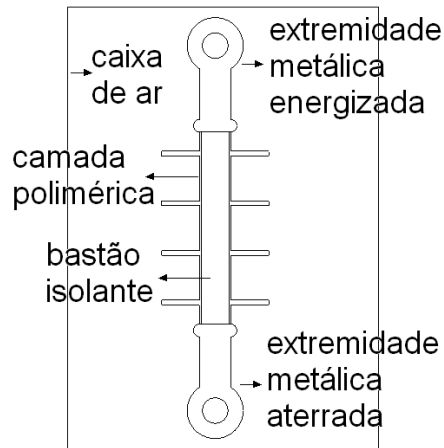


Figura 17 - Montagem para isolador tipo bastão

Para estas comparações foram fixados alguns pontos, os quais estão mostrados na Figura 18.

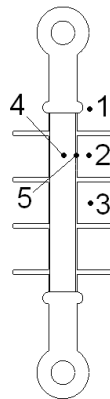


Figura 18 - Pontos fixados para o isolador bastão

Os pontos 1 a 3 estão fora do isolador, o ponto 5 está sobre a saia polimérica e sobre o núcleo está o ponto 4. A distribuição de campo elétrico deve ser homogênea não somente nos pontos que fazem parte do isolador, mas também nos pontos próximos a ele.

Foram realizadas simulações comparativas de distribuição de campo elétrico em isoladores bastão sem e com defeito. As simulações do isolador tipo bastão foram:

- sem defeitos. Esta simulação foi tomada como padrão e servirá de referência para as demais.
- com falta de adesão na região da primeira saia (próxima do ponto 5) entre o núcleo e a camada polimérica (saia). Estresses elétricos e térmicos podem gerar defeitos, como é o caso desta falta de adesão.

3.1.3 Espaçador losangular

O espaçador polimérico losangular é feito em HDPE. Na simulação foi adotada a permissividade $\epsilon = 3$ [47] para o material do corpo do espaçador e $\epsilon = 1$ para o ar. Para esta simulação foi utilizada tensão de 8 kV fase-terra. Na Figura 19 está mostrada a configuração utilizada para a simulação do espaçador.

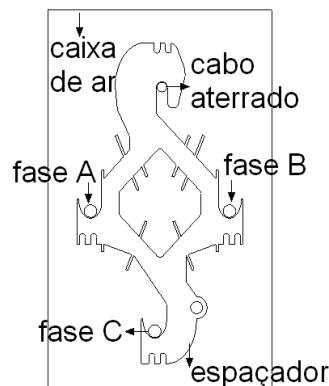


Figura 19 - Componentes para a montagem do sistema com espaçador

Para as simulações foram fixados alguns pontos, os quais estão mostrados na Figura 20.

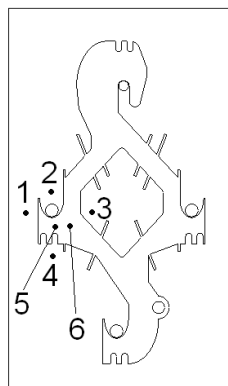


Figura 20 - Pontos fixados para o espaçador

Os pontos 1 a 4 ficam fora do espaçador e os pontos 5 e 6 estão sobre a superfície do espaçador. Estes pontos foram escolhidos porque nos espaçadores usados nas redes geralmente os maiores problemas são encontrados próximos das fases. Assim, com estes pontos pretende-se analisar o campo elétrico próximo aos berços, tanto na superfície do espaçador quanto em suas proximidades. Na Figura 21 estão mostradas três fotos de cortes feitos em espaçadores que comprovam a existência de bolhas de ar no interior dos mesmos.

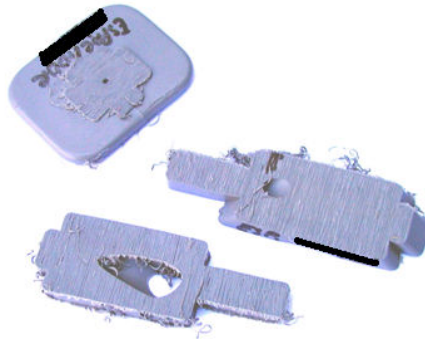


Figura 21 – Fotos que mostram a existência de bolhas no interior de espaçadores poliméricos

As simulações do espaçador polimérico losangular foram:

- sem defeitos. Esta simulação será tomada como padrão e servirá de referência para as demais;
- com vazio (bolha).

3.2 Ensaio de compatibilidade elétrica (multiestressamento)

O ensaio de compatibilidade elétrica, denominado daqui por diante de ensaio de multiestressamento, tem por objetivo avaliar a suportabilidade do conjunto espaçador-amarração frente à aplicação simultânea de estresses múltiplos, entre os quais estão tensão aplicada, temperatura e chuva.

O ensaio de multiestressamento deve ser realizado de acordo com as seguintes condições de teste, conforme a Norma CODI 3.2.18.24, de Especificação de Espaçadores e Amarrações para Rede Compacta de 15 kV, item 6.5.4.2 [48]:

- aplicação de corrente elétrica no cabo para a temperatura da superfície da cobertura de 60 °C;
- ciclos de aspersão de chuva de 5 minutos por 15 minutos sem aspersão;
- aspersão de 1 mm/minuto de água com condutividade de 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

- tensão elétrica de $2U_0$, sendo $2U_0 = 16$ kV (sendo U_0 a tensão fase-terra do sistema), aplicada simultaneamente nas três fases.

O critério utilizado pela norma para aprovação do conjunto espaçador-amarração é que nenhum material do conjunto deve apresentar sinais de trilhamento, erosão, fissuras ou rachaduras após 30 dias de ensaio.

Para o desenvolvimento da nova metodologia para avaliação do desempenho dos equipamentos e acessórios empregados em redes protegidas foi montado um arranjo experimental. Os equipamentos e acessórios utilizados para o teste foram:

- 1 cabo protegido do fabricante A;
- 6 isoladores tipo pino do fabricante B;
- 5 conjuntos espaçador - anéis de amarração do fabricante B;
- 2 conjuntos espaçador - anéis de amarração do fabricante C;
- 1 conjunto espaçador do fabricante B - anéis de amarração do fabricante D.

Na Figura 22 estão mostrados alguns dos acessórios utilizados neste ensaio.

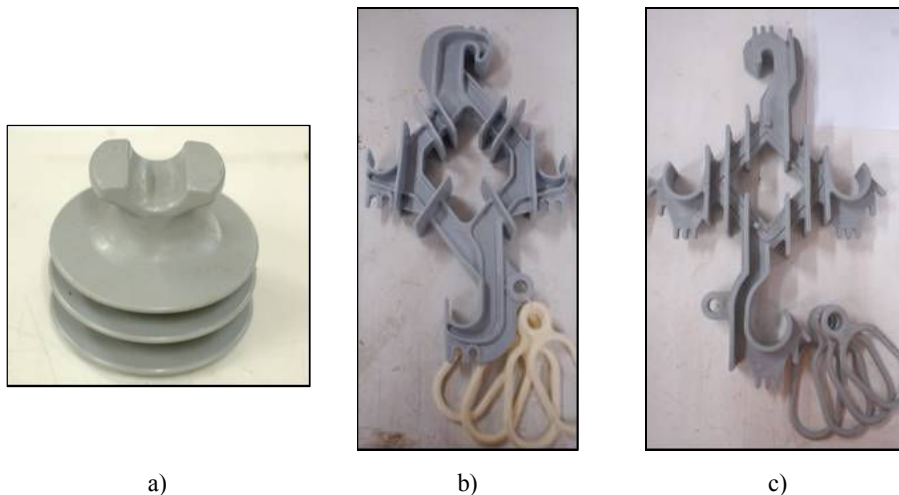


Figura 22 - a) isolador polimérico do fabricante b, b) conjunto espaçador-amarração do fabricante c e c) conjunto espaçador-amarração do fabricante b

O ensaio de multiestressamento foi realizado sob as seguintes condições:

- aplicação de corrente elétrica no cabo para a temperatura da superfície da cobertura de 60 °C;
- ciclos de aspersão de chuva de 5 minutos por 15 minutos sem aspersão;
- aspersão de 1 mm/minuto de água com condutividade de 1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

- tensão aplicada de 22 kV.

Deve ser destacado que o arranjo experimental utilizado (Figura 23) consiste de um sistema trifásico que permite simular uma rede protegida em condições muito próximas das encontradas no campo. Os sistemas de aplicação de corrente e tensão são independentes, o que permite aquecer o cabo sem tensão aplicada, assim como aplicar tensão com o sistema de aquecimento desligado. Além disto, as condições impostas no ensaio são mais severas do que aquelas definidas pela norma CODI.



Figura 23 - Arranjo experimental onde são realizados os ensaios de multiestressamento

A nova metodologia de avaliação consistiu na utilização das seguintes técnicas:

- inspeção visual com documentação fotográfica antes, durante e após o ensaio;

- termografia, utilizando termovisor NEC-THERMO TRACER, modelo TH 5100, durante o ensaio;
- medidas de resistência de isolamento, antes e após o ensaio.

As avaliações foram realizadas decorridos 10, 15, 21, 28 e 40 dias de ensaio.

A termografia é uma técnica que estende a visão humana pelo espectro infravermelho. A termografia hoje tem um papel muito importante na área de manutenção preditiva. Pela sua utilização, é possível eliminar muitos problemas de produção, evitando falhas elétricas, mecânica e fadiga de materiais.

3.2.1 Medida de resistência de isolamento

As medidas de resistência de isolamento em conjuntos espaçador-amarração, novos e retirados do ensaio de compatibilidade dielétrica (multiestressamento), foram realizadas no Laboratório de Dielétricos do LACTEC. O arranjo experimental para realização destas medidas está mostrado na Figura 24.



Figura 24 - Arranjo experimental utilizado para as medidas de resistência de isolamento em espaçadores

O equipamento utilizado para as medidas de resistência de isolamento foi um medidor de altas resistências, marca Hewlett Packard, modelo 4339A. As medidas foram realizadas em ambiente controlado (temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60 \pm 2\%$) e com a amostra inserida em gaiola de Faraday para evitar interferências eletromagnéticas na medida. Foi aplicada tensão de 500 V DC, em cinco posições distintas, como mostrado na Figura 25.

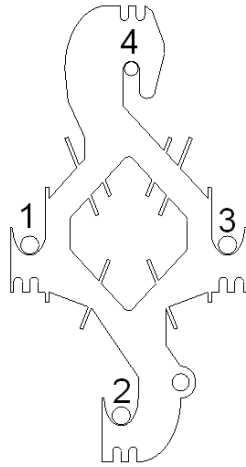


Figura 25 - Posições das medidas de resistência de isolamento

Estas medidas foram denominadas 1-2, 2-3, 3-4, 4-1 e 2-4, isto é, entre fase-fase e entre fase-mensageiro, durante 60 segundos. Terminado o período de aplicação de tensão a leitura foi efetuada e registrada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

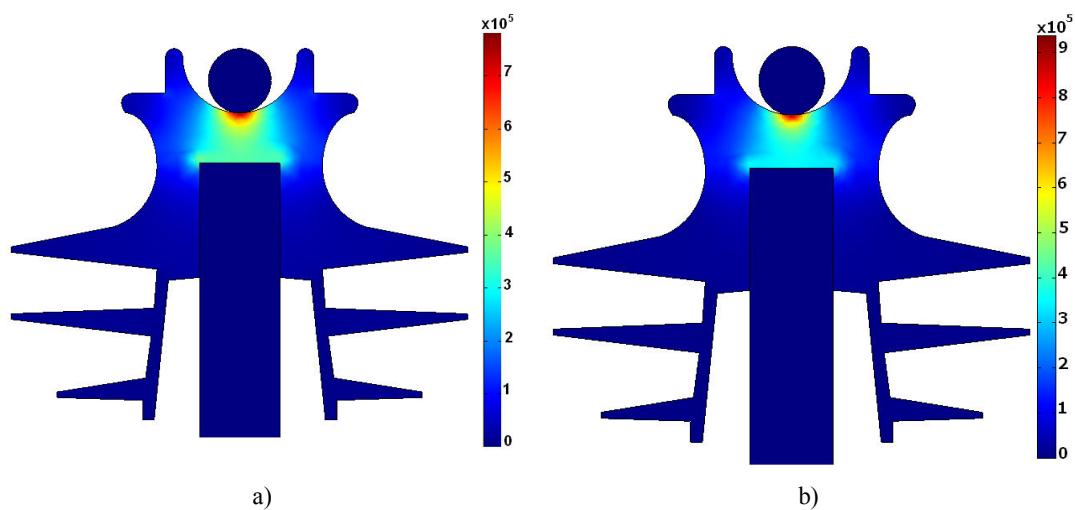
4.1 Simulação computacional

Serão apresentados aqui os resultados das simulações computacionais realizadas para o isolador polimérico tipo pino, isolador polimérico tipo bastão e espaçador polimérico losangular.

4.1.1 Isolador polimérico tipo pino

Na Figura 26 estão mostradas as simulações realizadas para o isolador polimérico tipo pino. São elas:

- 26a) isolador polimérico tipo pino sem defeito com $\varepsilon = 3$ (isolador a);
- 26b) isolador polimérico tipo pino sem defeito com $\varepsilon = 5$ (isolador b);
- 26c) isolador polimérico tipo pino com vazio centralizado (isolador c);
- 26d) isolador polimérico tipo pino com vazio descentralizado (isolador d);
- 26e) isolador polimérico tipo pino com pino solto na parte superior (isolador e);
- 26f) isolador polimérico tipo pino com pino solto nas laterais (isolador f);
- 26g) isolador polimérico tipo pino com água na superfície (isolador g).



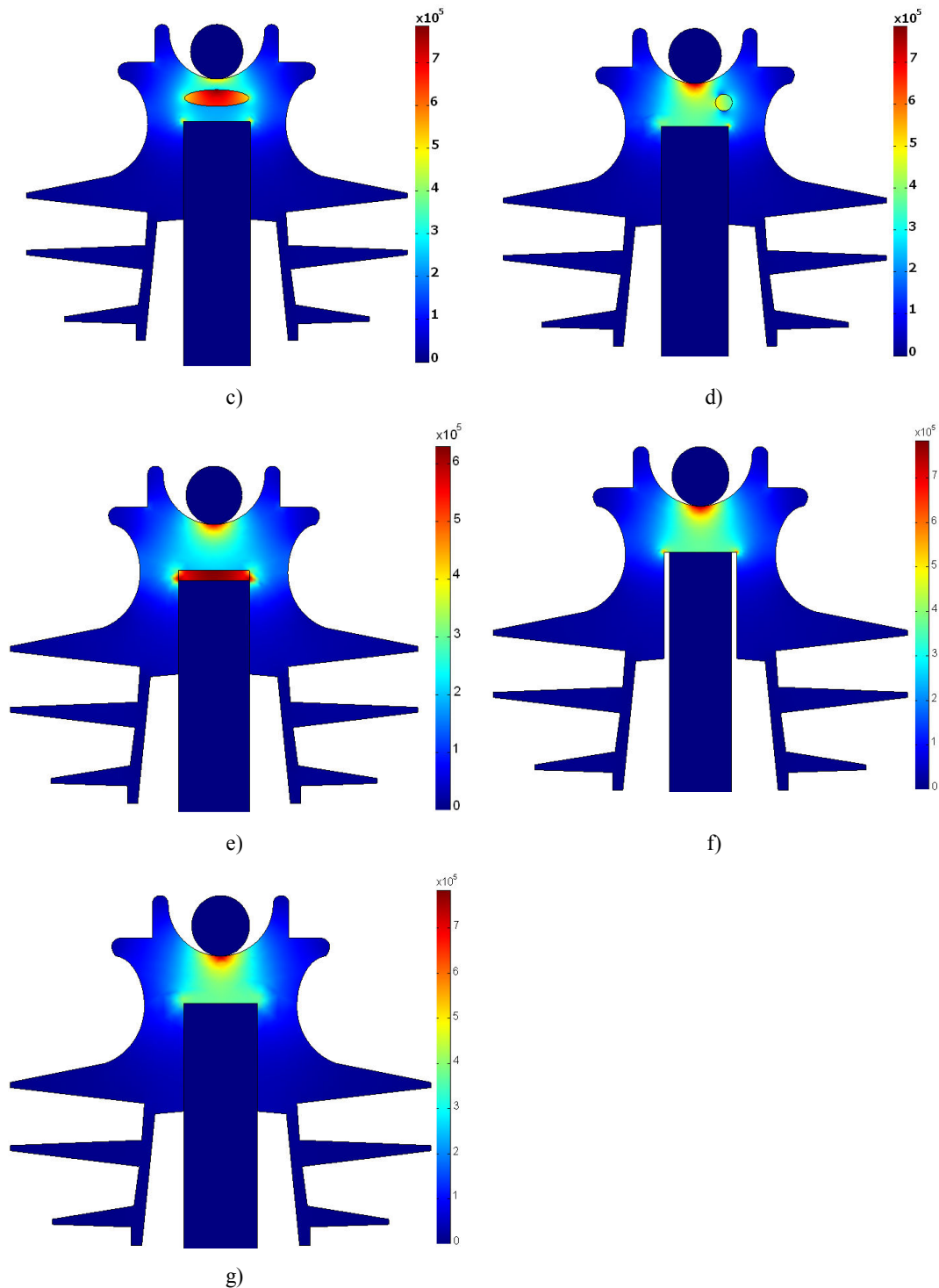


Figura 26 - Distribuição de campo elétrico (v/m) para isolador polimérico tipo pino em: a) sem defeitos com $\epsilon = 3$, b) sem defeitos com $\epsilon = 5$, c) com vazio centralizado, d) com vazio descentralizado, e) com o pino solto na parte superior, f) com o pino solto nas laterais e g) com água na superfície

Na TABELA 1 estão mostrados os valores do campo elétrico (V/m) nos pontos específicos das simulações para o isolador polimérico tipo pino.

TABELA 1 - CAMPO ELÉTRICO (V/m) PARA OS ISOLADORES TIPO PINO

Pontos	Isolador a	Isolador b	Isolador c	Isolador d	Isolador e	Isolador f	Isolador g
1	38.011	40.209	37.975	37.503	35.856	35.903	35.745
2	29.750	32.316	30.126	30.244	28.807	28.593	28.688
3	23.876	26.381	24.216	23.684	23.180	22.404	23.664
4	94.087	94.420	93.428	92.716	90.746	87.994	72.377
5	63.374	65.432	62.366	62.586	60.909	58.359	52.436
6	45.393	48.471	45.305	45.980	44.257	43.024	40.848
7	25.383	30.792	25.456	25.442	25.208	23.834	31.088
8	19.532	22.907	19.614	19.541	19.348	18.609	22.910
9	15.490	17.813	15.469	15.556	15.465	14.902	17.793
10	350.541	310.398	590.259	349.533	224.044	325.580	346.006
11	271.232	239.599	459.701	334.835	185.154	256.592	271.404
12	0	0	0	0	627.793	0	0
13	220.405	196.847	247.959	248.520	163.442	206.586	216.308
14	133.027	119.218	132.925	129.814	109.161	123.081	132.989
15	431.117	371.179	563.392	402.382	287.321	492.272	456.797

Na Figura 27 está mostrado o gráfico do campo elétrico (V/m) nos pontos fixados para os isoladores tipo pino.

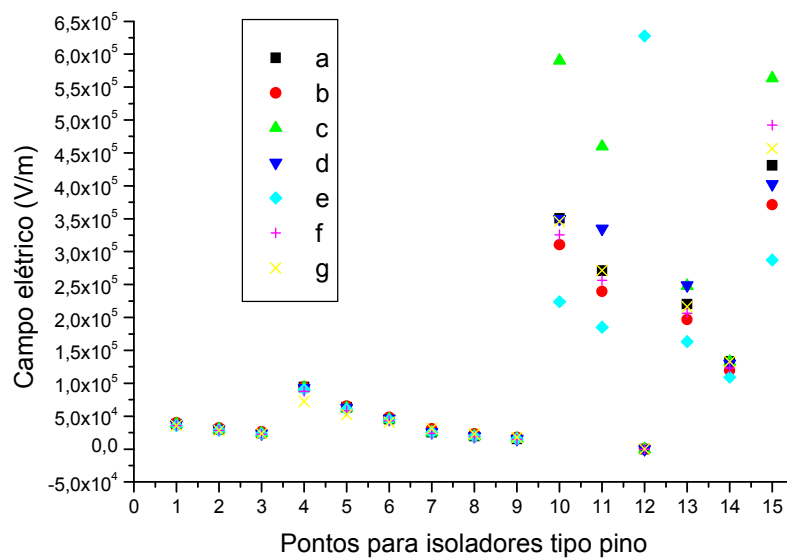


Figura 27 - Gráfico do campo elétrico (V/m) nos pontos fixados para os isoladores tipo pino

Serão tomados como referência os valores encontrados para o isolador com permissividade 3, sem defeitos. Por meio das Figuras 25 e 26 e da TABELA 1 será comparado o desempenho de todos os isoladores. Pode-se notar que quanto ao campo elétrico:

Pontos fora do isolador (1 a 9)

- As maiores diferenças de valores de campo elétrico são encontradas no ponto 7 do isolador com permissividade 5 e do isolador com água na superfície (aproximadamente 20% acima do valor de referência), e no ponto 4 do isolador com água na superfície (cerca de 23% abaixo do valor de referência). Os valores encontrados no isolador tido como padrão não são suficientes para romper a rigidez dielétrica do ar (3×10^6 V/m). Mesmo para os isoladores com defeitos este valor de rigidez não é alcançado, mas estas imperfeições podem contribuir para que, ao longo do tempo, o material sofra envelhecimento mais acelerado que o esperado.

Pontos dentro do isolador (10 a 15)

- O isolador com permissividade 5 apresenta todos os valores de campo elétrico abaixo dos valores tomados como referência. De acordo com a Equação 6, $E_0 = KE_d$ e $K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$, ou seja, o campo elétrico no meio dielétrico diminui se ϵ aumenta. É o que se pode constatar com os valores obtidos nas simulações, pois os pontos 10 a 15 ficam dentro do isolador e todos eles apresentam valores de campo elétrico menores no isolador com permissividade 5 do que no isolador com permissividade 3. Também, da Equação 9, tem-se que $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$, ou seja, a existência de um dielétrico submetido a um campo elétrico leva à concentração do campo elétrico no material na razão inversa das constantes dielétricas. Assim é recomendado para acessórios de rede distribuição usar dielétricos com permissividades próximas, buscando a homogeneidade do campo elétrico no sistema ($E_1/E_2 = 1$), desde que, é claro, suporte as exigências elétricas do sistema considerado, evitando dessa maneira possíveis sobretensões em pontos determinados. É o caso do ar ($\epsilon = 1$) com o polietileno ($\epsilon = 3$). No ponto 15

encontra-se a maior diferença de valor de campo elétrico, em comparação com o isolador tido com padrão, aproximadamente 14% abaixo.

- O isolador com vazio centralizado apresenta valores de campo elétrico acima dos valores de referência em praticamente todos os pontos, indicando concentração de campo elétrico na região do vazio, o que pode levar a ocorrência de descargas parciais internas devido à heterogeneidade do material, pois o material de que o isolante é constituído difere do material do cabo bem como do ar existente nos vazios. Esses defeitos levam à concentração das linhas de campo elétrico nas suas proximidades podendo provocar o processo de descargas parciais que erodem as cavidades no interior do dielétrico até a sua perfuração. O ponto 10 está localizado dentro da bolha que contém ar, neste ponto o campo elétrico sobe 68% em relação ao valor do isolador de referência, que mesmo assim não é o suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar, mas que pode contribuir para o envelhecimento do material. O ponto 15 está fora da bolha, mas apresenta campo elétrico aproximadamente 30% acima do valor padrão. Mesmo esse valor não é o suficiente para romper a rigidez dielétrica do material de que o isolador é constituído (22×10^6 V/m), ou seja, este valor não será rompido instantaneamente, mas ao longo do tempo este fato pode contribuir para degradar o material e ocasionar descargas no material.
- O isolador com vazio descentralizado apresenta campo elétrico maior que o valor de referência notadamente no ponto 11 (cerca de 23% acima do valor de referência), onde fica o vazio, indicando a concentração de campo elétrico nesta região da bolha e a distribuição não uniforme de campo elétrico no isolador. Desta maneira, podem ocorrer descargas parciais e posterior ruptura de isolamento.
- O isolador com pino solto na parte superior tem o maior valor de campo elétrico encontrado nas simulações do isolador polimérico tipo pino, que é encontrado no ponto 12, local onde está o vazio causado pelo pino solto. Novamente, nota-se a distribuição não homogênea de campo elétrico no isolador.
- O isolador com pino solto nas laterais tem campo elétrico elevado dos valores de referência somente no ponto 15, ponto próximo ao vazio. Este ponto tem valor de campo elétrico aproximadamente 14% maior que o valor de referência.
- O isolador com água na superfície apresenta maior diferença de campo elétrico no ponto 15 (6% acima do valor de referência), quando comparado com os

valores de referência. A presença de umidade pode reduzir a resistência superficial da isolação, criando assim condições para fluir correntes entre pontos de diferentes potenciais. Correntes superficiais circulando continuamente através do filme condutor podem causar evaporação não-uniforme formando as chamadas bandas secas. Conseqüentemente, o campo elétrico torna-se não-homogêneo, podendo provocar a ocorrência de descargas superficiais que carbonizam o material e iniciam a formação de trilhas elétricas. Com a carbonização aumenta-se a não-homogeneidade do potencial superficial, contribuindo assim para a aceleração do fenômeno de trilhamento elétrico. Quando este fenômeno ocorre sobre uma área limitada do polímero pode suceder a erosão. A contaminação da superfície devido a impurezas e a presença de água podem levar ao processo de arborescência em água. A contaminação da superfície propicia o surgimento de caminhos de correntes elétricas superficiais, as correntes de fuga, que apesar de serem da ordem de algumas dezenas de miliampéres, quando multiplicadas pelo número de isoladores pertencentes a uma zona de alimentação e acrescidas da corrente normal da linha, podem alcançar valores elevados suficientes para acionar os dispositivos de proteção contra sobre-corrente, provocando interrupções no fornecimento de energia elétrica àquela região [5, 35, 49, 37].

4.1.2 Isolador tipo bastão

Na Figura 28 estão mostradas as simulações para os isoladores tipo bastão sem e com os defeitos pré-estabelecidos. São elas:

- sem defeitos;
- com falta de adesão entre o núcleo e a camada polimérica (região próxima da primeira saia).

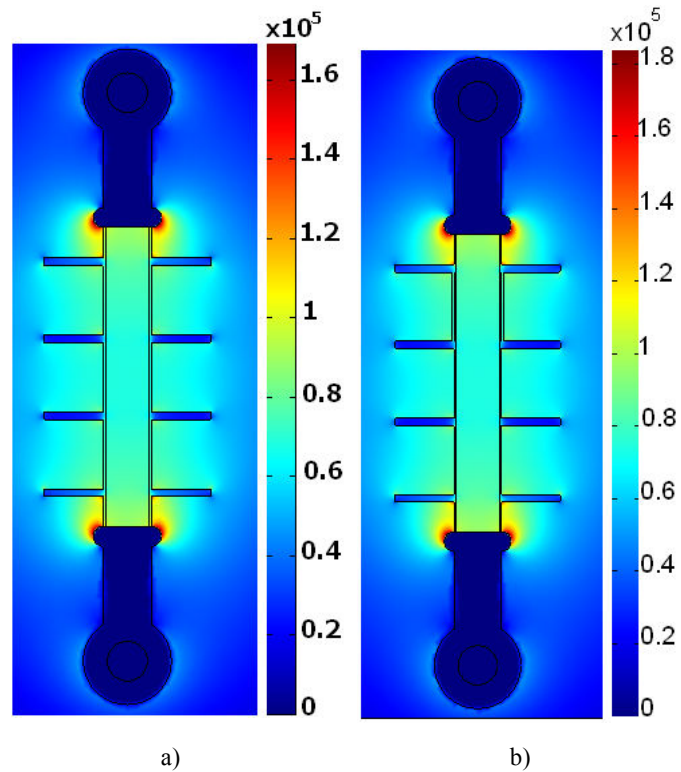


Figura 28 - Distribuição de campo elétrico (v/m) para isolador bastão: sem defeito (a), e com falta de adesão entre o núcleo e camada polimérica (região da primeira saia) (b)

Na TABELA 2 têm-se os valores do campo elétrico (V/m) para o conjunto de pontos dessas simulações.

TABELA 2 - CAMPO ELÉTRICO (V/m) PARA OS ISOLADORES TIPO BASTÃO

Pontos	Isolador bom	Isolador com falta de adesão
1	128.754	127.317
2	43.073	42.992
3	29.920	29.963
4	47.600	47.615
5	47.593	53.719

Na Figura 29 está mostrado o gráfico do campo elétrico (V/m) nos pontos fixados para os isoladores tipo bastão.

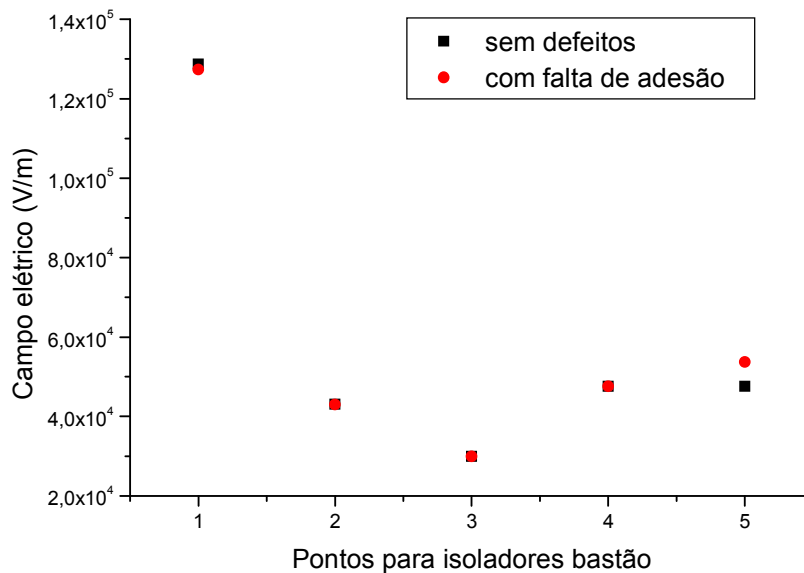


Figura 29 - Gráfico do campo elétrico (V/m) nos pontos fixados para os isoladores tipo bastão

Com base nas Figuras 28 e 29 e TABELA 2 pode-se notar que quanto ao campo elétrico:

Pontos fora do isolador (1 a 3):

- Não são notadas mudanças significativas no campo elétrico entre o isolador bastão sem e com defeito (cerca de 1%, não sendo o suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar).

Ponto dentro do núcleo (4):

- Novamente não se notam diferenças, o defeito não é capaz de interferir no valor do campo elétrico neste ponto.

Ponto na região do defeito (5):

- Nesta região, que no isolador sem defeito era preenchida pela camada polimérica (permissividade 3) passou a ser preenchida por ar (permissividade 1) devido a falta de adesão. Assim como visto no isolador polimérico tipo pino, quando a permissividade do material diminui o campo elétrico naquela região tem seu valor elevado, é o que se nota neste ponto 5, pois sem defeito o isolador possui campo elétrico de 47.593 V/m, já com a

falta de adesão este valor vai para 53.719 V/m, aproximadamente 13% a mais. O valor encontrado não é o suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar (3×10^6 V/m), mas estas imperfeições podem contribuir para que, ao longo do tempo, o material sofra envelhecimento mais acelerado que o esperado. A distribuição não-homogênea de campo elétrico pode vir a provocar falha de isolamento no sistema.

4.1.3 Espaçador losangular

Na Figura 30 estão mostradas as simulações de distribuição de campo elétrico para o espaçador losangular, onde em a) tem-se o espaçador bom, sem defeitos, em b) tem-se o espaçador com vazio (bolha).

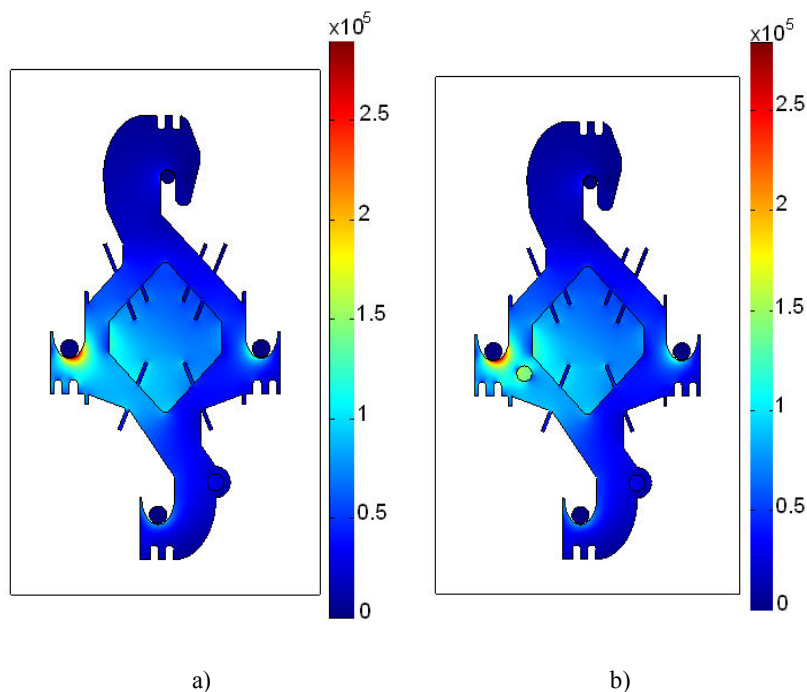


Figura 30 - Distribuição de campo elétrico (V/m) para o espaçador sem defeito (a) e com vazio (bolha) (b)

Na TABELA 3 estão mostrados os valores do campo elétrico (V/m) nos pontos específicos das simulações para o espaçador.

TABELA 3 - CAMPO ELÉTRICO (V/m) PARA OS ESPAÇADORES

Pontos	Sem defeito	Com vazio
1	45.747	45.904
2	109.471	109.105
3	103.186	104.902
4	95.898	97.162
5	126.028	125.061
6	96.344	145.751

Na Figura 31 está mostrado o gráfico do campo elétrico (V/m) nos pontos fixados para os espaçadores.

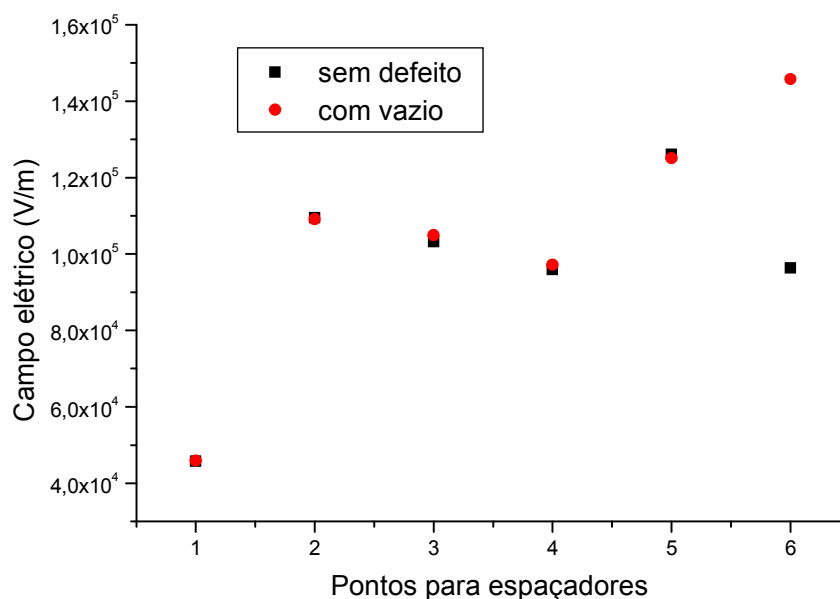


Figura 31 - Gráfico do campo elétrico (V/m) nos pontos fixados para os espaçadores

Com base nas Figuras 30 e 31 e TABELA 3 pode-se notar que quanto ao campo elétrico:

Pontos fora do espaçador (1 a 4)

- Nestes pontos quase não há alterações entre os dois espaçadores (diferenças de valores de campo elétrico entre os espaçadores de, no máximo, aproximadamente 2%). O vazio existente não é grande o suficiente para

interferir no campo elétrico desses pontos. Nenhum dos valores encontrados é capaz de romper o valor de rigidez dielétrica do ar.

Pontos dentro do espaçador (5 e 6)

- No ponto 5 o espaçador com vazio apresenta campo elétrico abaixo do outro espaçador (diferença menor do que 1%). O campo elétrico, como será visto a seguir, estará concentrado na região do vazio.
- No ponto 6, local do vazio, o espaçador que contém o vazio tem campo elétrico nitidamente elevado do espaçador sem defeito, cerca de 51%. Mesmo com este defeito, o valor do campo elétrico atingido neste ponto não é capaz de romper a rigidez dielétrica do ar. Da mesma maneira que ocorre nos isoladores tipo pino e bastão, a presença de bolhas (espaços vazios) acarreta concentração de campo elétrico nos pontos que contém o defeito, contribuindo para a não uniformidade da distribuição de campo elétrico, podendo assim ocorrer descargas parciais e posterior ruptura de isolamento.

Como visto os isoladores tipo pino, tipo bastão e espaçador podem ter o campo elétrico alterado quando sujeitos a defeitos.

4.2 Ensaio de compatibilidade elétrica (multiestressamento)

O ensaio de multiestressamento foi analisado em três partes: inspeção visual, termografia e medida de resistência de isolamento nos espaçadores.

4.2.1 Inspeção visual

Na primeira inspeção visual realizada após 10 dias de ensaio nenhuma alteração significativa (trilhamento, erosão e/ou fissuração) foi observada nos equipamentos e acessórios sob teste. Todavia, decorridos 15 dias de teste foi observado início de trilhamento no cabo protegido, principalmente nas regiões próximas dos pontos de amarração. Após 40 dias o ensaio foi desligado e os materiais foram retirados para avaliação.

Conforme mostrado na Figura 32 os anéis de amarração do fabricante B, confeccionados em EPR, apresentaram trilhamento elétrico e elevada deformação permanente após retirado do ensaio de multiestressamento.



Figura 32 - Anéis de amarração do fabricante b com elevada deformação permanente e trilhamento elétrico, após 40 dias

No berço do espaçador do fabricante B, confeccionados em HDPE, e em regiões próximas do mesmo foram observados acúmulo de sal (Figura 33a), trilhamento elétrico (Figuras 33b e 33c) e alteração superficial devido à passagem de corrente de fuga (Figura 33d).

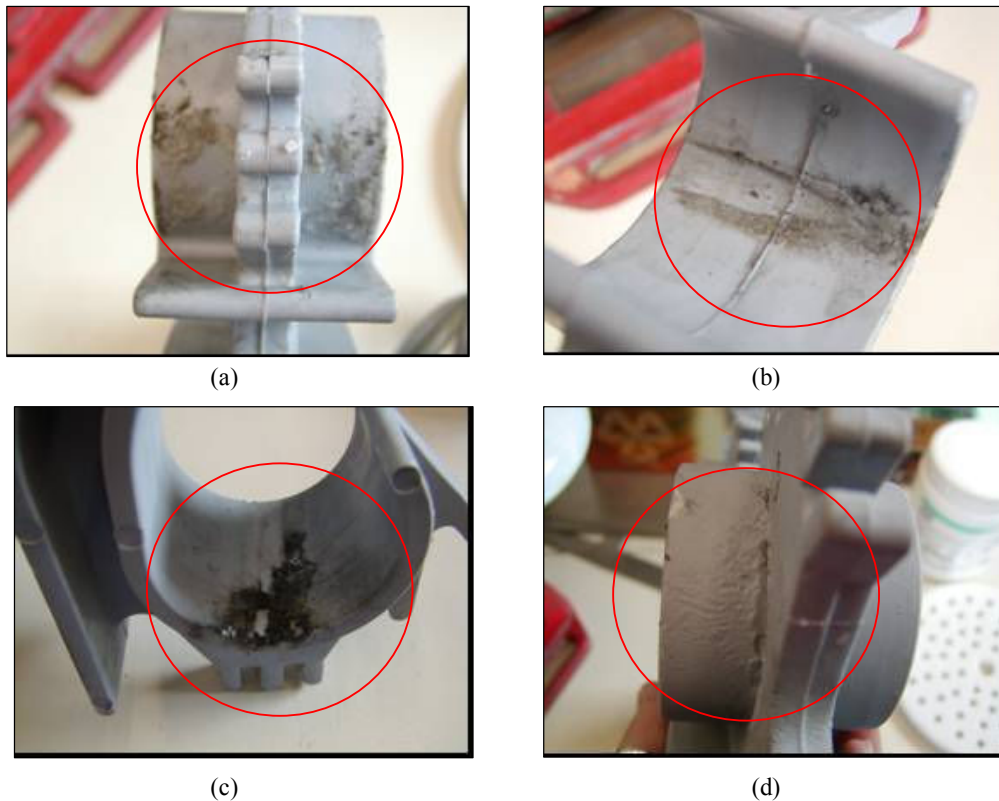


Figura 33 - Espaçador do fabricante b. imagem do berço, após 40 dias, apresentando (a) acúmulo de sal, (b) e (c) trilhamento elétrico e (d) alterações superficiais devido à passagem de corrente de fuga

Na Figura 34 pode ser observado, em regiões afastadas do berço do espaçador do fabricante B, a ocorrência de alteração superficial devido à passagem de corrente de fuga.

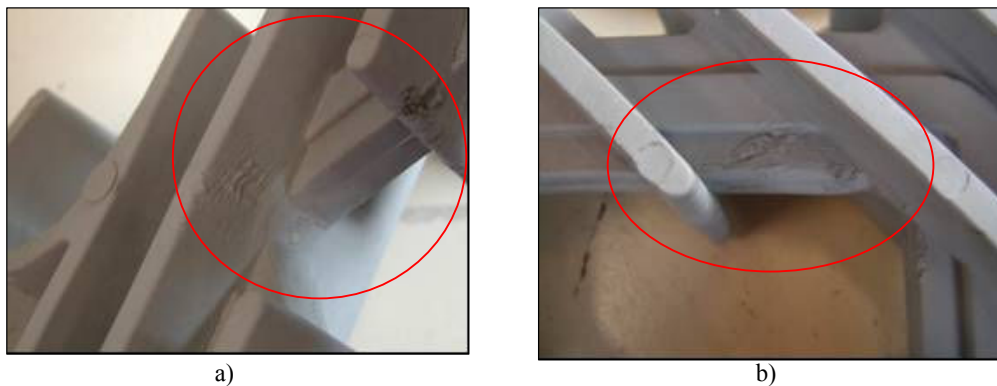


Figura 34 a) e b) - detalhes da ocorrência de alterações superficiais em regiões afastadas do berço do espaçador do fabricante b, após 40 dias

Conforme mostrado na Figura 35 os anéis de amarração do fabricante D, cujo material é o silicone, apresentaram uma pequena deformação permanente, acrescida de um leve trilhamento elétrico.

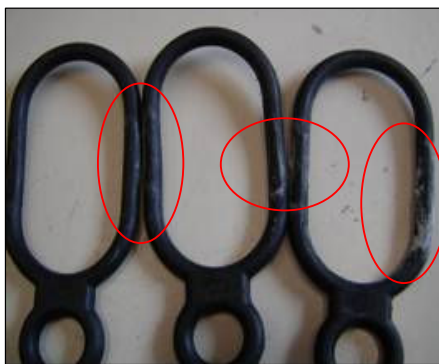


Figura 35 - Anéis de amarração do fabricante d com pequena deformação permanente e leve trilhamento elétrico, após 40 dias

Na Figura 36 pode ser observado que aparecem alterações superficiais em algumas regiões do espaçador do fabricante C, possivelmente geradas pela passagem de corrente de fuga pelo material durante o ensaio de multiestressamento. Todavia, a intensidade deste efeito é bem menos significativa se comparada ao espaçador B. O melhor desempenho deste espaçador deve-se, em parte, ao melhor acabamento da peça. Isto porque a ausência de rugosidades e rebarbas, as quais são fontes de acúmulo de contaminantes, proporciona um melhor desempenho ao espaçador.



Figura 36 - Detalhe das alterações superficiais ocorridas no espaçador do fabricante c devido a passagem de corrente de fuga no material durante o ensaio de multiestressamento, após 40 dias

A Figura 37 mostra os anéis de amarração do fabricante C, confeccionados em silicone. Os anéis não apresentaram deformação permanente. Todavia, a ocorrência de um leve trilhamento elétrico foi observada em um dos anéis.

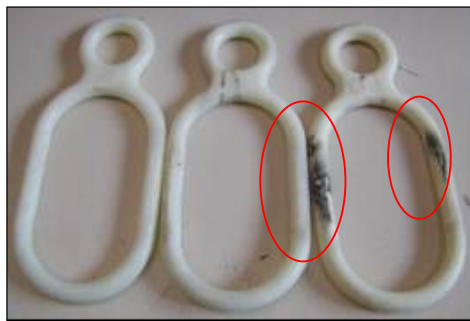


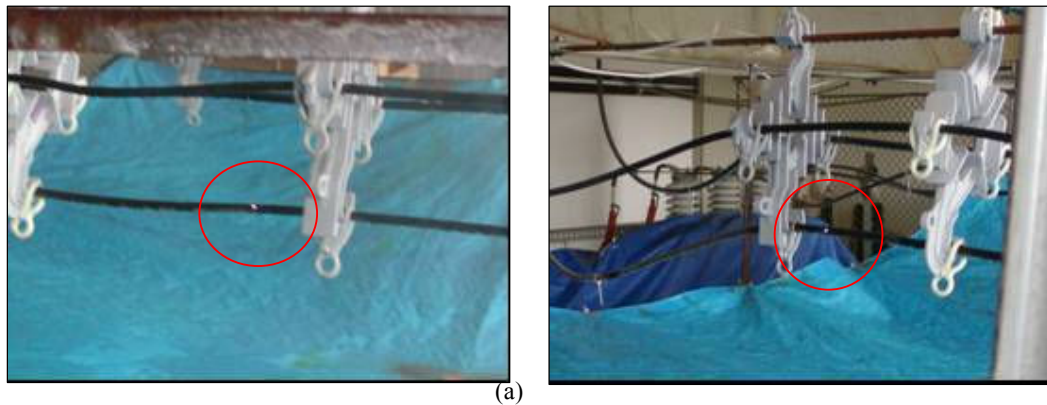
Figura 37 - Anéis de amarração do fabricante c: nenhuma alteração significativa, após 40 dias

Nos isoladores de pino utilizados no ensaio de multiestressamento não foram observadas alterações significativas. Na Figura 38 pode ser notado que em um dos isoladores houve um leve acúmulo de sal na região de apoio do cabo coberto.

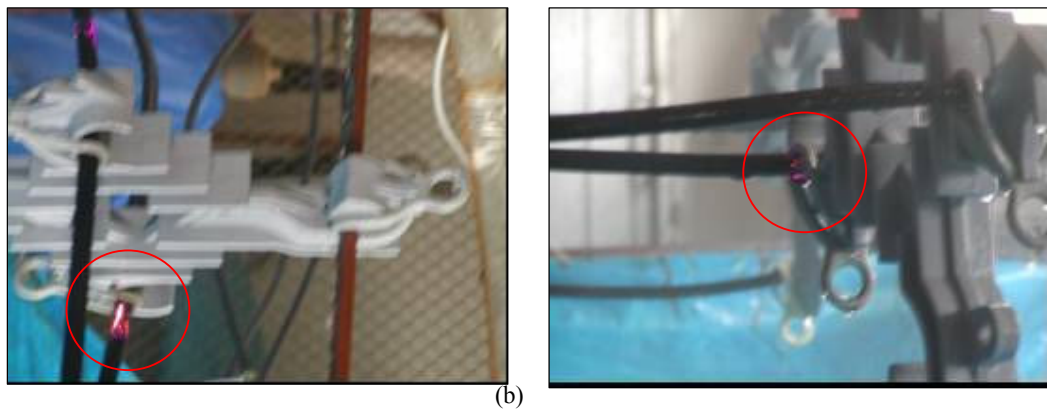


Figura 38 - Isolador de pino apresentando acúmulo de sal na região de apoio do cabo coberto, após 40 dias

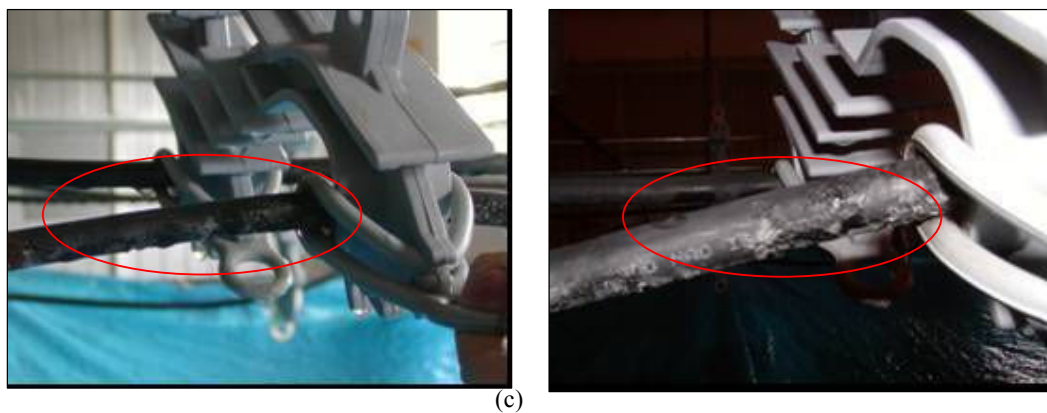
Na Figura 39 está apresentada a documentação fotográfica dos equipamentos e acessórios após 21 dias de ensaio.



Trilhamento e descargas superficiais no cabo protegido



Trilhamento e descargas superficiais no ponto de amarração – conjunto cabo – espaçador do fabricante b
– amarração do fabricante b

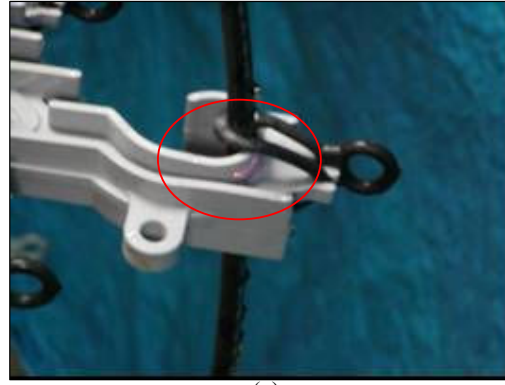


Trilhamento e erosão no conjunto cabo – espaçador do fabricante b – amarração do fabricante b



(d)

Trilhamento e erosão no conjunto cabo –
espaçador do fabricante c - amarração do
fabricante c



(e)

Ocorrência de descargas superficiais no berço do
espaçador do fabricante b – amarração do
fabricante d



(f)

Ocorrência de descargas superficiais no berço do
espaçador do fabricante b – amarração do
fabricante d

Figura 39 - Documentação fotográfica do ensaio de multiestressamento após 21 dias de ensaio

Nas Figuras 39 (a) e (b) pode ser observado a ocorrência de trilhamento elétrico no cabo protegido em regiões próximas dos pontos de amarração. Nas Figuras 39 (c) e (d) pode ser notado, além do trilhamento, a presença de erosão. A Figura 39 (f) mostra ocorrência de fuga de corrente no berço do espaçador e “esbranquiçamento” do anel de amarração.

4.2.2 Termografia

As termografias relativas ao ensaio de multiestressamento estão apresentadas de duas maneiras:

- para as avaliações feitas com tensão aplicada e com o sistema de aquecimento desligado (i.e. sem corrente) as imagens estão apresentadas em preto e branco visando facilitar a visualização das regiões onde ocorrem cintilações e regiões de fuga de corrente;
- para as avaliações feitas com tensão aplicada e com o sistema de aquecimento ligado (i.e. com corrente) as imagens estão apresentadas coloridas para melhor visualização dos pontos quentes e regiões onde há ocorrência de trilhamento elétrico.

Na Figura 40 está ilustrada de forma esquemática a disposição dos equipamentos e acessórios do ensaio de multiestressamento no arranjo experimental.

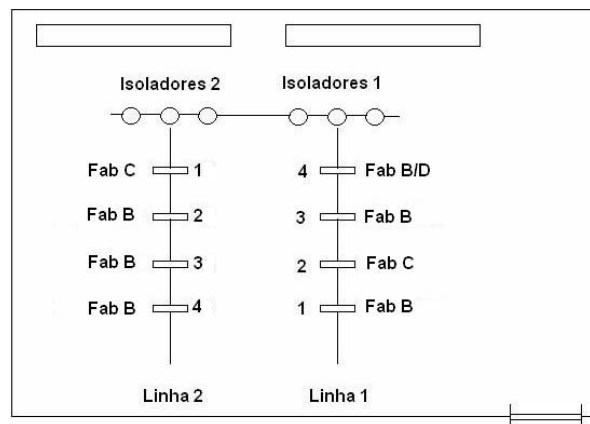


Figura 40 - Disposição dos equipamentos e acessórios do ensaio de multiestressamento no arranjo experimental

Os componentes serão assim nomeados:

- L1-1(B): indica que na linha 1 está espaçador número 1, do fabricante B;
- L1-2(C): indica que na linha 1 está espaçador número 2, do fabricante C;
- L1-3(B): indica que na linha 1 está o espaçador número 3, do fabricante B;
- L1-4(B/D): indica que na linha 1 estão os espaçadores número 4, dos fabricantes B e D;

- L2-1(C): indica que na linha 2 está o espaçador número 1, do fabricante C;
- L2-2(B): indica que na linha 2 está o espaçador número 2, do fabricante B;
- L2-3(B): indica que na linha 2 está o espaçador número 3, do fabricante B;
- L2-4(B): indica que na linha 2 está o espaçador número 4, do fabricante B.

Na Figura 41 estão mostradas, a fim de exemplificar, duas termografias com o sistema de aquecimento desligado. Na Figura 41a está um espaçador que não apresenta regiões determinadas com temperaturas elevadas, já na Figura 41b, o espaçador apresenta regiões claras, indicando maior temperatura nestas regiões, estando elas com cintilações e correntes de fuga.

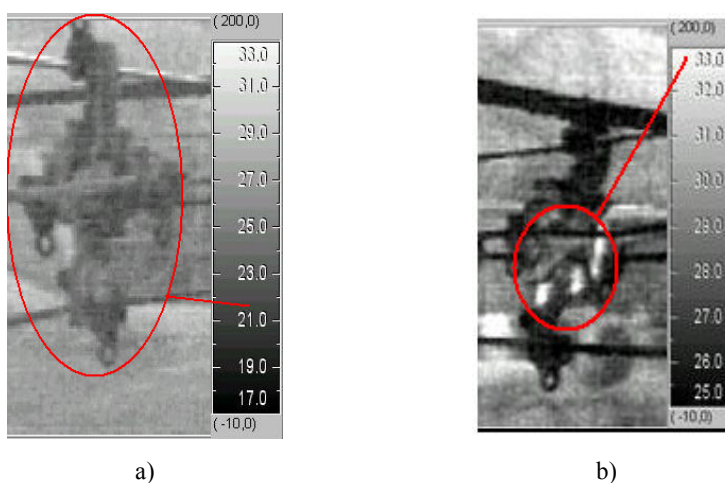
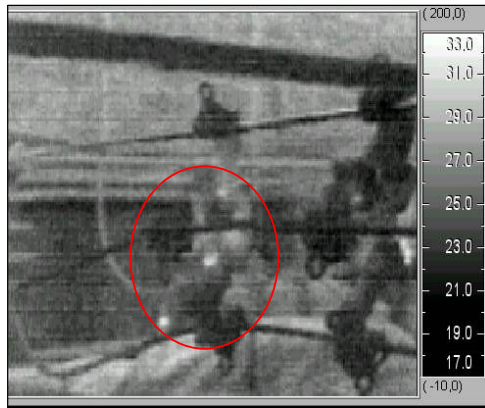
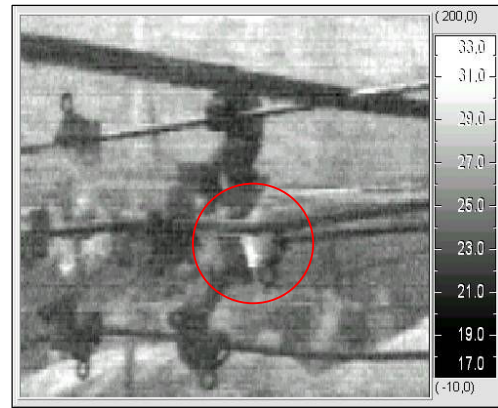


Figura 41: Termografia de espaçador sem elevações de temperatura (a) e com elevação de temperatura (b)

Na Figura 42 estão apresentados os resultados de termografia, com o sistema de aquecimento desligado, decorridos 10 dias de ensaio. Pode ser notado das Figuras 42 (a), (b), (d), (e), e (g) que as cintilações e fuga de corrente ocorrem preferencialmente na região central do espaçador. Nas Figuras 42(c), (f), (h), (i) e (j) não é observada nenhuma alteração. Para as inspeções realizadas com o sistema de aquecimento ligado não foi observada nenhuma alteração dos equipamentos e acessórios inspecionados, motivo pelo qual não estão apresentadas as termografias coloridas.

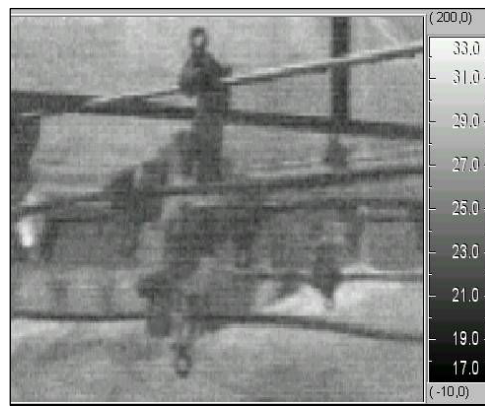


(a) fabricante b

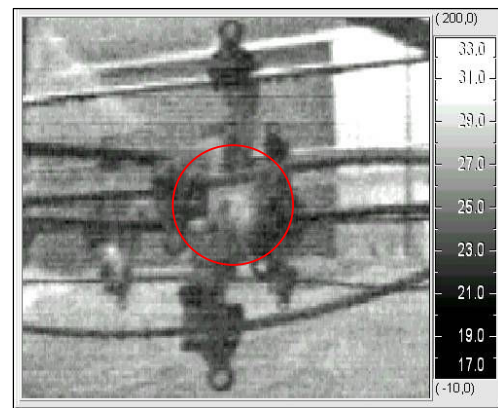


(b) fabricante c

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2

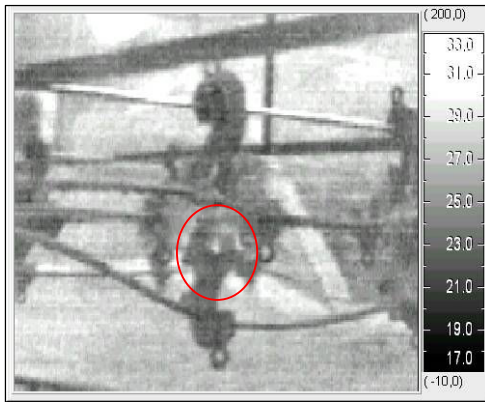


(c) fabricante c

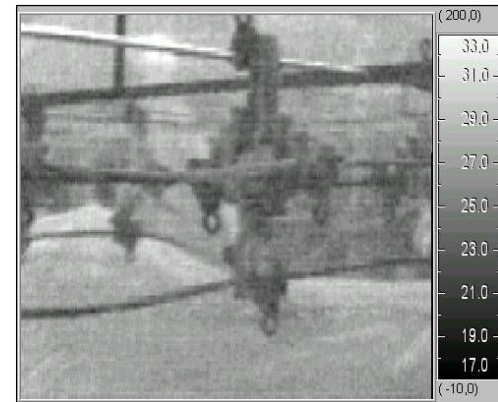


(d) fabricante b

linha 2 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2

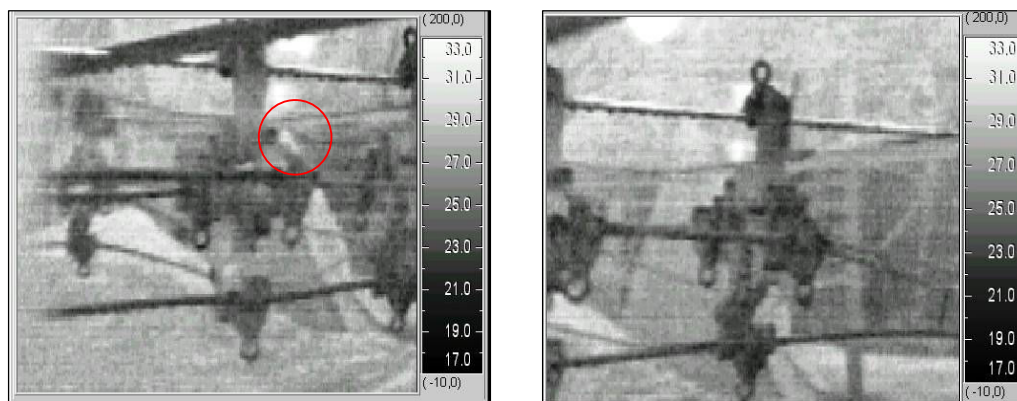


(e) fabricante b



(f) fabricante b - fabricante d

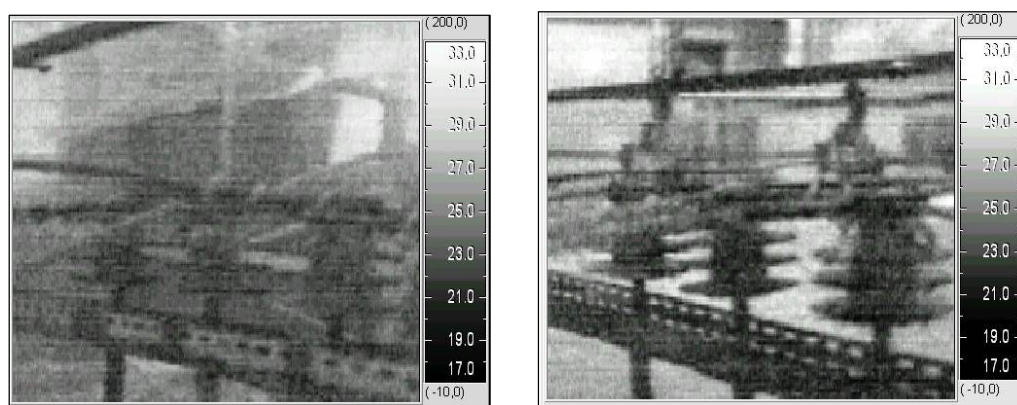
linha 1 – conjunto espaçador-amarração 3 e 4



(g) fabricante b

(h) fabricante b

linha 2 – conjunto espaçador-amarração 3 e 4



(i) fabricante b

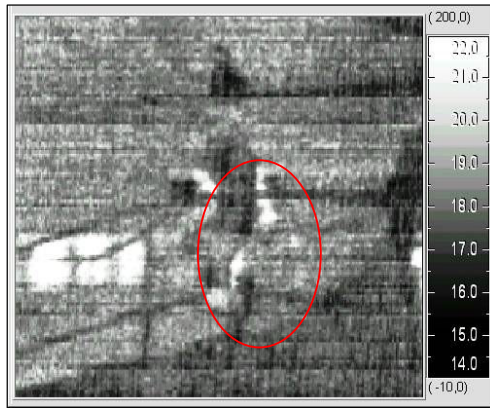
(j) fabricante b

linha 1 – conjunto de isoladores

linha 2 – conjunto de isoladores

Figura 42 - Termografias, com o sistema de aquecimento desligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 10 dias de ensaio

Na Figura 43 está apresentado o resultado de termografia, com o sistema de aquecimento desligado, decorridos 15 dias de ensaio. Pode ser notada em todos os espaçadores a ocorrência de cintilações e corrente de fuga na região central dos espaçadores. Na Figura 43 (a), (b), (c), (d) e (e) é observado a fuga de corrente entre os condutores fase. Na Figura 43d está tendo ocorrência de cintilações e corrente de fuga em praticamente todo o espaçador. Nas Figuras de 43f a 43j não é observada alteração significativa.

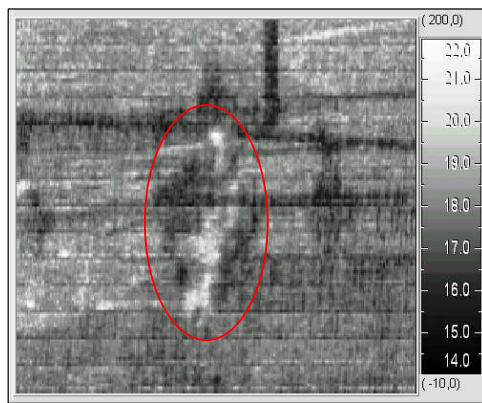


(a) fabricante b

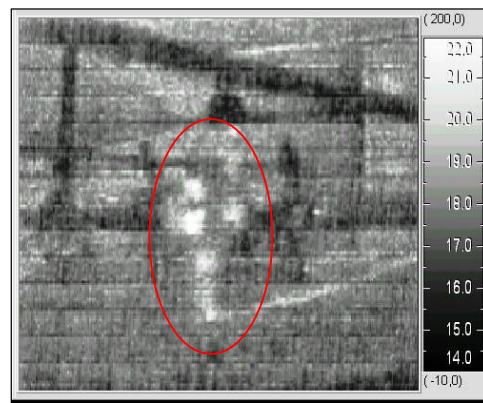


(b) fabricante c

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2



(c) fabricante c

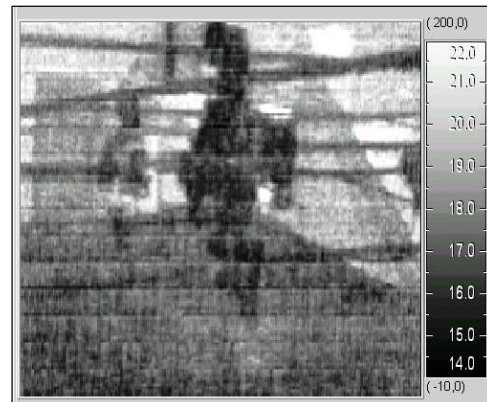


(d) fabricante b

linha 2 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2



(e) fabricante b



(f) fabricante b - fabricante d

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 3 e 4

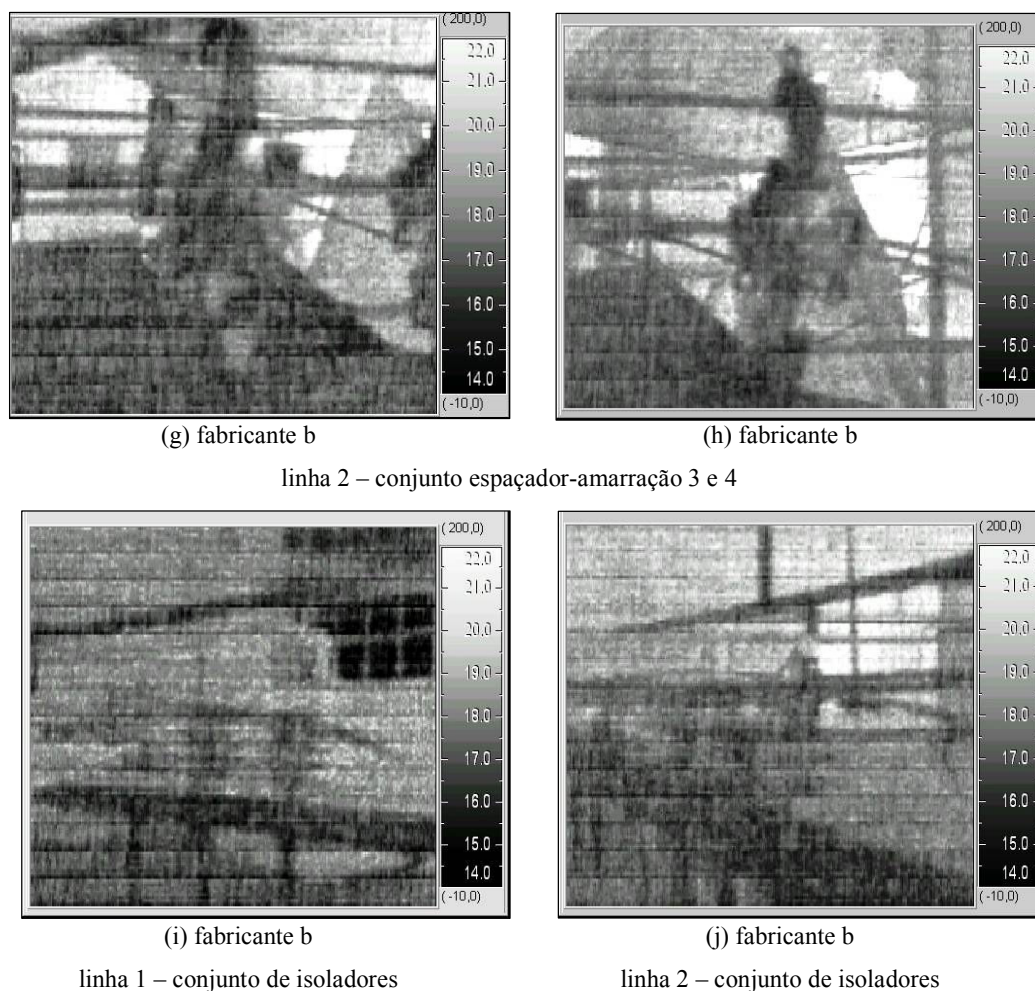
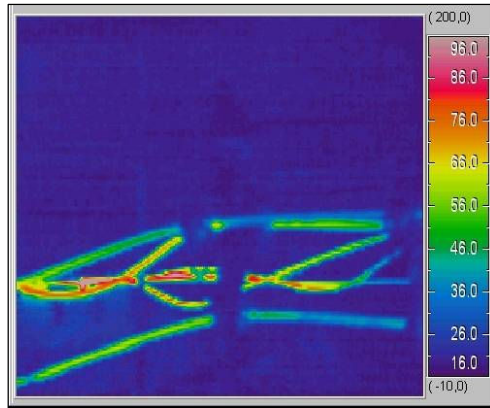
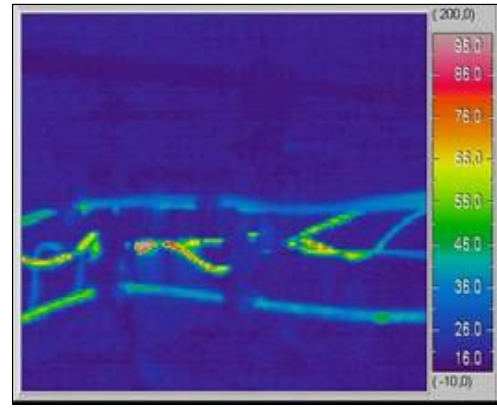


Figura 43 - Termografias, com o sistema de aquecimento desligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 15 dias de ensaio

Na Figura 44 está apresentado o resultado de termografia, com o sistema de aquecimento ligado, decorridos 15 dias de ensaio. Na Figura 44 (a) e (b) podem ser observadas regiões (em vermelho) onde está ocorrendo o trilhamento elétrico do cabo protegido. Nestas regiões a temperatura é superior a 80 °C. Nas demais Figuras 44 (C), (d), (e), (f) e (g) é notado que a temperatura na capa da cobertura (60 °C) é a mesma imposta no início do ensaio indicando que o trecho está em bom estado. Já nas Figuras 44 (i) e (j) é observado um aquecimento excessivo na parte do cabo localizada no topo dos isoladores poliméricos, sendo este aquecimento mais acentuado na linha 2.

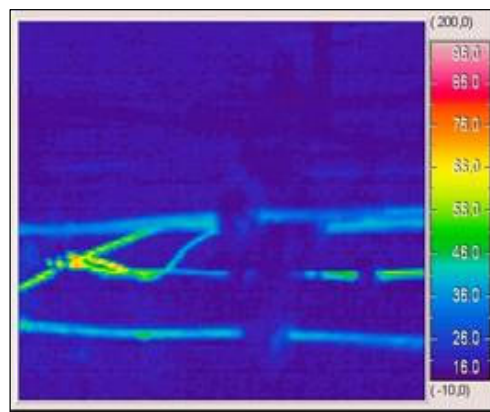


(a) fabricante b

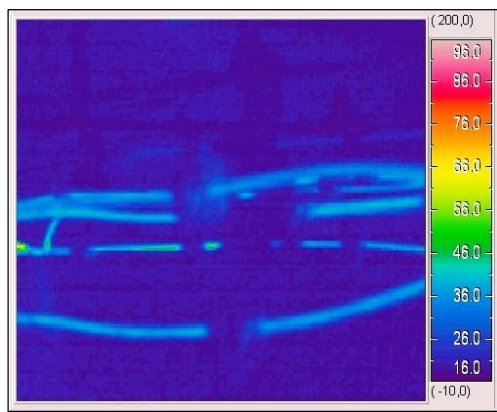


(b) fabricante c

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2

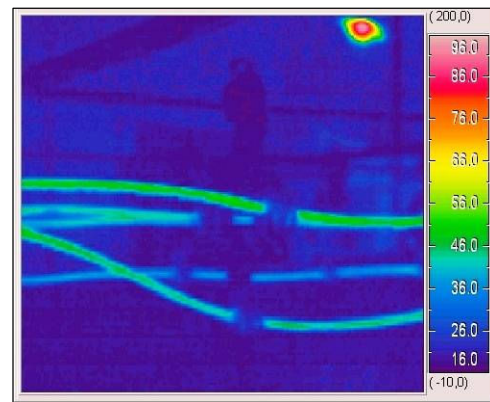


(c) fabricante c

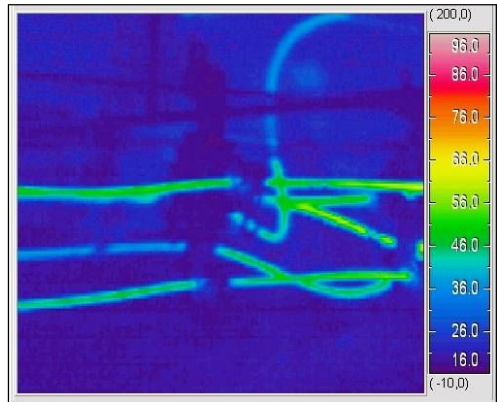


(d) fabricante b

linha 2 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2



(e) fabricante b



(f) fabricante b - fabricante d

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 3 e 4

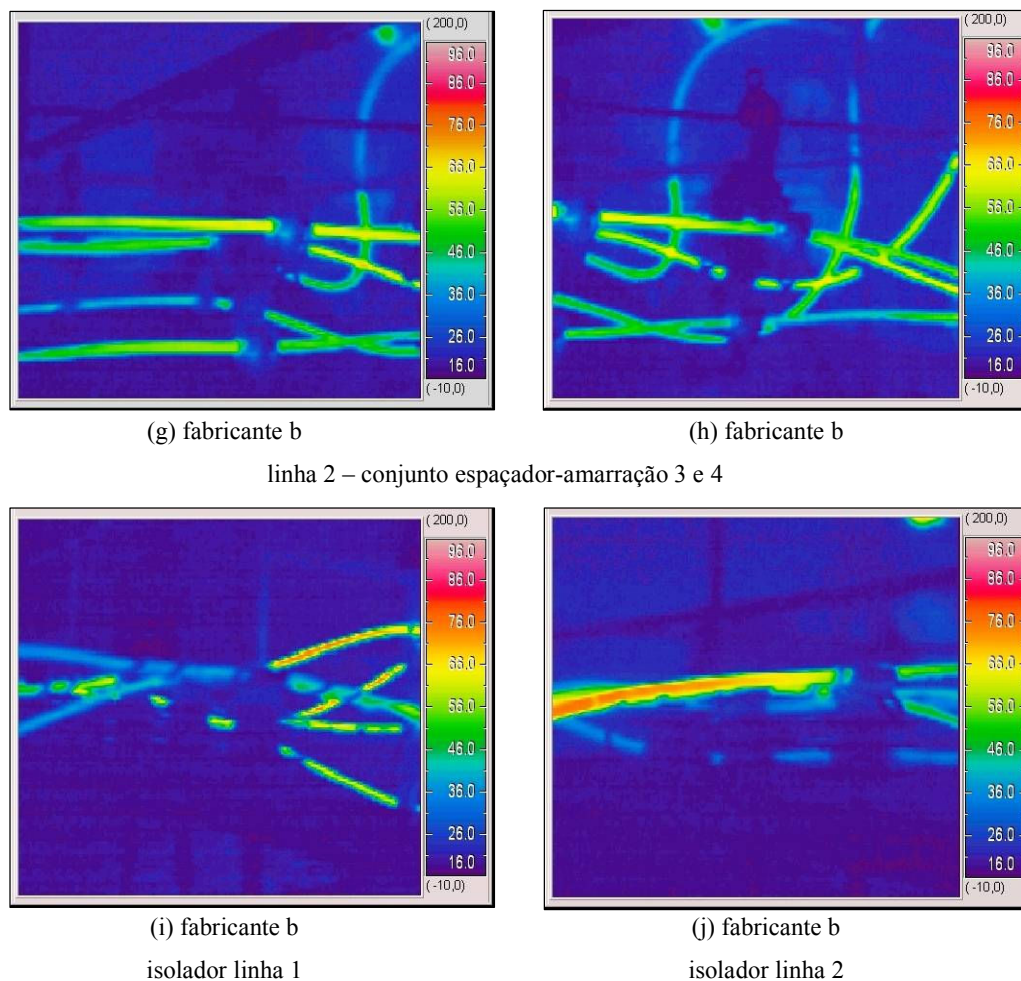
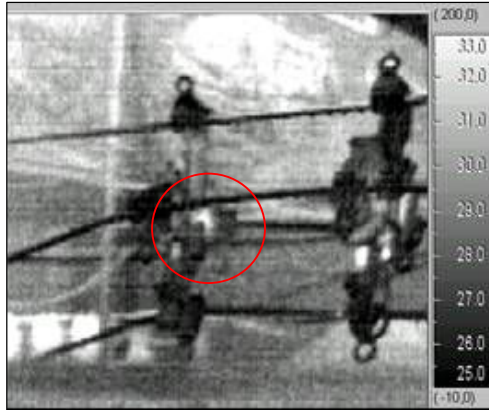
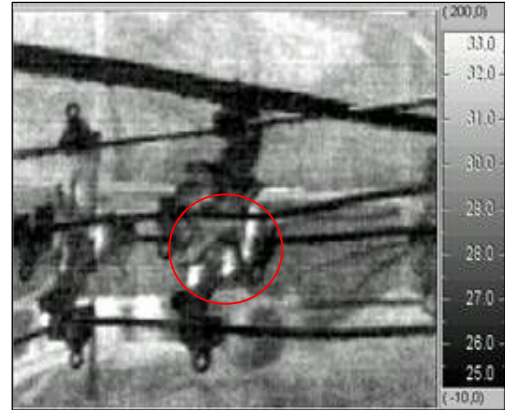


Figura 44 - Termografias, com o sistema de aquecimento ligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 15 dias de ensaio

Na Figura 45 é apresentado o resultado de termografia, com o sistema de aquecimento desligado, decorridos 28 dias de ensaio. Os espaçadores das Figuras 45 (a), (b), (e), (f), (g) e (h) apresentaram indício da ocorrência de fuga de corrente, sendo este efeito mais acentuado nas Figuras 45 (e), (f) e (g). Os espaçadores (c) e (d) apresentaram este efeito de forma menos acentuada. Os isoladores da linha 1, Figura 45 (i), também apresentaram pontos de fuga.

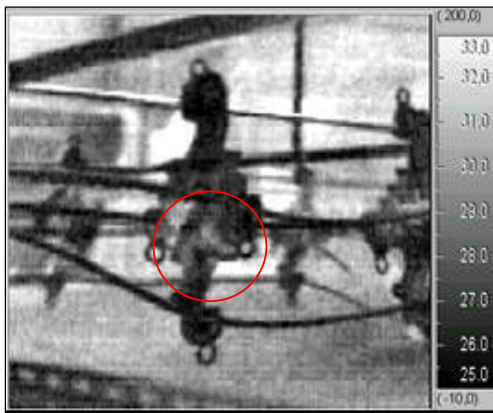


(a) fabricante b

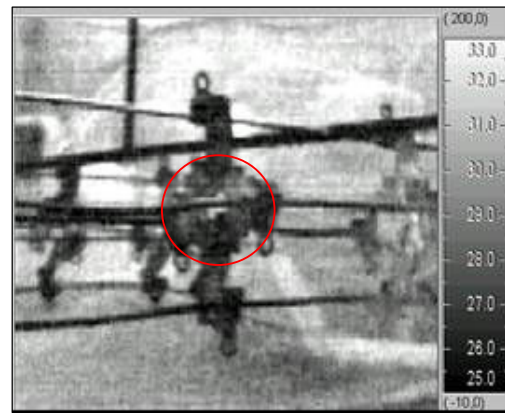


(b) fabricante c

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2

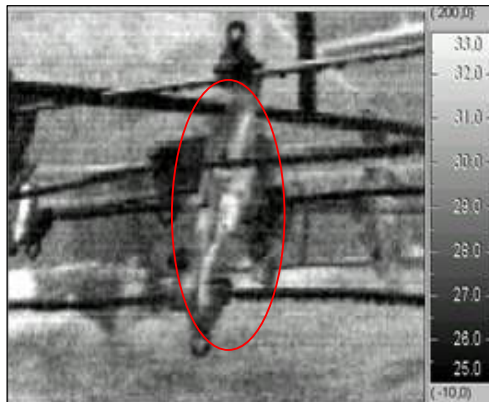


(c) fabricante c

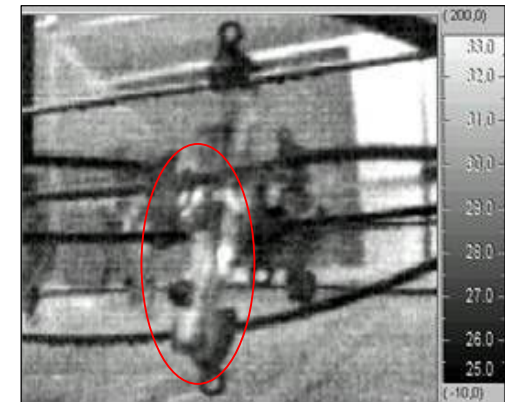


(d) fabricante b

linha 2 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2



(e) fabricante b



(f) fabricante b - fabricante d

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 3 e 4

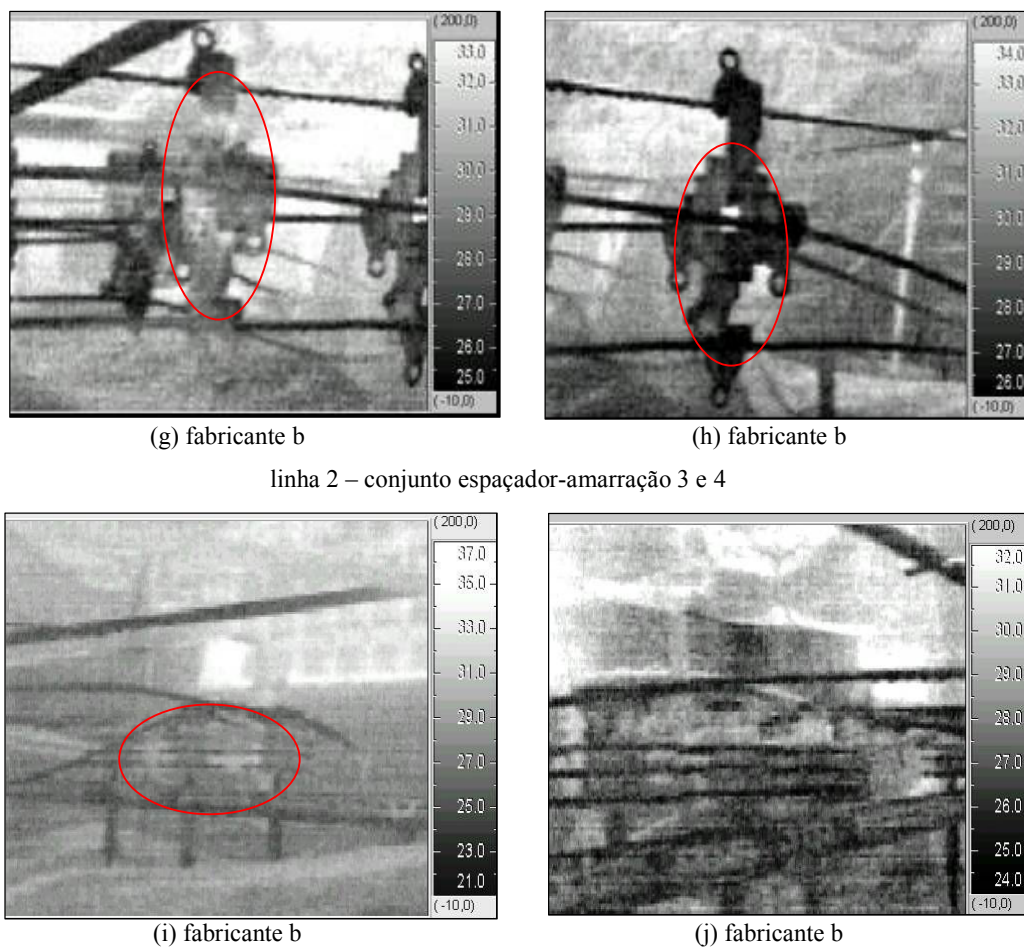
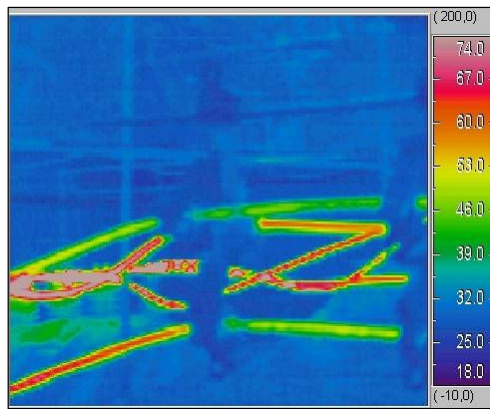
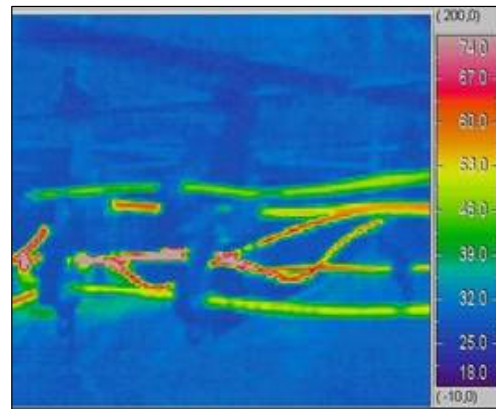


Figura 45 - Termografias, com o sistema de aquecimento desligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 28 dias de ensaio

Na Figura 46 está apresentado o resultado de termografia, com o sistema de aquecimento ligado, decorridos 28 dias de ensaio. É observada a ocorrência de trilhamento elétrico no cabo protegido nas Figuras 46 (a) e (b). As Figuras 46 (d), (e), (f), (g) e (h) mostram alguns pontos de aquecimento e a Figura 46 (c) não apresenta indício de aquecimento ou trilhamento. Os cabos protegidos localizados próximos aos conjuntos de isoladores também apresentam pontos de aquecimento.

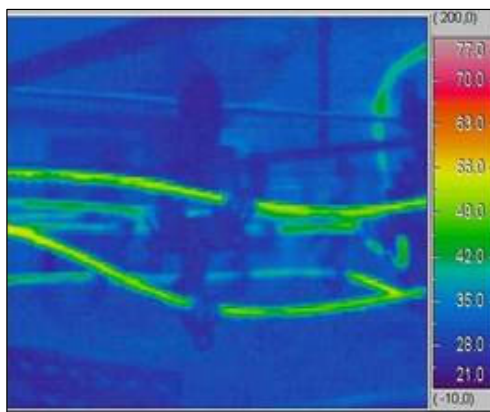


(a) fabricante b

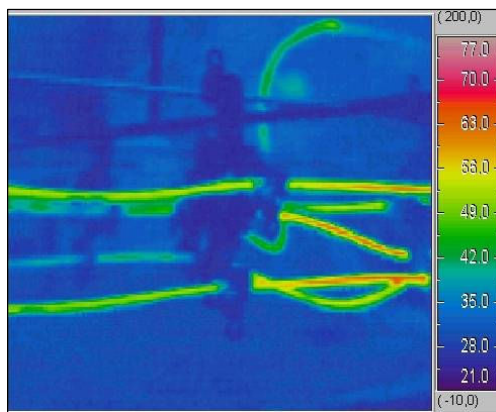


(b) fabricante c

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2

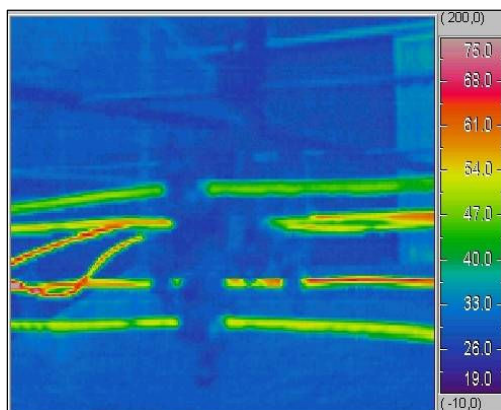


(c) fabricante c

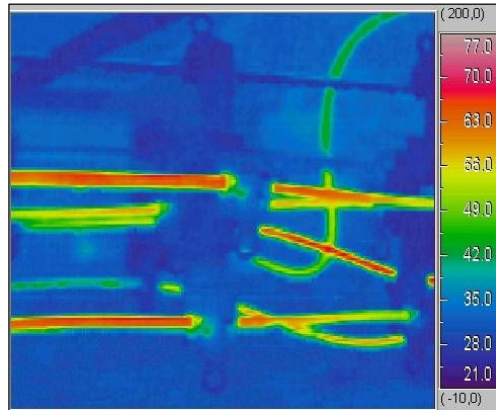


(d) fabricante b

linha 2 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2



(e) fabricante b



(f) fabricante b - fabricante d

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 3 e 4

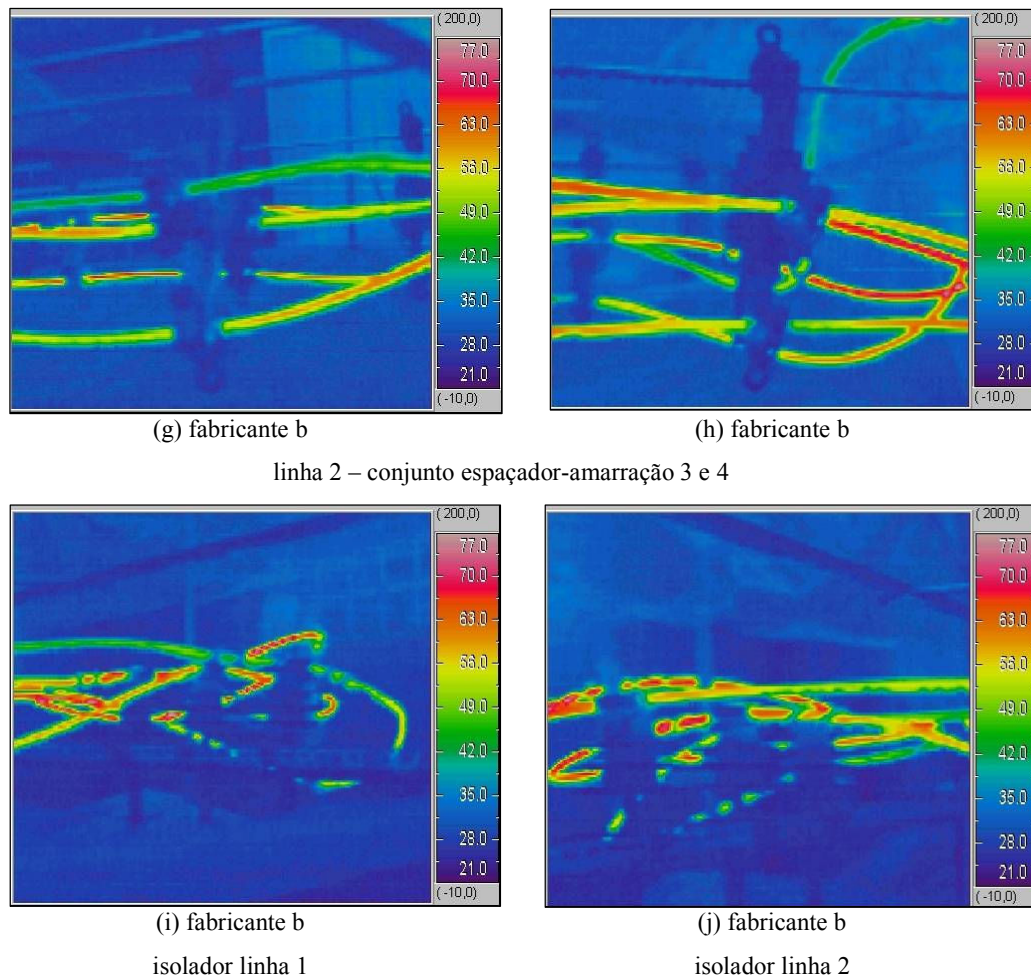
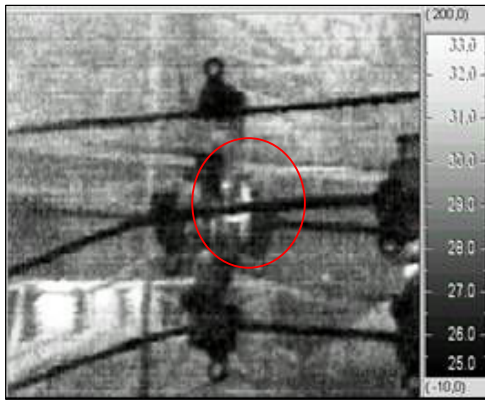
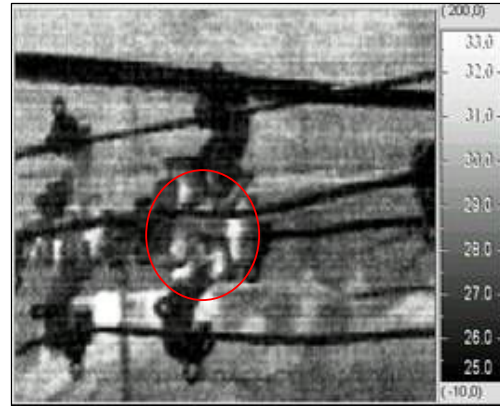


Figura 46 - Termografias, com o sistema de aquecimento ligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 28 dias de ensaio

Na Figura 47 está apresentado o resultado de termografia, com o sistema de aquecimento desligado, decorridos 40 dias de ensaio. Todos os espaçadores apresentaram indício da ocorrência de fuga de corrente, sendo este efeito mais acentuado nas Figuras 47 (d), (e), (f), (g) e (h). O espaçador 47 (c) praticamente não apresentou corrente de fuga. Os isoladores também apresentaram pontos de fuga.

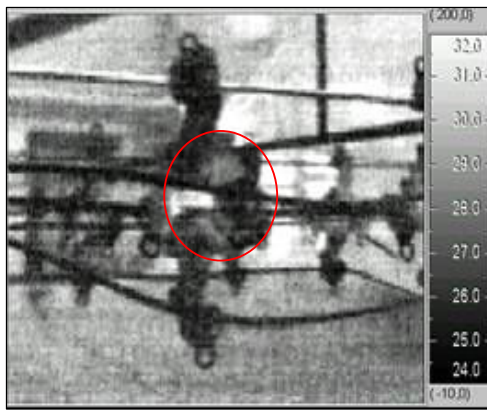


(a) fabricante b

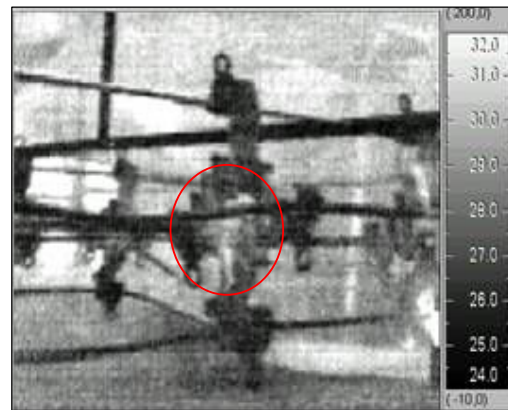


(b) fabricante c

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2

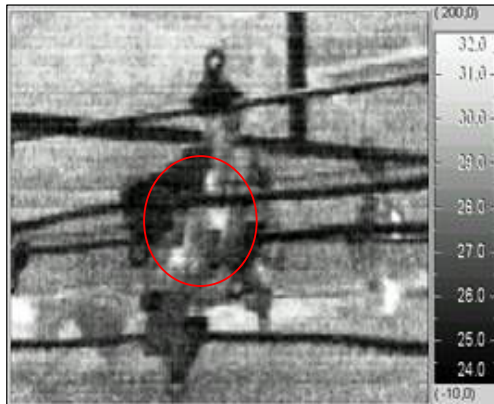


(c) fabricante c

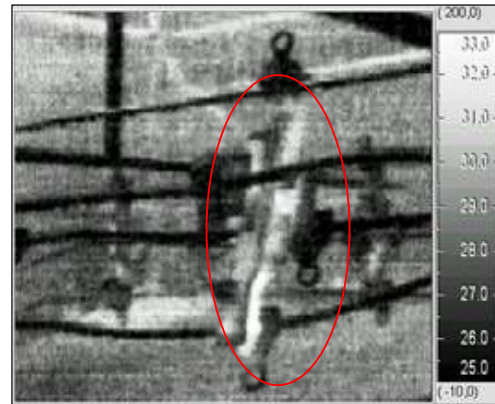


(d) fabricante b

linha 2 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2



(e) fabricante b



(f) fabricante b.- fabricante d

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 3 e 4

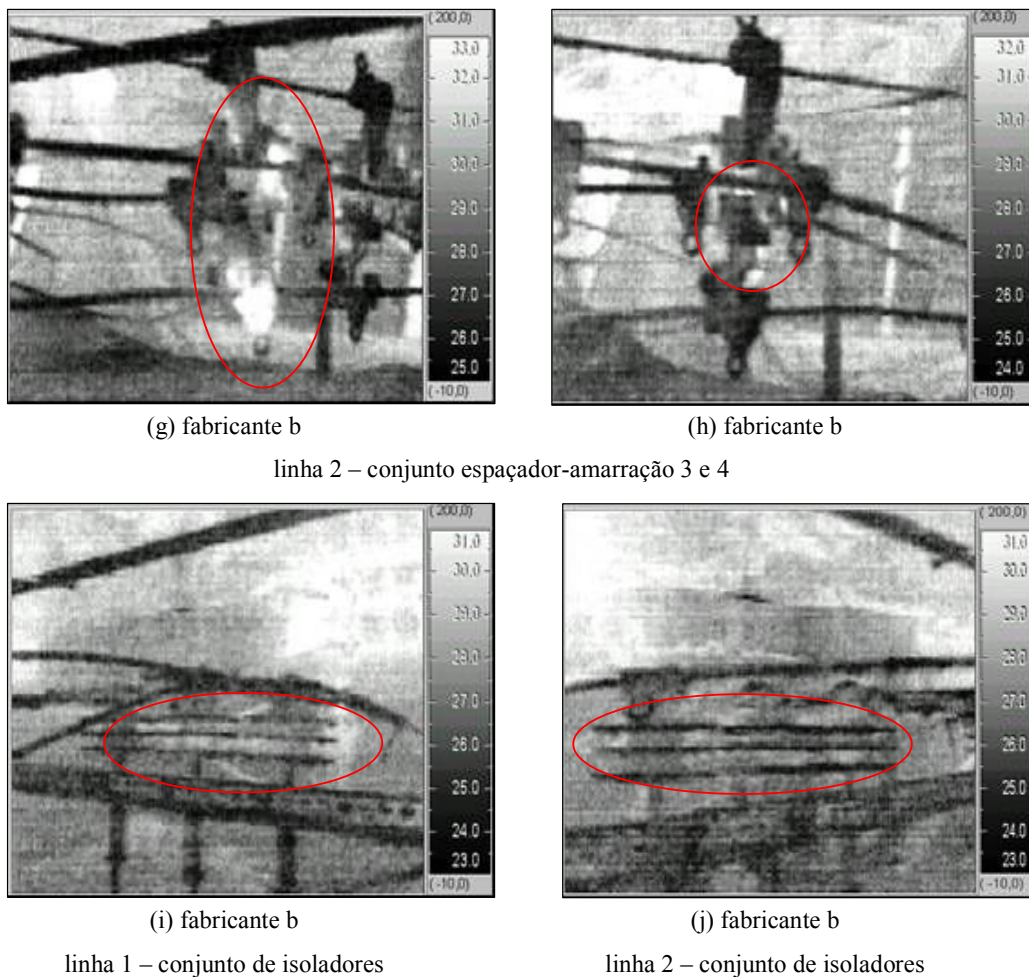
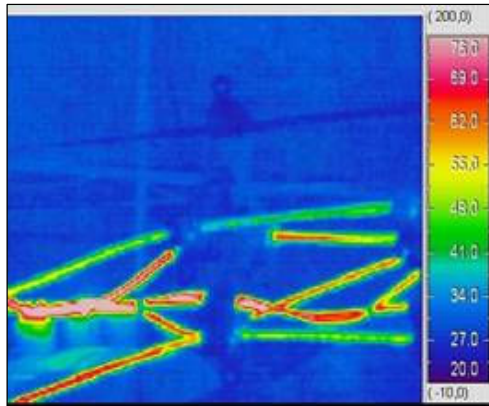
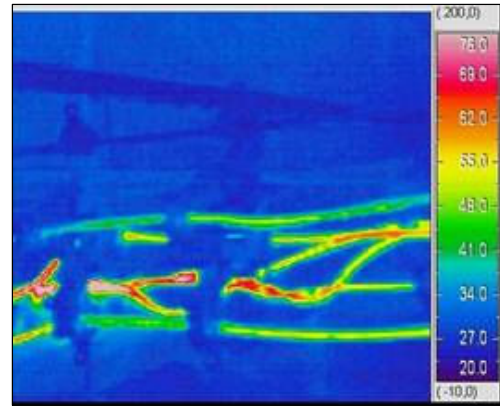


Figura 47 - Termografias, com o sistema de aquecimento desligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 40 dias de ensaio

Na Figura 48 está apresentado o resultado de termografia, com o sistema de aquecimento ligado, decorridos 40 dias de ensaio. É observada a ocorrência de trilhamento elétrico no cabo protegido nas Figuras 48 (a) e (b). As Figuras 48 (d), (e), (g) e (h) mostram alguns pontos de aquecimento e as Figuras 48 (c) e (f) não apresentam indício de aquecimento ou trilhamento. Os cabos protegidos localizados próximos aos conjuntos de isoladores também apresentam pontos de aquecimento.

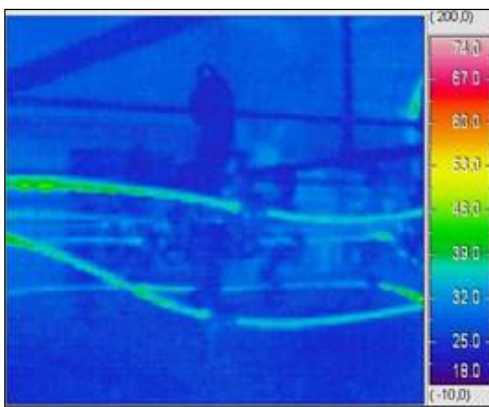


(a) fabricante b

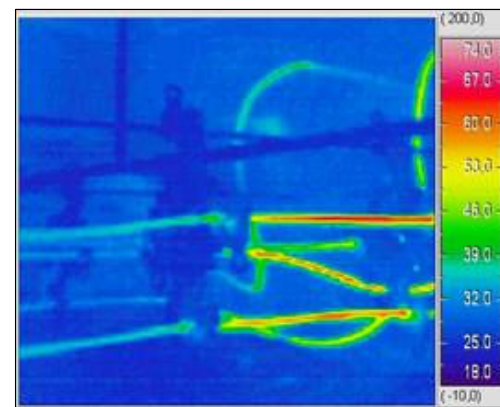


(b) fabricante c

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2

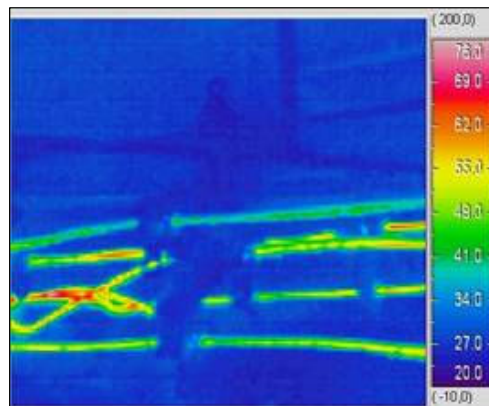


(c) fabricante c

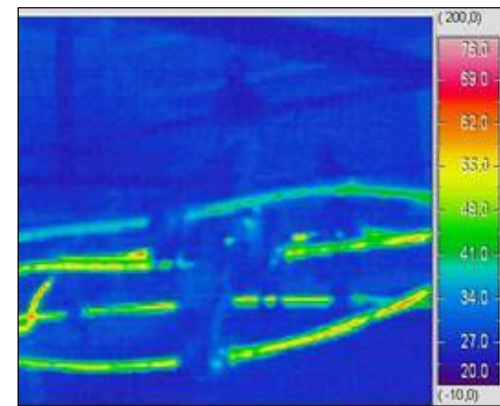


(d) fabricante b

linha 2 – conjunto espaçador-amarração 1 e 2



(e) fabricante b



(f) fabricante b - fabricante d

linha 1 – conjunto espaçador-amarração 3 e 4

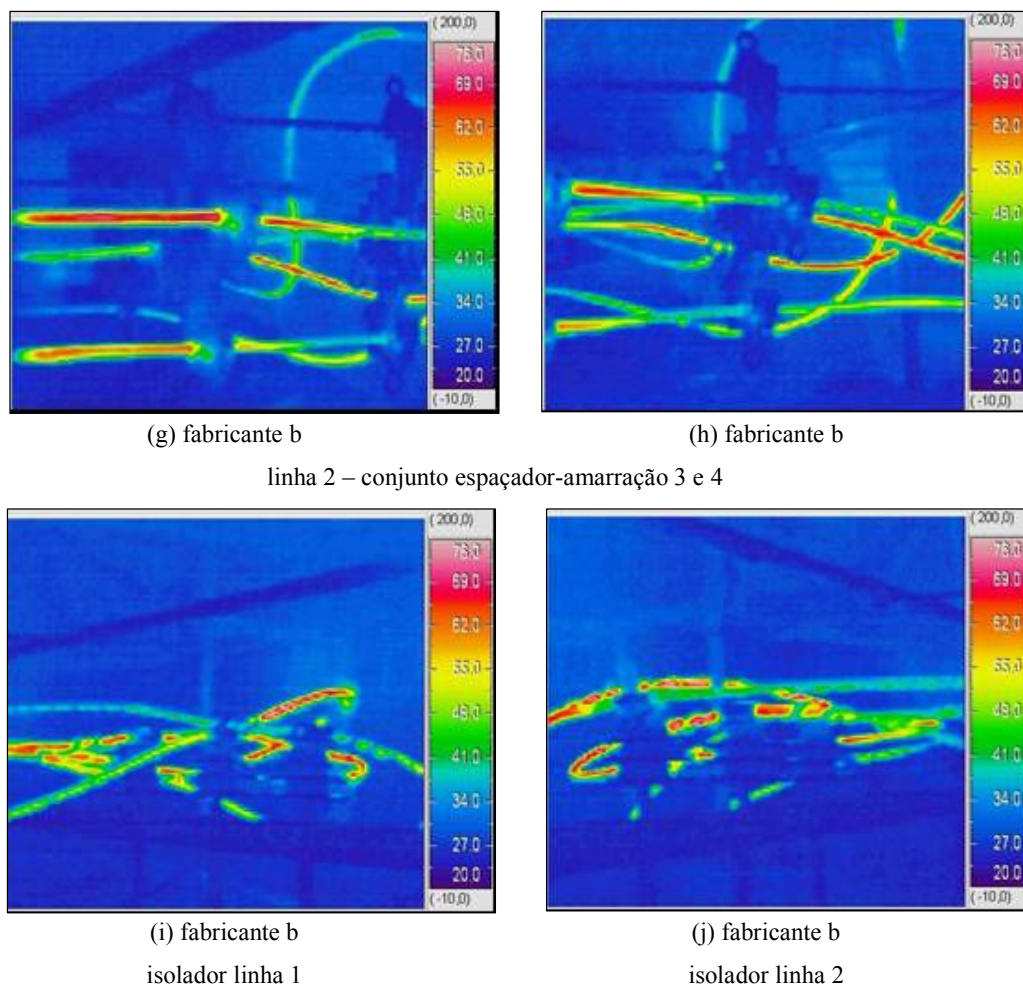


Figura 48 - Termografias, com o sistema de aquecimento ligado, dos conjuntos espaçador-amarração e isoladores poliméricos do ensaio de multiestressamento, decorridos 28 dias de ensaio

Os resultados das termografias estão resumidos na TABELA 4.

TABELA 4 - RESULTADOS DAS TERMOGRAFIAS

Inspeção	Cintilações e fuga de corrente	Trilhamento elétrico
Após 10 dias	Maior ocorrência nos espaçadores do fabricante B.	Não.
Após 15 dias	Em todos os espaçadores, sendo em menor intensidade em alguns espaçadores do fabricante C.	Sim. Nos cabos, em locais próximos dos pontos de amarração.
Após 28 dias e 40 dias	Em todos os espaçadores, sendo em menor intensidade nos espaçadores do fabricante C.	Sim. Nos cabos, em locais próximos dos pontos de amarração. Início de erosão em alguns pontos.

4.2.3 Medida de resistência de isolamento nos espaçadores novos e após o ensaio de compatibilidade elétrica (multiestressamento)

Na TABELA 5 estão mostrados os resultados das medidas de resistência de isolamento nos espaçadores novos. A resistência de isolamento média dos espaçadores novos, tanto do fabricante B quanto do fabricante C, está na faixa de $10^{14} \Omega$.

TABELA 5 - RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO NOS ESPAÇADORES NOVOS

Espaçador	Medida	R (Ω)
Fabricante B	1-2	2×10^{14}
	2-3	4×10^{14}
	3-4	8×10^{14}
	4-1	5×10^{14}
	2-4	4×10^{14}
Fabricante C	1-2	7×10^{15}
	2-3	3×10^{14}
	3-4	5×10^{14}
	4-1	2×10^{14}
	2-4	2×10^{14}

Os resultados das medidas de resistência de isolamento realizadas nos espaçadores do fabricante C após o ensaio de multiestressamento estão apresentados na TABELA 6.

TABELA 6 - RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO, APÓS O ENSAIO DE MULTIESTRESSAMENTO, PARA O ESPAÇADOR DO FABRICANTE C

Espaçador	Medida	R (Ω)	Observação
L1-2(C)	1-2	4×10^{13}	Nenhum vestígio de trilhamento e pouca adesão de contaminantes, sendo esta mais acentuada em relação a L2-1.
	2-3	8×10^{12}	
	3-4	2×10^{14}	
	4-1	2×10^{14}	
	2-4	8×10^{14}	
L2-1(C)	1-2	5×10^{14}	
	2-3	3×10^{14}	
	3-4	2×10^{15}	
	4-1	6×10^{15}	
	2-4	5×10^{15}	

Na Figura 49 estão mostradas algumas imagens do espaçador L1-2.



Figura 49 - Documentação fotográfica do espaçador do fabricante c (L1-2)

Nas Figuras 50 e 51 estão mostradas algumas imagens dos espaçadores L1-4(B) e L2-3(B), respectivamente, os quais apresentaram diminuição acentuada da resistência de isolamento, chegando esta diminuição ser em alguns casos de até 6 ordens de grandeza.



Figura 50 - Documentação fotográfica do espaçador do fabricante b (L1-4)



Figura 51 - Documentação fotográfica do espaçador do fabricante b (L2-3)

Os resultados das medidas de resistência de isolamento realizadas nos espaçadores do fabricante B, após o ensaio de multiestressamento, estão apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 - RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO, APÓS O ENSAIO DE MULTIESTRESSAMENTO, PARA O ESPAÇADOR DO FABRICANTE B

Espaçador	Medida	R (Ω)	Observação
L1-1(B)	1-2	2×10^{15}	
	2-3	4×10^{15}	
	3-4	1×10^{15}	
	4-1	6×10^{14}	
	2-4	2×10^{15}	
L1-3(B)	1-2	2×10^{14}	
	2-3	2×10^{15}	
	3-4	2×10^{15}	
	4-1	6×10^{14}	
	2-4	9×10^{14}	
L1-4(B)	1-2	3×10^{10}	Peça com muita rugosidade e acúmulo de contaminantes.
	2-3	1×10^{12}	
	3-4	1×10^{10}	
	4-1	1×10^{12}	
	2-4	1×10^{12}	
L2-2(B)	1-2	2×10^{14}	Parte do espaçador apresenta partículas de sal aderidas na superfície.
	2-3	8×10^{13}	
	3-4	4×10^{14}	
	4-1	4×10^{15}	
	2-4	2×10^{15}	
L2-3(B)	1-2	3×10^{11}	Medidas 2-3 e 3-4: Presença de trilhamento e contaminantes (sal) no berço.
	2-3	3×10^{11}	
	3-4	4×10^8	
	4-1	4×10^9	
	2-4	2×10^{11}	
L2-4(B)	1-2	8×10^{13}	
	2-3	2×10^{15}	
	3-4	1×10^{14}	
	4-1	9×10^{14}	
	2-4	3×10^{15}	

As medidas de resistência de isolamento vêm confirmar os resultados obtidos na inspeção visual e na termografia. Os espaçadores com maior rugosidade superficial, aspereza e rebarbas apresentaram maior acúmulo e aderência de contaminantes na superfície, maior ocorrência de trilhamento elétrico e redução da resistência de

isolamento, isto é, tiveram pior desempenho. Os espaçadores devem apresentar superfícies lisas e uniformes, não devendo apresentar rebarbas, asperezas, fissuras ou inclusões [50].

A nova metodologia mostrou-se eficaz para a avaliação de conjuntos espaçador-amarração e mais completa que a metodologia utilizada atualmente, pois a nova conta não somente com o recurso de inspeção visual destes materiais, mas também com termografias e ensaios de resistência.

Também, podem-se fazer associações entre o ensaio de multiestressamento e as simulações computacionais. Com o ensaio de multiestressamento notou-se, em isoladores poliméricos tipo pino, acúmulo de sal próximos da região de apoio do cabo coberto (cabeça do isolador) e pontos com corrente de fuga. Justamente nestas regiões dos isoladores foi notada, por meio das simulações computacionais, maior concentração de campo elétrico, indicando que nestes pontos críticos, que já possuem campo elétrico com valores acima dos outros pontos do isolador, o acúmulo salino pode colaborar para a falha de isolamento. Ainda, com o ensaio de multiestressamento, além de acúmulo salino e trilhamento elétrico, notou-se alterações superficiais em regiões próximas dos braços de amarração dos espaçadores poliméricos. As simulações computacionais para o espaçador polimérico indicam maior concentração de campo elétrico em pontos próximos das fases, ou seja, regiões próximas dos braços de amarração. O campo elétrico que, nestas regiões, já possui maior valor que os demais, pode ser intensificado quando o espaçador está sujeito a defeitos, como bolhas, e a estresses múltiplos, podendo vir a degradar o material isolante.

5 CONCLUSÕES

As conclusões referentes às simulações foram as seguintes:

- em todos os isoladores tipo pino notou-se pequenas variações de campo elétrico em pontos fora do isolador, já em seu interior (pontos 10 a 15) houve grandes modificações em seus valores, sendo que os isoladores com bolhas e com pino solto em cima apresentaram alterações mais evidentes.
- no isolador tipo bastão com defeito foram notadas pequenas mudanças no comportamento do campo elétrico externo ao material, quando comparado com o isolador bastão sem defeito. Na região onde ocorreu a falta de adesão houve elevação do campo elétrico, pois a permissividade naquela região havia diminuído.
- no espaçador com defeito as maiores diferenças de campo elétrico foram notadas no ponto 6, local da bolha, evidenciando novamente a maior concentração de campo elétrico em regiões onde ocorrem os vazios.

As conclusões referentes ao ensaio de multiestressamento e às medidas de resistência ao isolamento foram as seguintes:

- com o sistema de aquecimento desligado (tensão aplicada, sem corrente) foi observado fuga de corrente em todos os espaçadores do fabricante B. Os espaçadores do fabricante C apresentaram, após 40 dias de ensaio, corrente de fuga em intensidade muito baixa, indicando seu melhor desempenho frente à condição de multiestressamento imposta no ensaio.
- com o sistema de aquecimento ligado (tensão aplicada, com corrente) foi notado ocorrência de trilhamento no cabo protegido logo após 15 dias de ensaio.
- os anéis de amarração do fabricante C apresentaram melhor desempenho em relação aos do fabricante B.
- as medidas de resistência de isolamento apresentaram redução acentuada (de até 6 ordens de grandeza) nos espaçadores do fabricante B, confirmando seu pior desempenho frente ao espaçador do fabricante C.
- as medidas de resistência de isolamento confirmam os resultados obtidos na inspeção visual e na termografia. Os espaçadores com maior rugosidade superficial, aspereza e rebarbas apresentaram maior acúmulo e aderência de

contaminantes na superfície, maior ocorrência de trilhamento elétrico e redução da resistência de isolamento, isto é, tiveram pior desempenho.

- a termografia apresentou-se como uma ferramenta eficiente para avaliar o processo de fuga de corrente nos espaçadores e para identificar pontos de ocorrência de trilhamento elétrico.

Associações entre o ensaio de multiestressamento e as simulações computacionais foram realizadas, comparando pontos críticos de degradação de isoladores e espaçadores poliméricos, encontrados no ensaio de multiestressamento, com os pontos de maior concentração de campo elétrico destes isoladores e espaçadores, encontrados por meio das simulações.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Utilizando o software Comsol Multiphysics®, realizar simulação dos esforços mecânicos a que os acessórios da rede compacta estão sujeitos.
- Simular esforços elétricos e mecânicos em isoladores com defeitos reais, conseguindo a geometria do isolador através de tomografia.

REFERÊNCIAS

- 1 DOI, H.; MIYUACHI, H.; MATSUMOTO, M. T. **Cabos cobertos com XLPE para linhas de distribuição.** Mundo Elétrico, p. 90-93, 1987.
- 2 NISHIMURA, F.; CICARELLI, L. D.; MARTINS, J. P. **Rede aérea isolada e protegida de média tensão.** Eletricidade Moderna, n. 241, p. 68-73, 1994.
- 3 SOTILLE, C. A.; PINHEIRO, W. **Aplicação de cabos protegidos.** Revista Electron, p. 14-22, Dez. 1989.
- 4 LOOMS, J. S. T. **Insulators for High Voltages.** Peter Peregrinus Ltda. Elgland. 1988.
- 5 MELLO, R.; JÚNIOR, D. C.; BATISTA, T.; MARCONY R.; MELLO, J. **Avaliação do grau de poluição em instalações de transmissão, subestações e distribuição.** I CITENEL, Congresso de Inovação Tecnológica, Brasília, 2001.
- 6 GODOI, W. C.; SILVA, R. R.; SWINKA FILHO, V.; LODDI, T. **Detecção de defeitos em isoladores poliméricos por meio de radiografia digital e reconhecimento de padrões.** Espaço Energia, Edição 2, Abril de 2005.
- 7 MUNARO, M. **Avaliação da degradação do polietileno, empregado em equipamentos para distribuição de energia elétrica, através da temperatura de oxidação medida por calorimetria diferencial de varredura (DSC).** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Programa Interdisciplinar de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.
- 8 SOARES, M. R. **Novo padrão da CEMIG eleva níveis de confiabilidade.** Eletricidade Moderna, n. 291, p. 50-63, 1998.
- 9 SILVA, G. C. **Comportamento elétrico e dielétrico de cabos de potência extrudados utilizados em redes de distribuição de energia elétrica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais - Programa Interdisciplinar de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.
- 10 PARANHOS, J.; CARON, L. E.; MUNARO, M.; PIAZZA, F. **Acompanhamento comparativo entre ensaios de laboratório e desempenho de campo de materiais poliméricos de redes compactas protegidas de distribuição de 13,8 kV.** 4º Encontro Luso-Afro Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia. Rio de Janeiro, 1999.
- 11 VELASCO, G. D. N.; LIMA, A. M. L. P.; COUTO, H. T. Z. **Análise comparativa dos custos de diferentes redes de distribuição de energia elétrica no contexto de arborização urbana.** Revista *Árvore*, Viçosa – MG, v. 30, n. 4, p. 679-686, 2006.
- 12 Norma Técnica de Distribuição CELG. **Isolador tipo pino polimérico classes 15 e 36,2 kV – Especificação e Padronização.** NTD-24. L. F. N. Rodrigues, A. Almeida, M. R. Silva. Goiás, 2001.

-
- 13 QUEIROZ, I. B.; NERI, M. G. G.; COSTA, E. G. **Mapeamento do campo elétrico em isoladores poliméricos com defeitos**. SBSE 2006 – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, PB. 2006.
- 14 Norma Técnica COPEL – NTC. Materiais de Distribuição – Especificação. Isolador de ancoragem tipo bastão. NTC 81009. Roberto Cambuí. Paraná. Janeiro/2006.
- 15 DUARTE, J. V. P. **Danos à camada isolante de cabos cobertos em redes não blindadas devido a distorções do campo elétrico na proximidade de objetos aterrados**. Trabalho da disciplina Teoria Eletromagnética, PPGEE, UFMG, 2001.
- 16 REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1988.
- 17 BASSIOUNI, M. E.; AL-SHAMY, F.; MADI, N. K.; KASSEM, M. E. **Temperature and electric field effects on the dielectrics dispersion of modified polyvinyl chloride**. Science Direct, Material Letters 57 (2003) 1595-1603.
- 18 PEEK, F. W. **Dielectric phenomena in high voltage engineering**. New York: Mc Graw Hill Bookb Company. 1929.
- 19 MARTINS, N. **Introdução à teoria da eletricidade e do magnetismo**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1994.
- 20 MACHADO, K. D. **Teoria do Eletromagnetismo**, Volume I, 2ª edição. Ponta Grossa: Editora da UEPG, 2004.
- 21 Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, CESP, CPFL, ELETROPAULO, EPUSP, IEE/USP. **Introdução ao comportamento dos isolantes empregados em cabos para redes aéreas isoladas**. Nota técnica, Maio 1994.
- 22 FILHO, V. S. **Imagens de defeitos por descarga parcial estimulada por raio X pulsado em materiais dielétricos**. Tese de doutorado. PIPE, UFPR, 2000.
- 23 CHAMPION, J. V.; DODD, S. J. **Systematic and reproducible partial discharge patterns in an epoxy resin**. IEEE 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, p. 339-343, 1995.
- 24 KREUGER, F. H. **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment**. Butterworths, 1989.
- 25 CABUSSU, M. S.; CHAVES, C. S.; CERQUEIRA, D. P.; PORTELLA, K. F.; PIAZZA, F.; INONE, P. C. **Estudo dos efeitos da poluição atmosférica em isoladores de distribuição e métodos alternativos para minimizá-los**. Curitiba: COELBA – LACTEC, 2005. Relatório Técnico.
- 26 DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J. C. **Electrical degradation and breakdown in polymers**. London: Peter Peregrinus, 1992.

-
- 27 TOMCZAK, F. **Correlação entre ensaios de resistência ao trilhamento elétrico.** Dissertação de mestrado. PIPE, UFPR, 2000.
- 28 YOSHIMURA, N.; NISHIDA, M; NOTO, F. **Influence of the electrolyte on tracking breakdown of organic insulating materials.** IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 16, n. 6, p. 510-520, dezembro 1981.
- 29 WERNECK, M. M.; MACIEL, F. L.; CARVALHO, C. C.; RIBEIRO, R. M; PORCIUNCULA, P. **Desenvolvimento de sistema de detecção e monitoramento de correntes de fuga em isoladores através de fibra óptica.** Anais do II Citenel COPPE/UFRJ, 2003.
- 30 ZHAO, X.; LI, Z.; CHEN, Y.; SHI, L.; ZHU, Y.. **Solid-phase photocatalytic degradation of polyethylene plastic under UV and solar light irradiation.** Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, v. 268, p. 101-106, 2007.
- 31 MONTANARI, G. C.; SIMONI, L. **Aging Phenomenology and Modeling.** IEEE Trans. Elect. Insul., vol. 28, n. 5, p. 775-776, Oct. 1993.
- 32 DENSLEY, R. J.; BARTNIKAS, R.; BERNSTEIN, B. **Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Drycured Insulation Systems for Power Transmission Cables.** IEEE Trans. Power Del., vol. 9, n. 1, p. 559-571, Jan. 1994.
- 33 FECHINE, J.M.; SANTOS, J. B.; RABELLO, M. S. **Avaliação da fotodegradação de poliolefinas através de exposição natural e artificial.** Química Nova. vol.29 n. 4 São Paulo July/Aug. 2006.
- 34 ALLEN, N. S. Engineering Plastics, edição 8, página 247, 1995.
- 35 MUNARO, M.; PIAZZA, F.; SOUZA, G.; TOMIOKA, J.; RUVOLO, A.; LINERO, E. **Fatores de influência na compatibilidade de cabos protegidos, isoladores e acessórios utilizados em redes aéreas compactas de distribuição de energia elétrica, sob condições de multiestressamento.** II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica. p. 555 a 560. 2003.
- 36 MALIK, N. H.; AL-ARAINY, A. A.; QURESHI, M. I. **Electrical in Power Systems.** New York: Marcel Dekker, 1998.
- 37 TOMIOKA, J. **Implementação da Técnica do Pulso Eletroacústico para medidas de perfis de campo elétrico em materiais dielétricos.** Tese de doutorado IFSC/USP, 1999.
- 38 IEC – 60216-1 – **Guide for the determination of thermal endurance properties os electrical insulating materials.** Part 1: general guidelines for ageing procedures and evaluation of test results. May, 1990.
- 39 OLIVEIRA, G. M. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), 2003.

-
- 40 CARDOSO, J. R. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Publicação independente.
- 41 SABONNADIÈRE, J. C.; COULOMB, J. L. **Elementos finitos e CAE, aplicações em Engenharia Elétrica**. São Paulo: Editora Aleph., 1993.
- 42 **FEMLAB 3.1, User's guide**. ©Copyright 1994-2004 by COMSOL AB. October 2004.
- 43 Meyer, L.H.; Cherney, E.A.; Jayaram, S. H. **The role of inorganic fillers in silicone rubber for outdoor insulation alumina tri-hydrate or silica**. Electrical Insulation Magazine, IEEE. Volume 20, Issue 4, July-Aug. 2004 Page(s): 13 - 21
- 44 PAPAZYAN, R. Seminar on "**Modeling of the wave propagation properties of power cables using Femlab**". October, 16, 2002, Gothenburg
- 45 WEI, H. J.; JAYARAM, S.; CHERNEY, E. **A study of electrical stress grading of composite bushings by means of a resistive silicone rubber coating**. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ont, Canada. ScienceDirect, Journal of Electrostatics. Volume 63, Issues 3-4, March 2005, Pages 273-283 November 2004. Available online 29 December 2004.
- 46 Documento Técnico ABRASEE 18.27 – **Especificação de isoladores tipo pino polimérico para redes compactas 13,8 e 34,5 kV**. 2000.
- 47 Norma ASTM-D-150, ABRADDEE – 18.24 – **Especificação de espaçador, separador e amarrações para rede compacta de 13,8 kV e 34,5 kV**. 2000.
- 48 Norma CODI 3.2.18.24. **Especificação de Espaçadores e Amarrações para Rede Compacta de 15 kV**, item 6.5.4.2.
- 49 MALIK, N. H.; AL-ARAINY, A. A.; QURESHI, M. I. **Electrical in Power Systems**. New York: Marcel Dekker, 1998.
- 50 Norma CODI 3.2.18.24.1 – **Especificação de espaçador, separador e amarrações para rede compacta de 13,8 kV e 34,5 kV**. Item 4.3.