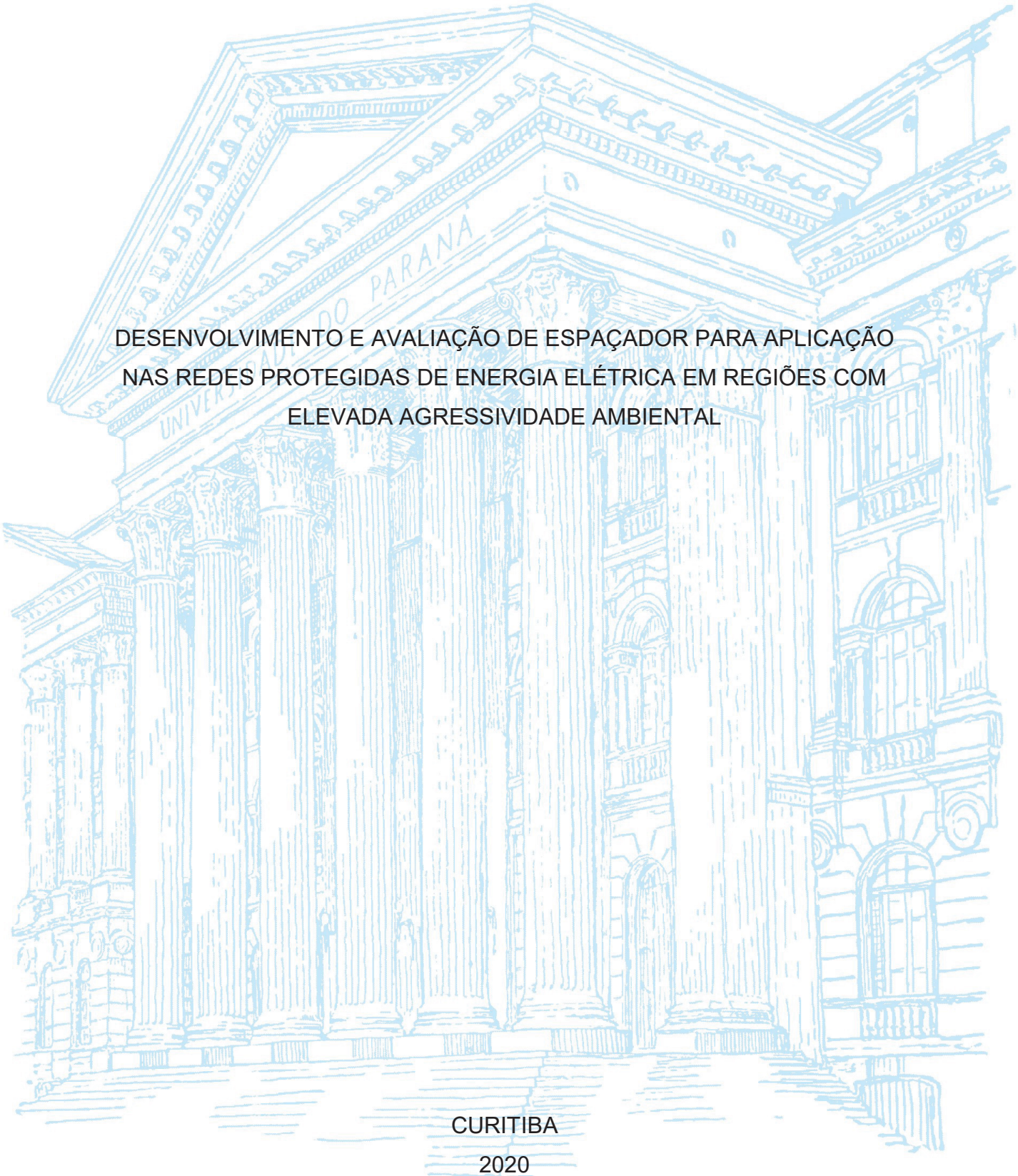
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SIGNIE LAUREANO FRANÇA SANTOS



DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE ESPAÇADOR PARA APLICAÇÃO NAS REDES PROTEGIDAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM REGIÕES COM ELEVADA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

CURITIBA

2020

SIGNIE LAUREANO FRANÇA SANTOS

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE ESPAÇADOR PARA APLICAÇÃO NAS REDES PROTEGIDAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM REGIÕES COM ELEVADA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Pós-Graduação em Engenharia – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Marilda Munaro

CURITIBA

2020

Catalogação na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S237d Santos, Signie Laureano França
Desenvolvimento e avaliação de espaçador para aplicação nas redes protegidas de energia elétrica em regiões com elevada agressividade ambiental [recurso eletrônico] / Signie Laureano França Santos. – Curitiba, 2020.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2020.

Orientador: Marilda Munaro .

1. Redes elétricas. 2. Energia elétrica – Distribuição. 3. Compósitos poliméricos. 4. Campo elétrico. I. Universidade Federal do Paraná. II. Munaro, Marilda. III. Título.

CDD: 621.3192

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIENCIAS EXATAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS - 40001016033P9

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **SIGNIE LAUREANO FRANÇA SANTOS** intitulada: **Desenvolvimento e avaliação de espaçador para aplicação nas redes protegidas de energia eletrica em regiões com elevada agressividade ambiental**, sob orientação da Profa. Dra. MARILDA MUNARO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.
A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 19 de Fevereiro de 2020.

MARILDA MUNARO
Presidente da Banca Examinadora

VITOLDO SWINKA FILHO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

JEFERSON FERREIRA DE DEUS
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

CARLOS FUSUO YAMAMOTO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

ANDRE EUGENIO LAZZARETTI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus queridos pais, Eliana e Denizar, por todo apoio, incentivo e amor ao longo destes anos de curso, e acima de tudo, por terem me ensinado de maneira tão sutil a importância dos estudos para minha vida pessoal e profissional.

Agradeço também ao meu querido esposo Daniel por todo carinho dispensado a mim e por estar sempre ao meu lado durante a realização deste trabalho.

À minha orientadora, Dra. Marilda Munaro, agradeço pelo incentivo, compreensão, apoio, excelente orientação para o desenvolvimento do trabalho e ainda a sua amizade ao longo desses anos.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE) pela oportunidade.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), pelas condições proporcionadas para a realização desse trabalho e à Celesc pela parceria na pesquisa desenvolvida.

Aos amigos e colegas de trabalho, em especial ao professor Dr. Edemir Luiz Kowalski, pela cooperação e amizade desde o início desta jornada e o incentivo para a minha qualificação profissional.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os estudos que conduziram a concepção de um novo espaçador polimérico para redes protegidas compactas de classe de tensão 15 kV, a ser aplicado em regiões com elevada agressividade ambiental. Para o desenvolvimento foram realizados estudos científicos direcionados principalmente ao mecanismo de degradação por trilhamento elétrico, em função da ocorrência do fenômeno de descargas parciais superficiais, e a correlação deste com a intensidade de campo elétrico e com as características dos materiais dielétricos. Nestes estudos foram avaliadas a geometria do espaçador e a influência de resíduos superficiais de poluição e maresia com umidade para a definição de projeto inovador (com geração de patente de modelo de utilidade - PU n. BR 20 2015 018640 7) de espaçador de redes protegidas de classe 15 kV. Foram fabricados protótipos considerando o projeto proposto e a utilização de formulação de HDPE aditivado. Para a avaliação dos protótipos foram realizados ensaios normalizados, obtendo-se aprovação, e ensaios com condições mais severas, nos quais os espaçadores apresentaram resistência ao trilhamento elétrico. Em campo, após mais de 12 meses em operação em redes protegidas de região com elevada agressividade ambiental, os resultados de inspeção visual também indicaram resistência à ocorrência de trilhamento elétrico superior aos espaçadores convencionais.

Palavras chave: Espaçadores, Materiais Poliméricos, Campo Elétrico, Trilhamento Elétrico, Elevada Agressividade Ambiental.

ABSTRACT

This work presents the studies that led a new polymeric spacer design for 15 kV voltage compact overhead networks to be applied in regions with high environmental aggressiveness. For the development were carried out scientific studies directed mainly to the mechanism of degradation by electrical tracking, due to the occurrence of the phenomena of superficial partial discharges, and its correlation with the electric field intensity and the characteristics of the dielectric materials. In these studies, the spacer geometry and the influence of surface contaminants and humidity were evaluated for the definition of innovative design (with utility model patent generation - PU n. BR 20 2015 018640 7) for spacer to 15 kV overhead compact networks. The prototypes were manufactured considering the proposed design and the use of polymeric material formulations with additives. For the evaluation of the prototypes, standardized tests were performed, obtaining approval, and tests with more severe conditions, in which the spacers presented good performance in the electrical tracking resistance. In the field, after more than 12 months in operation in overhead compact network in areas with high environmental aggressiveness, the visual inspection results also indicated good resistance to the occurrence of electrical tracking.

Key words: Spacers, Polymeric Materials, Electric Field, Electrical Tracking, High Environmental Aggressiveness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais elementos da rede aérea protegida [O Autor] 1

Figura 2 – Material dielétrico formado por dipolos intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo [7] 9

Figura 3 – Dielétrico formado por dipolos (Vetores polares) intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo - E, e a formação dos campos elétricos associados aos dipolos - E_D e total interno resultante E_M [7] 10

Figura 4 – Moléculas apolares em um dielétrico sem vetores polares intrínsecos: (a) sem atuação de campo elétrico externo, (b) com atuação de campo elétrico externo [9] 10

Figura 5 – Quatro tipos de descargas parciais: (a) descarga corona, (b) descarga superficial, (c) descarga interna e (d) descarga em arborescência elétrica [Adaptado de 6] 16

Figura 6 – Descargas parciais em cavidades [Adaptado de 32]..... 17

Figura 7 – Representação da descarga parcial superficial em materiais dielétricos [Adaptado de 35] 18

Figura 8 – Curva de Paschen para o ar [27]..... 20

Figura 9 – Ilustração do processo de trilhamento elétrico: Modelo proposto por Malik [41] 22

Figura 10 – Índice médio de duração de interrupções em redes protegidas, redes híbridas (condutores protegidos e isoladores de porcelana) e redes aéreas convencionais com condutores nus em Orizaba – México [Adaptado de 5] 30

Figura 11 – Padrão de redes protegidas de estruturas em tangente 31

Figura 12 – Padrão de redes protegidas de estruturas em ângulo..... 32

Figura 13 – Espaçador losangular [O Autor] 34

Figura 14 – Anel de amarração 35

Figura 15 – Laço pré-formado 35

Figura 16- Modelo de espaçador com garras para fixação dos cabos 35

Figura 17 – Espaçador 1 derretido durante ensaio de compatibilidade dielétrica com cabo do fabricante 1 [4] 41

Figura 18 – Danos no espaçador 2 após ensaio de compatibilidade dielétrica com cabo 4 [4]..... 41

Figura 19 – Danos no espaçador 2 após 4 meses no campo [4] 42

Figura 20 – Danos nos cabos após 12 meses no campo [4]..... 42

Figura 21 – Discretização de um domínio em sub-regiões [85]..... 47

Figura 22 – Elementos finitos mais usuais: (a) para 2D e (b) para 3D [86] 47

Figura 23 – Processo para o cálculo das tensões nos elementos finitos de primeira ordem 48

Figura 24 – Geometria base utilizada nas simulações com os materiais especificados para os domínios do problema 54

Figura 25 – Representação das bandas condutivas nas superfícies do berço do espaçador e do cabo..... 55

Figura 26 – Representação de uma camada semicondutora no berço do espaçador..... 56

Figura 27 – Exemplo da malha gerada no software para resolução do método dos elementos finitos..... 57

Figura 28 – Tensões alternadas da rede trifásica de 13,8 kV rms e o instante *T1* utilizado nas simulações computacionais..... 58

Figura 29 - Pontos estabelecidos para aplicação de força..... 60

Figura 30 – Representação esquemática do arranjo experimental 61

Figura 31 – Detalhe da montagem e disposição dos espaçadores..... 61

Figura 32 - Arranjo experimental..... 63

Figura 33 – Imagem do espaçador durante o ensaio de resistência a tração curta duração 65

Figura 34 – Tensões elétricas no espaçador convencional..... 66

Figura 35 – Campo elétrico no projeto base do espaçador convencional 3D .. 67

Figura 36 – Campo elétrico no projeto base do espaçador convencional 2D .. 69

Figura 37– Campo elétrico no projeto base do espaçador convencional com escala alterada (regiões em branco possuem campo superior ao da escala).. 69

Figura 38 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional 70

Figura 39 – Permissividades elétricas nos domínios modelados: ar e HDPE .. 71

Figura 40 – Intensidade de campo elétrico na região da interface ar + cabo + espaçador..... 71

Figura 41 – Campo elétrico no berço da Fase A do espaçador convencional com bandas condutivas na superfície dos seus berços e cabos 72

Figura 42 – Permissividades elétricas nos domínios modelados: ar, espaçador e camada de proteção do cabo, e bandas condutivas 73

Figura 43 – Campo elétrico interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas para o espaçador convencional..... 73

Figura 44 – Campo elétrico interface (ampliada) ar + cabo + espaçador + bandas condutivas para o espaçador convencional..... 74

Figura 45 – Intensidade de campo elétrico máximo e médio na área preenchida por ar na região da interface 75

Figura 46 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 20% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços 76

Figura 47 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 40% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços 77

Figura 48 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 60% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços 77

Figura 49 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 80% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços 78

Figura 50 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 100% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços 78

Figura 51 – Intensidade de campo elétrico máximo na interface ar + cabo + espaçador +bandas condutivas da fase A em função da porcentagem de aumento da dimensão do espaçador 79

Figura 52 – Comparação da intensidade de campo elétrico no espaçador convencional (esquerda) e com camada semicondutora nos berços (direita).. 81

Figura 53 – Comparação da intensidade de campo elétrico no espaçador convencional (esquerda) e com camada semicondutora nos berços (direita) na interface cabo + ar + semicondutora + berço do espaçador 82

Figura 54 – Campo elétrico no espaçador com camada semicondutora nos berços 83

Figura 55 – Campo elétrico no espaçador com alongamento e acréscimo de aletas..... 83

Figura 56 – Comparação da intensidade de campo elétrico no espaçador convencional (esquerda) e com menor quantidade de ranhuras nos berços (direita) 84

Figura 57 – Detalhes do espaçador E-3 sem alterações nas interfaces entre o condutor e o espaçador e também internamente ao espaçador: a) vista geral, b) berço direito..... 85

Figura 58 - Detalhes do espaçador E-4 com sinais de trilhamento internamente ao espaçador: a) vista geral, b) berço esquerdo 85

Figura 59 – Detalhes do espaçador E-1 com erosões e trilhamento no cabo e no espaçador: a) berço superior esquerdo, b) berço inferior..... 86

Figura 60 – Detalhes do espaçador E-2 com erosões e trilhamento no cabo e no espaçador: a) berço superior direito, b) berço inferior..... 87

Figura 61 – Novo desenho proposto para o espaçador para redes protegidas em regiões de elevada agressividade ambiental..... 89

Figura 62 – Campo elétrico no novo projeto proposto para o espaçador de redes protegidas com elevada agressividade ambiental 91

Figura 63 – Campo elétrico no projeto proposto para o espaçador de redes protegidas com elevada agressividade ambiental com escala alterada (regiões em branco possuem campo superior ao da escala) 91

Figura 64 – Campo elétrico no berço da Fase A do projeto do espaçador de redes protegidas com elevada agressividade ambiental considerando bandas condutivas na superfície dos seus berços e cabos 92

Figura 65 - Campo elétrico na interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas do projeto do espaçador de redes protegidas 92

Figura 66 - Simulação de deformação mecânica do espaçador convencional. 94

Figura 67 – Simulação de deformação mecânica do projeto do espaçador desenvolvido 94

Figura 68 – Vista frontal do projeto de espaçador desenvolvido 96

Figura 69 – Vista lateral esquerda do projeto de espaçador desenvolvido 96

Figura 70 – Vista lateral direita do projeto de espaçador desenvolvido 97

Figura 71 - Inspeção visual do protótipo de espaçador com material AM 98

Figura 72 - Inspeção visual do protótipo de espaçador com material AZ 99

Figura 73 - Termografia do protótipo de espaçador AM 99

Figura 74 - Termografia de protótipo de espaçador AZ 100

Figura 75 - Inspeção visual do espaçador C1 100

Figura 76 - Inspeção visual do espaçador C2 101

Figura 77 - Imagens do espaçador AZ: a) no arranjo experimental; b) durante inspeção visual 101

Figura 78 – Imagens do espaçador AM: a) no arranjo experimental; b) durante inspeção visual 102

Figura 79 - Imagens do espaçador AZ: a) sinais de trilhamento e erosão no corpo do espaçador; b) centelhamento na região de trilhamento e erosão durante período de aspersão de névoa condutiva 102

Figura 80 - Imagens do espaçador AZ: a) sinais de trilhamento e erosão no corpo do espaçador; b) sinais de trilhamento e erosão no berço do espaçador 103

Figura 81 - Imagem do espaçador AM sem vestígios de trilhamento ou erosão 103

Figura 82 - Imagem do espaçador AZ com trilhamento e erosão no corpo do espaçador..... 104

Figura 83 - Imagem do espaçador AM sem vestígios de trilhamento ou erosão 104

Figura 84 – Protótipos de espaçadores sendo instalados em rede protegida de região com elevada agressividade ambiental..... 108

Figura 85 - Rede protegida a 200 m da orla marítima com protótipos de espaçadores desenvolvidos 108

Figura 86 - Rede protegida em frente à orla marítima com protótipos de espaçadores desenvolvidos 109

Figura 87 – Imagens do espaçador instalado nas redes piloto: imagem geral do espaçador..... 109

Figura 88 - Imagens do espaçador instalado nas redes piloto: a) detalhe na região de amarração cabo espaçador e anel b) detalhe da região de amarração como o cabo mensageiro 110

Figura 89 – Imagens do espaçador AM e detalhes das regiões de fixação com o cabo no qual não é observado trilhamento 111

Figura 90 – Imagens do espaçador AZ e detalhe das regiões de fixação com o cabo onde um dos cabos condutores apresenta trilhamento 112

Figura 91 – Imagens do espaçador instalado na rede piloto e detalhes as regiões de fixação com o cabo 113

Figura 92 – Imagens do espaçador substituído na rede piloto..... 114

Figura 93 – Detalhes do espaçador, confeccionado com o polímero AM, retirado da rede piloto mais próximo da orla marítima..... 114

Figura 94 – Detalhes do espaçador, confeccionado com o polímero AZ, retirado da rede piloto mais próximo da orla marítima..... 114

Figura 95 – a) Imagem do espaçador com indicação das regiões onde foi observado erosão; b e c) Imagens das regiões com erosão nos espaçadores retirados de campo..... 115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e elétricas do LDPE e do HDPE [O Autor] 12

Tabela 2 - Composições das formulações 27

Tabela 3 – Características elétricas requeridas para os espaçadores 34

Tabela 4 – Resultado dos ensaios físicos, químicos e elétricos do material polimérico dos espaçadores [76] 43

Tabela 5 – Propriedades obtidas nos ensaios das amostras das formulações escolhidas 52

Tabela 6 – Características dos materiais utilizados nas simulações de campo elétrico 56

Tabela 7 – Parâmetros do HDPE utilizados para a simulação mecânica 59

Tabela 8 – Equipamentos e montagens dos ensaios de compatibilidade dielétrica 62

Tabela 9 - Resultados das medições das cotas realizadas no espaçador com formulação AM após ensaio de tração longa duração 106

Tabela 10 - Resultados das medições das cotas realizadas no espaçador com formulação AM após ensaio de tração longa duração 106

Tabela 11 – Máxima força suportada pelos espaçadores antes e após o envelhecimento em estufa 107

LISTA DE SIGLAS

AHT - Alumina Tri-Hidratada

DTMA – Análise Termodinâmica Mecânica

DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

LDPE – Polietileno de Baixa Densidade

LLDPE – Polietileno Linear de Baixa Densidade

PVC – Policloreto de Polivinila

ULDPE – Polietileno de Ultra Baixa Densidade

HMWPE - Polietileno de Alto Peso Molecular

UHMWPE – Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

UV – Ultravioleta

XLPE – Polietileno Reticulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 Objetivos 4

1.1.1 Objetivo Geral 4

1.1.2 Objetivos Específicos 4

1.2 Justificativa 5

1.3 Estrutura do Trabalho 6

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8

2.1 Materiais Dielétricos 8

2.1.1 Polietileno 11

2.1.2 Mecanismos de Degradação e Envelhecimento em Polímeros 14

2.2 Redes Aéreas Protegidas 28

2.2.1 Padrão Construtivo 31

2.2.2 Operação em Regiões de Elevada Agressividade Ambiental 35

2.3 Simulações Computacionais 45

2.3.1 Método dos Elementos Finitos 46

3 METODOLOGIA 50

3.1 Materiais 52

3.2 Equipamentos 53

3.3 Métodos 54

3.3.1 Simulações de Campo Elétrico 54

3.3.2 Simulações de Esforços Mecânicos 59

3.3.3 Ensaios de Compatibilidade Dielétrica – Multiestressamento (Etapa de Desenvolvimento do Projeto) 60

3.3.4 Ensaios de Multiestresamento (Etapa de Avaliação dos Protótipos) 62

3.3.5 Ensaios para Verificação de Conformidade com Requisitos Normalizados quanto aos Esforços Mecânicos 64

3.3.6 Avaliação em Campo 65

4 DESENVOLVIMENTO DE ESPAÇADOR PARA REDES PROTEGIDAS DE REGIÕES COM ELEVADA AGRESSIDIVADE AMBIENTAL 66

4.1 Simulações Computacionais de Campo Elétrico 66

4.2 Ensaio de Compatibilidade Dielétrica – Multiestressamento 84

4.3 Projeto do Espaçador para Redes Protegidas de Regiões de Elevada Agressividade Ambiental 87

4.3.1 Avaliação do Projeto de Espaçador de Redes Protegidas de Regiões de elevada Agressividade Ambiental 90

4.4 Protótipos de Espaçador para Redes Protegidas de Regiões com Elevada Agressividade Ambiental 95

5 AVALIAÇÃO DE ESPAÇADOR PARA REDES PROTEGIDAS DE REGIÕES COM ELEVADA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL 98

5.1 Ensaio de Multiestressamento 98

5.1.1 1° Ensaio 98

5.1.2 2° Ensaio 102

5.1.3 Análise dos Resultados 105

5.2 Ensaios Verificação de Conformidade dos Protótipos com Requisitos Normalizados 105

5.2.1 Resistência à Tração de Longa Duração 105

5.2.2 Resistência à Tração de Curta Duração 107

5.2.3 Outros ensaios 107

5.3 Instalação e Avaliação em Campo 107

5.3.1 Análise dos Resultados 116

6 CONCLUSÕES 117

6.1 Trabalhos Futuros 119

REFERÊNCIAS 120

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos têm-se observado o desenvolvimento e o crescimento urbano de cidades de médio e grande porte, sendo assim necessário adequar as infraestruturas das redes de distribuição de energia elétrica, conciliando eficiência e baixo custo na instalação, bem como redução das atividades de manutenção. Neste sentido, em função da minimização dos impactos causados pela implantação da rede e a maior confiabilidade do fornecimento de energia, as concessionárias distribuidoras de energia elétrica têm optado pela instalação de redes aéreas protegidas.

A rede aérea protegida, também conhecida como rede compacta, é composta por um cabo mensageiro de aço que sustenta os cabos de fases cobertos com material polimérico. O cabo mensageiro é fixado aos postes através de braços suportes metálicos e os cabos de fases (dispostos em arranjo triangular compacto) são fixados em espaçadores poliméricos que são instalados ao longo dos vãos entre postes com a função de sustentação e separação elétrica. Outros acessórios presentes nas redes aéreas protegidas são os sistemas de fixação do conjunto cabo-espaçador (anéis de amarração ou sistema de fixação incorporado), e os isoladores para fixação dos cabos protegidos junto às cruzetas dos postes. Na Figura 1 estão ilustrados os principais elementos presentes nas redes aéreas protegidas.

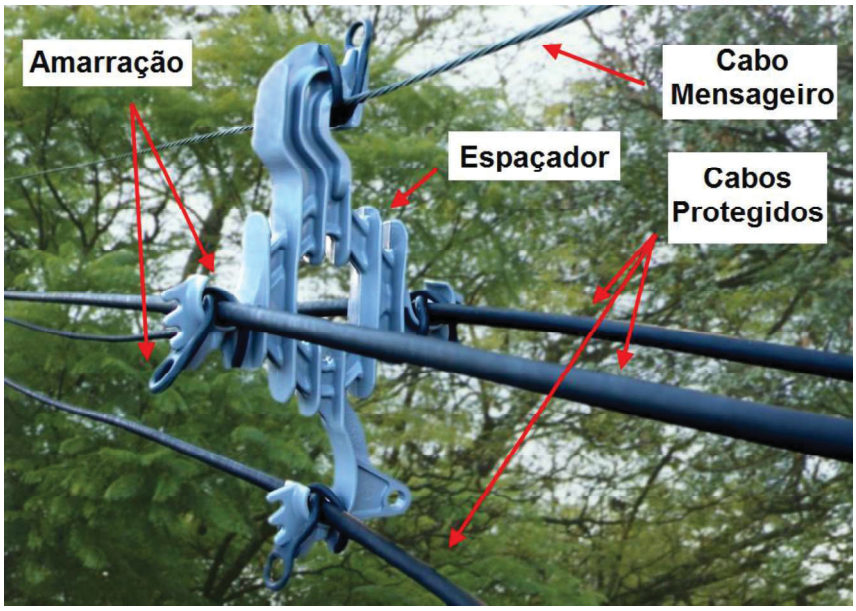


Figura 1 – Principais elementos da rede aérea protegida [O Autor]

O material polimérico utilizado para isolação nos espaçadores e nos cabos protegidos é o polietileno, sendo que para os espaçadores normalmente são utilizados o polietileno de alta densidade (HDPE) e o polietileno de baixa densidade (LDPE) e para a cobertura dos cabos, além destes, utiliza-se também o polietileno reticulado (XLPE). Alguns materiais utilizados nos acessórios de amarração, particularmente nos anéis de amarração, são o silicone e a borracha de etilenopropileno [1, 2].

Em função da utilização de cabos cobertos e dos espaçadores de material polimérico com valores de permissividade elétrica superiores ao do ar, torna-se possível nas redes aéreas protegidas, em comparação com redes aéreas convencionais (condutores nus), uma maior proximidade entre os condutores, permitindo a compactação da rede com risco de curto-circuito reduzido, maior segurança e ainda implicando em um menor impacto visual. Desta forma, o eventual contato de galhos de árvore na rede de distribuição não interfere no fornecimento de energia elétrica. Outras vantagens da utilização das redes aéreas protegidas são a redução das podas de árvores, uma vez que este tipo de rede utiliza um espaço físico menor em comparação com a rede convencional, custo de implantação menor que o das redes subterrâneas e aéreas com cabos isolados, e a possibilidade de utilização de técnicas construtivas, operacionais e de manutenção semelhantes às utilizadas nas redes aéreas convencionais.

Assim, para melhorar a confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica, principalmente em locais de grande arborização nas vias públicas, são preferencialmente instaladas redes protegidas de distribuição de energia elétrica.

Para os casos de instalação da rede protegida em regiões de baixa agressividade ambiental este tipo de rede tem apresentado bom desempenho e diversos fabricantes oferecem comercialmente espaçadores que atendem às características técnicas e operacionais requeridas para a confiabilidade e a segurança na configuração da rede. Entretanto, tem-se observado que em regiões litorâneas próximas ao mar ou com indústrias que emitem material particulado condutivo que tenha adesão na superfície dos equipamentos, esse tipo de tecnologia de configuração de rede apresenta problemas. Nestas regiões, a atmosfera poluída pode propiciar a redução da suportabilidade dielétrica na

superfície dos materiais isolantes dos espaçadores e cabos das redes protegidas. Entende-se como atmosfera poluída, do ponto de vista elétrico, aquela que em certo período de tempo propicia a formação de uma camada constituída por substâncias que quando dissolvidas em água (umidade ou chuva) produzem soluções condutoras sob a superfície isolante. Assim, são iniciados mecanismos de degradação e envelhecimento acelerados, culminando em vida útil reduzida dos equipamentos e acessórios, em especial dos espaçadores, em redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental. Dentre os mecanismos de degradação e envelhecimento que afetam os equipamentos e acessórios das redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental os principais são o trilhamento elétrico, a erosão, a oxidação e a fotodegradação.

Em casos da instalação de redes protegidas em regiões de elevada agressividade ambiental alguns equipamentos e acessórios apresentaram envelhecimento significativo com menos de 3 (três) meses de operação, acarretando em risco de segurança para terceiros e desligamentos indesejáveis. Em contrapartida, em regiões de baixa ou média agressividade ambiental, o histórico de vida útil para os mesmos equipamentos e acessórios é de no mínimo 20 anos [3, 4, 5].

No caso dos espaçadores das redes protegidas, estes não possuem geometria, dimensões e materiais adequados para instalação em locais de elevada agressividade ambiental, apresentando frequentemente problemas de trilhamento elétrico. O mecanismo de envelhecimento por trilhamento elétrico está relacionado à ocorrência de descargas parciais superficiais, em função de um campo elétrico intenso, e à circulação de uma corrente de fuga. Ambos são influenciados pela presença de poluentes e de umidade no ambiente. A intensidade de campo elétrico por sua vez está diretamente associada a fatores como geometria, dimensão e materiais.

Em função dos problemas apontados, as concessionárias de energia não têm instalado redes protegidas em regiões com intemperismos ambientais severos, uma vez que o mercado não apresenta soluções que possibilitem a operação destas com confiabilidade nestas condições. É importante ressaltar que é de grande interesse para as concessionárias de energia elétrica poder

utilizar a tecnologia de redes protegidas também em regiões de elevada agressividade ambiental, principalmente levando-se em conta que o Brasil é um país com uma grande costa litorânea. Assim observa-se que o estudo e desenvolvimento de um espaçador que eleve a confiabilidade das redes sujeitas a estas condições, apresentará uma contribuição original no campo da Engenharia de Materiais, particularmente nos materiais aplicados na área de Engenharia Elétrica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver, avaliar e testar espaçador adequado para operação com confiabilidade em redes protegidas de 15 kV de regiões com elevada agressividade ambiental.

1.1.2 Objetivos Específicos

Ainda, os seguintes objetivos podem ser listados:

- Estudar os materiais poliméricos empregados no setor elétrico e os mecanismos de degradação destes materiais;
- Estudar o fenômeno de trilhamento elétrico em função de descargas parciais superficiais e sua relação com campo elétrico crítico de ruptura em meios gasosos (ar atmosférico);
- Apresentar as características de redes aéreas protegidas, em particular de espaçadores, e os problemas identificados na operação em regiões com elevada agressividade ambiental;
- Identificar os pontos críticos em relação à intensidade do campo elétrico em espaçadores através da realização de simulações computacionais;
- Avaliar a intensidade de campo elétrico, através de simulações computacionais, em diferentes proposições de geometria e dimensão de espaçadores, bem como a influência da presença de contaminantes superficiais;

- Desenvolver projeto para espaçadores de redes protegidas com maior resistência ao trilhamento elétrico para regiões de elevada agressividade ambiental;
- Avaliar a utilização de formulação de material polimérico aditivado com maior resistência ao trilhamento elétrico em equipamentos do setor elétrico;
- Com base no projeto desenvolvido e em materiais poliméricos aditivados fabricar protótipos de espaçadores para aplicação em regiões com elevada agressividade ambiental;
- Avaliar, através de ensaios laboratoriais, os protótipos de espaçadores antes e após envelhecimento acelerado;
- Instalar e avaliar (inspeção visual) os protótipos de espaçadores em campo em redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental.

1.2 Justificativa

A degradação de materiais dielétricos poliméricos ainda carece de muitos estudos, especialmente na compreensão dos mecanismos que os conduzam a falhas devido à operação em regiões com elevada agressividade ambiental. A diversidade de poluentes envolvidos é grande e a forma de deposição depende de uma série de fatores como: chuvas, direção e velocidade do vento, ocorrência de tempestades, localização geográfica, altitude, etc. Este conhecimento deve subsidiar, dentre outras, ações de melhoria dos equipamentos e acessórios utilizados nas redes elétricas e consequentemente dos materiais empregados nestes, podendo inclusive beneficiar os fabricantes com contribuições científicas para tomada de ações na melhoria destes equipamentos.

Especificamente para os espaçadores de redes protegidas, vê-se como necessária a realização de estudos que permitam o desenvolvimento de equipamentos que possam ser utilizados em redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental com confiabilidade e vida útil requeridas.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 6 capítulos. No capítulo 1 está apresentada a contextualização geral do trabalho, bem como a justificativa para o desenvolvimento e os objetivos propostos, além da contribuição científica envolvida.

No capítulo 2 está apresentada a fundamentação teórica relacionada ao trabalho, contando com as características de materiais dielétricos, em especial poliméricos (polietileno) e com a descrição dos mecanismos de degradação e envelhecimento nestes materiais. Particularmente são destacados os fenômenos de descargas parciais e de trilhamento elétrico em materiais dielétricos poliméricos, em função de serem evidenciados em espaçadores de redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental. Ainda se descreve o processo de aditivação em polímeros com o intuito de melhoria de suas propriedades. No mesmo capítulo também são apresentadas as características de redes aéreas protegidas de distribuição de energia elétrica e dos espaçadores presentes nestas redes. Adicionalmente, foi realizado um levantamento das experiências e problemas em redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental. Ainda no capítulo 2 apresenta-se um breve histórico da utilização de simulações computacionais para avaliação de modelos físicos e a fundamentação teórica do método dos elementos finitos e da física envolvida no cálculo da intensidade de campo elétrico.

No capítulo 3 está descrita a metodologia adotada para a realização do trabalho, bem como a descrição dos materiais, equipamentos e métodos utilizados.

No capítulo 4 são apresentados os estudos e avaliações realizados em relação à distribuição de campo elétrico (através de simulações computacionais e ensaios de compatibilidade dielétrica não-normalizado) para o desenvolvimento do projeto do espaçador de redes protegidas para regiões com elevada agressividade ambiental.

O capítulo 5 apresenta a avaliação de protótipos dos espaçadores desenvolvidos (contando com o projeto proposto e materiais selecionados) em laboratório e em campo.

Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Dielétricos

Materiais dielétricos, de acordo com a origem da denominação, são aqueles que permitem a passagem de campo elétrico ou fluxo elétrico, mas não de partículas (incluindo elétrons). Esta definição implica que os dielétricos não devem conduzir corrente elétrica, portanto, são geralmente considerados materiais não condutores ou isolantes [6].

Assim, um material dielétrico ideal seria aquele que não possui cargas livres, contudo, todos os materiais são compostos de moléculas, que, por sua vez, se constituem de partículas carregadas (núcleos atômicos e elétrons), e são certamente afetadas pela presença de campo elétrico externo [7].

Quando submetidos a um campo elétrico, os materiais dielétricos possuem a propriedade fundamental de serem polarizados. A ação do campo elétrico exerce uma força sobre uma partícula com carga q, sendo as partículas positivas movimentadas no sentido do campo e as negativas no sentido contrário, de modo que as partículas positivas e negativas de cada molécula sejam deslocadas das suas posições de equilíbrio em sentidos opostos. O deslocamento no dielétrico de toda a carga positiva em relação à negativa, limitado pelas forças das partículas contrárias às alterações em suas configurações, corresponde à polarização do material. Desta forma, pode-se dizer que a polarização de um dielétrico é uma forma de ordenamento espacial das partículas eletricamente carregadas existentes no interior do material em função de um campo elétrico externo aplicado [6, 8].

Os mecanismos de polarização em materiais dielétricos podem ser descritos considerando uma de suas características: possuírem dipolos intrínsecos ou não (neste caso com o aparecimento de dipolos induzidos) [7].

No caso do campo elétrico agindo sobre dielétricos que possuem dipolos intrínsecos, por exemplo, a água, tais dipolos são submetidos à ação de forças elétricas, que resultam em torques e tendem a orientar os vetores polares na mesma direção e sentido que o campo externo aplicado. A orientação do alinhamento dos dipolos não é perfeita, uma vez que também é influenciada por

outros fatores, como a temperatura [9]. Uma representação esquemática de um dielétrico, com dipolos intrínsecos, submetido a um campo elétrico E é apresentada na Figura 2.

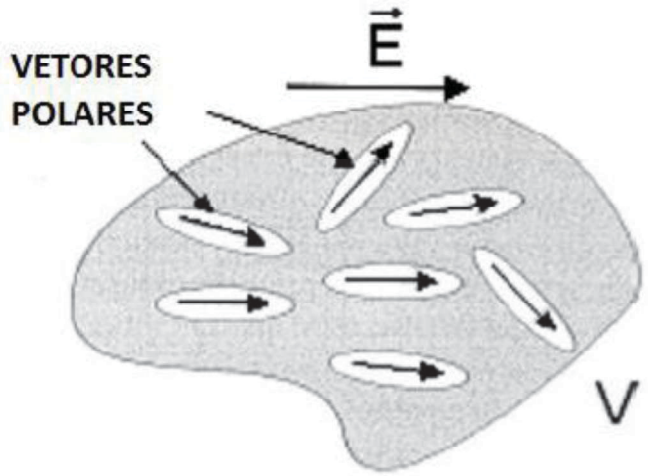


Figura 2 – Material dielétrico formado por dipolos intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo [7]

Em função do alinhamento parcial dos vetores polares presentes na estrutura do material na direção do campo elétrico aplicado, tem-se um momento polar resultante, que corresponde à soma dos vetores polares individuais. Concomitantemente à orientação na direção do campo elétrico externo, cada dipolo produz um campo elétrico na região entre as cargas que o compõem, resultando em um campo elétrico interno E_D que é a soma vetorial do campo elétrico associado a cada dipolo. A orientação do campo elétrico E_D ocorre na mesma direção que a do campo elétrico externo, porém, com sentido inverso. Como consequência observa-se uma redução do campo elétrico no interior do dielétrico, atingindo os próprios dipolos, e assim, ocorre uma interação sucessiva entre os campos externo aplicado e o interno produzido pelos dipolos, até que se chegue a uma situação de equilíbrio. Ou seja, a polarização do dielétrico depende do campo elétrico total do meio, porém uma parte é produzida pelo próprio dielétrico. Desta forma, o campo elétrico que atua sobre os dipolos individuais não é o campo externo E ou interno E_d, e sim um campo elétrico molecular E_m resultante, conforme se pode visualizar na Figura 3 [7, 10].

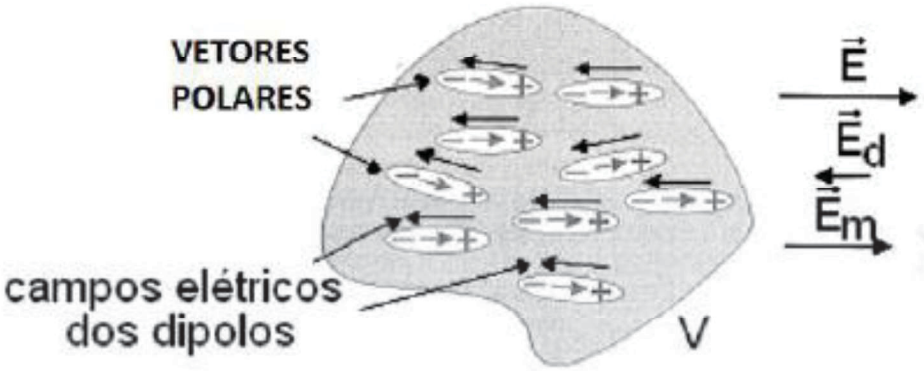


Figura 3 – Dielétrico formado por dipolos (Vetores polares) intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo - E, e a formação dos campos elétricos associados aos dipolos - E_D e total interno resultante E_M [7]

Em materiais dielétricos que não possuem vetores polares intrínsecos, os quais são ditos apolares e possuem o centro geométrico das cargas positivas coincidente com o das cargas negativas (ver Figura 4a), também pode haver influência de campos elétricos externos. Neste caso, a ação da força do campo elétrico desloca os centros de carga em uma determinada distância, limitada pela força elétrica de atração entre as cargas. Assim, considera-se que em termos genéricos cada átomo - molécula pode ser "esticada", estando as cargas negativas unidas às positivas por meio de uma "mola" microscópica fictícia, como pode se ver na Figura 4b [9,10].

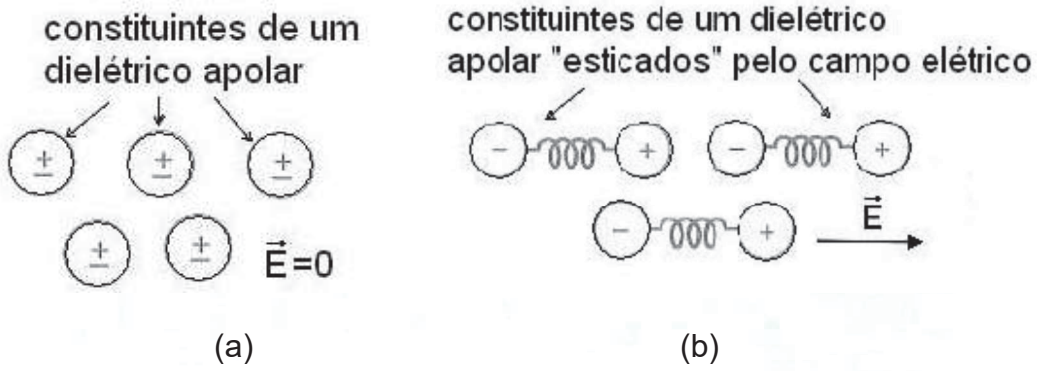


Figura 4 – Moléculas apolares em um dielétrico sem vetores polares intrínsecos: (a) sem atuação de campo elétrico externo, (b) com atuação de campo elétrico externo [9]

Quando o campo externo aplicado é retirado os centros geométricos das cargas voltam a ficar situados na posição coincidente original, entretanto, se esse campo for muito grande pode ocorrer a separação de cargas, induzindo a formação de dipolos elétricos, chamados de dipolos induzidos. Neste momento,

processo de polarização similar ao verificado no caso de materiais dielétricos com dipolos intrínsecos é iniciado [10].

Em geral, os materiais dielétricos são constituídos por moléculas polares e apolares, sendo que quando submetidos a um campo elétrico externo, os dipolos intrínsecos são orientados na direção deste campo, podendo ser produzidos também dipolos induzidos, os quais serão orientados da mesma forma em relação ao campo externo, produzindo um campo elétrico interno ao dielétrico inferior àquele aplicado [7, 10].

Adicionalmente à propriedade de polarização, os dielétricos também são reconhecidos por apresentarem uma condutividade suficientemente pequena (isolante elétrico), possibilitando seu emprego como meio de separação física de partes condutoras submetidas a uma diferença de potencial, sendo assim bastante aplicados na área de sistemas elétricos [6].

Os materiais dielétricos como isolantes são aplicados pelas concessionárias de energia elétrica há décadas, principalmente o ar, o óleo, a cerâmica e o papel impregnado com óleo, cujo conhecimento do comportamento é bastante difundido. Nos últimos anos, com a evolução da indústria de materiais, teve-se um crescimento acentuado do emprego nessa área, além de outras, de materiais dielétricos poliméricos como isolantes sólidos, os quais apresentam comportamento distinto e exigem conhecimento específico, em especial quanto aos seus mecanismos de ruptura elétrica [11].

2.1.1 Polietileno

O polietileno pertence à série de compostos químicos chamados de poliolefinas e é produzido a partir da polimerização do monômero do etileno. As características do polietileno podem ser descritas como “Polímero parcialmente cristalino, flexível, cujas propriedades são acentuadamente influenciadas pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina” [12].

Dentre os materiais poliméricos, o polietileno (PE) tem considerável importância para o setor elétrico em função das excelentes propriedades dielétricas apresentadas [13].

O tipo do processo de polimerização determina a estrutura do polietileno a ser obtido. As duas formas comuns de polietileno produzidos são o polietileno de baixa densidade (LDPE) e o polietileno de alta densidade (HDPE), classificados como materiais termoplásticos. Outro tipo especial de polietileno é o polietileno reticulado (XLPE) que pode ser obtido através da reticulação do polietileno de baixa densidade, formando uma estrutura entrecruzada que transforma o material em termofixo. Ainda, podem ser obtidos o polietileno linear de baixa densidade (LLDPE), o polietileno de ultra baixa densidade (ULDPE) e o polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) [12, 14, 15]. Na Tabela 1 é possível verificar as principais propriedades físicas e elétricas do LPDE e do HDPE.

Tabela 1 – Propriedades físicas e elétricas do LDPE e do HDPE [O Autor]

PROPRIEDADES	LDPE	HDPE
Densidade (g/ml)	0,91 a 0,94	0,941 a 0,965
Temperatura de transição vítrea Tg (°C)	-80 a -90	-80 a -90
Temperatura de fusão (°C)	104 a 120	138,5
Temperatura de início de decomposição (°C)	~340	~340
Temperatura de autoignição (°C)	~350	~350
Coeficiente de expansão linear (cm/cm/°C)	$2,5.10^{-4}$	$1,3 \text{ a } 2,0.10^{-4}$
Constante dielétrica / permissividade relativa (60 Hz) à temperatura ambiente (ASTM D150-78)	2,25 a 2,36	2,30 a 2,35
Tangente delta em 60 Hz à temperatura ambiente (ASTM D150-78)	$1,0 \text{ a } 5,0.10^{-4}$	$1,0 \text{ a } 5,0.10^{-4}$
Resistência ao arco (s) (ASTM D945-73)	135 a 160	-
Rigidez dielétrica (V/mil - ASTM 149-75)	460 a 990	480 a 500
Resistência volumétrica (W.cm) (ASTM D257-78)	10^{-17} a 10^{19}	$0,5 \text{ a } 1,0.10^{19}$
Absorção de água (%)(ASTM D570-78)	< 0,015	< 0,010
Tensão de ruptura (MPa) (ASTM D638-77)	4 a 16	21 a 38

Com o aumento da ramificação das cadeias, a cristalinidade, e consequentemente a densidade, do polímero diminui. Assim, as propriedades de rigidez elétrica, resistência ao cisalhamento, dureza e resistência química são melhoradas quando o grau de ramificação é baixo. Ainda, o polietileno torna-se mais permeável aos líquidos e gases quando a cristalinidade é baixa, sendo este um aspecto importante relacionado a muitos mecanismos de falha elétrica em polímeros [14, 16].

Propriedades como a tensão de ruptura mecânica e a temperatura de amolecimento podem ser melhoradas com o aumento do peso molecular (aumento do comprimento das cadeias), o qual pode ser avaliado de modo indireto pelo “índice de fluidez”. Em geral, aumentos na ramificação resultam em uma distribuição mais ampla de pesos moleculares, resultando na diminuição da tensão de ruptura e resistência ao impacto, entretanto, pode tornar mais fácil o processamento do polietileno [14, 16].

O HDPE possui maior densidade em relação ao LDPE (ver Tabela 1) em função das cadeias moleculares do HPDE conterem poucas ramificações e serem essencialmente lineares. As cadeias lineares podem, com maior facilidade, dobrarem-se de forma complexa, do modo requerido para que ocorra a cristalização. Assim, o HDPE possui valores de cristalinidade que variam em torno de 75 a 90 %, enquanto que para o LDPE os valores estão na faixa de 50 a 60 %. Adicionalmente, o ponto de fusão cristalino do HDPE é um pouco superior ao do LDPE. O HDPE e o LDPE têm muitas aplicações em comum, mas em geral, o HDPE é mais duro e resistente e o LDPE é mais flexível e transparente. Pode-se dizer ainda que, em geral, muitas das propriedades vantajosas do LDPE são apresentadas ou aumentadas no HDPE (ver Tabela 1) [12, 14, 17].

Outra possibilidade é a obtenção do polietileno bimodal pelo processo de polimerização de duas fases, com propriedades mais atraentes quando comparado com o polietileno unimodal, incluindo a necessidade de uma menor quantidade do material. O uso do polietileno bimodal confere aos materiais maior rigidez e dureza, além de melhor resistência a fissuras por tensão mecânica sob a ação ambiental e ao impacto quanto comparado as resinas unimodais [18].

Também são utilizados para aplicações no setor elétrico as chamadas blendas poliméricas, que correspondem a uma mistura macroscopicamente homogênea de duas ou mais espécies diferentes de polímeros. Em geral, o composto resultante possui propriedades melhoradas quando comparadas aos originais. Tais propriedades dependem da miscibilidade da blenda, sendo que a maioria é dita imiscível, pois passam por modificações ou incorporação de aditivos compatibilizantes para melhorar a interação química entre os componentes iniciais e geram blendas compatíveis com propriedades úteis [19].

2.1.2 Mecanismos de Degradação e Envelhecimento em Polímeros

A degradação de um material polimérico ou de um composto polimérico pode ser descrita como qualquer reação química que altera a qualidade de interesse deste material ou composto. Como "qualidade de interesse" entende-se a característica inerente ao uso de um determinado artefato polimérico. Podem ser considerados, por exemplo, a flexibilidade, a resistência elétrica, o aspecto visual, a resistência mecânica, a dureza, entre outros [19]. O envelhecimento é o processo de mudança não reversível das características do polímero como isolantes, que ocorre com o passar do tempo de uso e com uma ação (agente) que permite ou é causa destas mudanças [16].

Os fatores que ocasionam a degradação e o envelhecimento de materiais poliméricos podem ser internos ou externos e se dar em conjunto ou separadamente. No caso de materiais poliméricos empregados em sistemas de isolação em sistemas elétricos, apesar de suas excelentes propriedades elétricas, ficam sujeitos às solicitações e estresses elétricos, térmicos, mecânicos, químicos ou ambientais, quando em operação, podendo à ação destes levar ao envelhecimento e degradação das suas propriedades, e em última estância, à falha da isolação [20, 21].

Alguns processos de degradação que podem ocorrer com materiais poliméricos de redes elétricas durante a operação são:

- Degradação térmica: ocorre sem a presença de oxigênio e causa ruptura das ligações químicas pelo efeito da temperatura [22]. A temperatura de fusão e a temperatura de decomposição térmica do HDPE e do LDPE estão apresentadas na Tabela 1.
- Degradação foto-oxidativa e fotoquímica: aproximadamente 5 % da radiação solar correspondem à radiação ultravioleta, cujo comprimento de onda encontra-se na faixa de 100 a 400 nm. A radiação ultravioleta é um dos agentes de degradação de polímeros. Apesar da alta sensibilidade do PE à fotodegradação, este só absorve radiação UV com comprimento de onda inferior a 250 nm. Tal sensibilidade pode ser explicada devido à presença de grupos cromóforos, por exemplo,

hidroperóxidos e carbonilas ou ainda, a presença de aditivos, que atuariam como iniciadores da fotodegradação [21].

- Degradação oxidativa: as reações de oxidação também são fatores de envelhecimento dos polímeros empregados nas redes aéreas [6, 23]. Este tipo de degradação é muito comum durante o processamento ou uso em temperaturas elevadas, tem início nos processos térmicos e acontece devido à presença de oxigênio atmosférico ou outros oxidantes [21].

Entretanto, os principais mecanismos de envelhecimento de materiais poliméricos nas redes elétricas são o trilhamento elétrico e a erosão em função do fenômeno de descargas parciais [3, 24, 25,], os quais são geralmente agravados por solicitações ambientais regionais como a poluição (fuligens de resíduos industriais) ou salinidade [3].

2.1.2.1 Descargas Parciais

Descargas parciais são definidas como um tipo de descarga elétrica localizada resultante da ionização de gases em um sistema de isolação quando a tensão elétrica excede um valor crítico [26]. Assim, as descargas parciais ocorrem em uma região do espaço sujeita a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa [27]. Para a ocorrência do fenômeno de descargas parciais têm-se como premissa duas condições: a existência de cargas livres (elétrons e/ou íons positivos) em uma determinada região do espaço e um campo elétrico suficientemente intenso para acelerar tais cargas com a energia requerida para iniciar um processo de avalanche.

As descargas parciais podem ser classificadas em três tipos: descarga parcial interna, descarga superficial e descarga corona [28, 29]. Há ainda um tipo especial de descarga chamada de descarga em arborescência elétrica, que pode ser considerada como uma combinação de descargas internas e descargas coronas [6]. Na Figura 5 estão ilustrados os quatro tipos de descargas parciais de acordo com a classificação descrita.

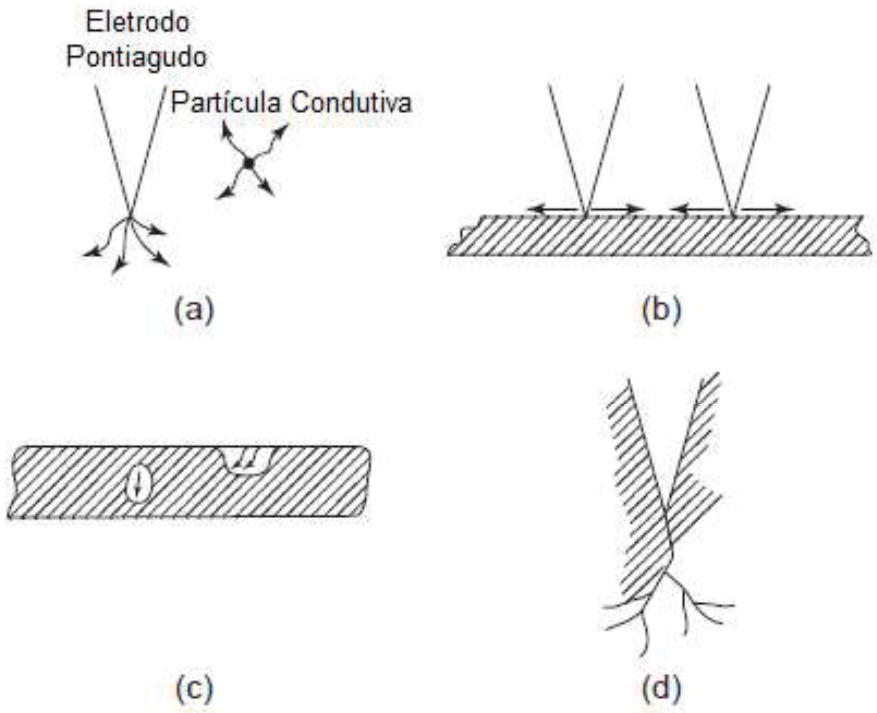


Figura 5 – Quatro tipos de descargas parciais: (a) descarga corona, (b) descarga superficial, (c) descarga interna e (d) descarga em arborescência elétrica [Adaptado de 6]

As descargas corona geralmente ocorrem na vizinhança de eletrodos metálicos com pontas agudas ou de partículas condutivas submetidas a campos elétricos extremamente altos em função de uma distribuição não uniforme dos mesmos (ver Figura 5a) [6]. Ou seja, os pontos de estresse (com pequenos raios de curvatura) formam regiões próximas ao condutor com campo elétrico elevado, o qual ultrapassa o valor de ruptura do gás, dando origem à ocorrência de descargas parciais [27]. Descargas do tipo corona no ar geram brilho, ruído audível e ozônio, além de radiação ultravioleta [29].

Em dielétricos sólidos a ocorrência de descargas internas deve-se à existência de microvazios ou à heterogeneidade do material com pontos de elevada condutividade, ou ainda, às imperfeições das interfaces de isolantes dispostos em camadas. Tais defeitos levam à concentração de linhas de campo elétrico nas suas proximidades e dão início ao processo de descargas incompletas do dielétrico até sua estabilização ou perfuração [30, 31]. A Figura 6 ilustra a presença de uma cavidade em um meio dielétrico.

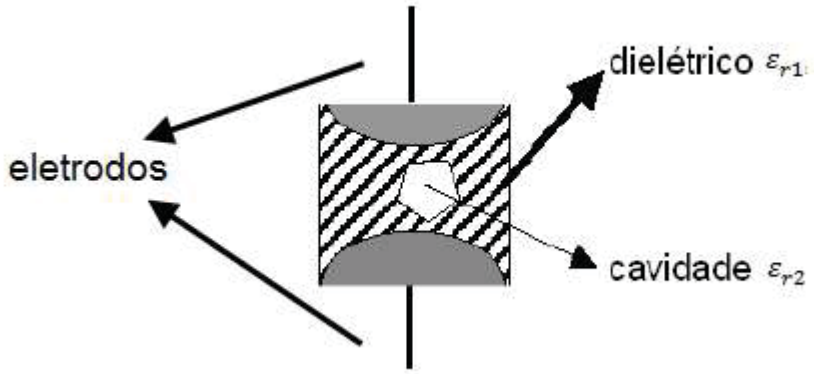


Figura 6 – Descargas parciais em cavidades [Adaptado de 32]

Considerando-se que seja aplicada uma diferença de potencial elétrico entre os eletrodos da Figura 6, o meio dielétrico entre os eletrodos será submetido a um campo elétrico. Uma vez que dielétricos submetidos a um campo elétrico levam à concentração do campo elétrico nos materiais na razão inversa das suas constantes dielétricas [10, 33], com a cavidade existente preenchida, por exemplo, por um gás com constante dielétrica $\varepsilon_{r2} < \varepsilon_{r1}$, tem-se $E_2 > E_1$ o que pode gerar gradientes superiores à rigidez dielétrica do gás e, por conseguinte, à ocorrência de descargas parciais internas.

Descargas superficiais ocorrem, também em gases ou líquidos, na superfície de um material dielétrico, por exemplo, um polímero, normalmente partindo do eletrodo para a superfície. Quando a componente de campo elétrico que tangencia a superfície excede certo valor crítico, o processo de descarga superficial é iniciado [34]. Na Figura 7 está representado um caso típico onde há um espaço vazio preenchido por gás com constante dielétrica ε_{r2} entre o eletrodo curvo e a superfície do material dielétrico de constante dielétrica ε_{r1} com possibilidade da ocorrência de descargas superficiais na superfície deste material dielétrico.

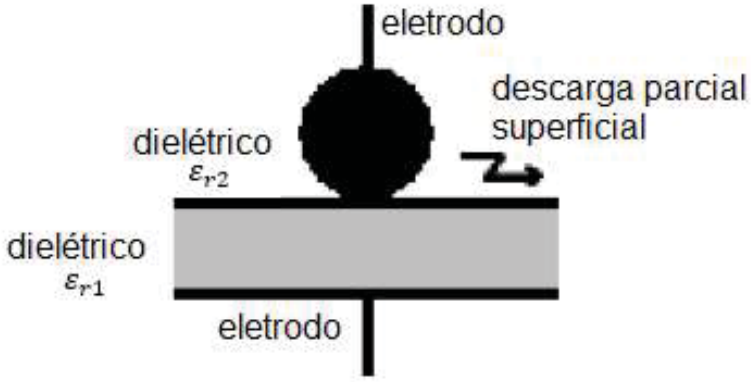


Figura 7 – Representação da descarga parcial superficial em materiais dielétricos [Adaptado de 35]

No caso ilustrado na Figura 7, quando o material dielétrico possui permissividade relativa superior à do gás ($\varepsilon_{r1} > \varepsilon_{r2}$), em função da relação inversa existente entre o campo elétrico e a permissividade, a maior concentração de campo elétrico ocorre no gás ($E_2 > E_1$) próximo à superfície do material dielétrico, favorecendo a ocorrência de descargas parciais superficiais.

Conforme descrito, independentemente do tipo de descarga parcial (interna, corona ou superficial), em geral, haverá a presença de um meio gasoso. Um gás em seu estado normal é considerado praticamente um isolante ideal. Entretanto, quando aplicada uma diferença de potencial elevada (tensão de ruptura) entre dois eletrodos imersos em um meio gasoso, o gás se torna um condutor e uma descarga se inicia [36]. Os processos responsáveis por iniciar essas descargas no gás são a ionização por colisões e a fotoionização, considerando que um campo elétrico seja aplicado e sua intensidade seja superior ao valor máximo suportado pelo gás [37, 38]. É importante ressaltar que no caso dos materiais poliméricos em sistemas elétricos as descargas parciais de interesse são as que ocorrem internamente ao material ou na superfície do mesmo, sendo que ambas estão relacionadas com a presença de um meio gasoso.

2.1.2.1.1 Processos responsáveis pelo início das descargas elétricas

Um fóton pode ionizar uma molécula quando a radiação absorvida pelo átomo ou molécula excede o potencial de ionização [36, 39]. Uma vez satisfeita essa condição (Equação (1)) a geração do primeiro elétron ocorre e tem-se o processo chamado de fotoionização, representado na Equação (2).

$$h\nu > \mathrm{E_i}, \qquad (1)$$

onde,

ν => Frequência do fóton (Hz);

h => Constante de Plank (h = 6,624 x 10^{-34} J.s).

$$M + h\nu \rightarrow M^+ + e^-, \qquad (2)$$

onde,

M=> Molécula;

M^+ => íon positivo;

e^- => elétron gerado.

Um elétron livre em função de um gradiente de potencial é acelerado e se este elétron ganhar velocidade suficiente até colidir com um átomo, o átomo pode perder um elétron e se tornar um íon. A avalanche de elétrons é formada por colisões de elétrons que produzem novos íons e elétrons (avalanche de Townsend) e continua uma descarga transitória até que torne autossustentada [40]. Com a continuidade do processo, chamado de ionização por colisões, serão produzidos vários elétrons livres e quando a continuidade de elétron e íons for suficiente, o gás, que é isolante, passará a conduzir ocorrendo uma descarga parcial entre os eletrodos. O primeiro elétron que dá início ao processo pode ser gerado por meio de, por exemplo, radiação cósmica ou pelo processo de fotoionização descrito [29].

2.1.2.1.2 Influência do campo elétrico na ocorrência das descargas elétricas

Uma vez que existam cargas livres, geradas pelos processos de fotoionização ou ionização por colisões, a ocorrência de uma descarga parcial está condicionada à ação de um campo elétrico que ultrapasse a suportabilidade do gás (rigidez dielétrica). Existem dois mecanismos para explicar o processo de descarga elétrica em um gás, o Método da Avalanche de Townsend e o Método do Canal (*Streamer*) [6, 36, 40].

A partir da formulação proposta pelos métodos e da utilização de uma analogia com descargas entre eletrodos metálicos, descrita pela Lei de Paschen, é possível calcular a tensão de ruptura V_r e consequentemente o campo elétrico

E_r associados ao mecanismo de ruptura do gás. Neste caso, a tensão de ruptura V_r associada à ocorrência de descargas em regiões com campo elétrico é função do produto da pressão do gás p pela distância entre os eletrodos d, conforme mostra a Equação (3$V_r = F(pd) \quad [kV]$ (3) [27, 41, 42]. A partir da Equação (3) o campo elétrico crítico E_r associado à tensão de ruptura V_r pode ser calculado através da Equação (4). Uma típica curva de Paschen para o ar é mostrada na Figura 8.

$$V_r = F(pd) \quad [kV] \qquad (3)$$

$$E_r = \frac{V_r}{d} \quad [kV/mm] \qquad (4)$$

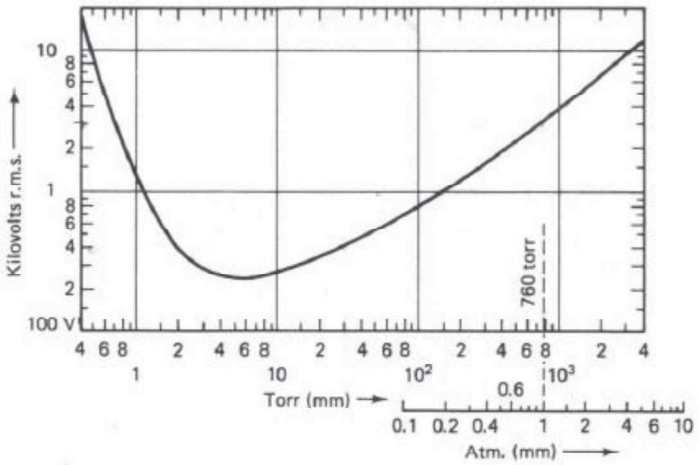


Figura 8 – Curva de Paschen para o ar [27]

Considerando a curva de Paschen (Figura 8) para a pressão do ar atmosférico de $p = 1\,[atm]$ com uma distância $d = 1\,[mm]$ entre eletrodos a tensão de ruptura V_r é de aproximadamente $3{,}0\,[kV]$. Então o valor aproximado de campo elétrico crítico para ocorrência da descarga em uma distância $d = 1\,[mm]$ no ar atmosférico nas condições descritas, calculado pela Equação (4), é de $E_r = 3{,}0\,[kV/mm]$. Este valor é frequentemente utilizado em estudos relacionado a descargas parciais. Destaca-se que a Lei de Paschen foi validada para campos elétricos uniformes, o que, em geral, não ocorre em superfícies ou cavidades de materiais dielétricos poliméricos de redes elétricas. Entretanto, Abdel-Salam at al. (apud Watters, 1978) [43] apresentam a condição de que quando o campo elétrico máximo em uma determinada região for inferior a cinco vezes o valor do campo médio nesta mesma região, esses campos podem ser considerados uniformes.

2.1.2.2 Trilhamento Elétrico

O trilhamento pode ser definido como um mecanismo de envelhecimento superficial, através de caminhos condutores permanentes, formado normalmente por compostos de carbono, através da superfície do isolante, resultado da degradação devido à ação das descargas parciais superficiais [20, 27].

Os processos naturais de umidificação, oxidação e contaminação das superfícies dos isolantes empregados para uso externo (ao tempo) podem resultar em elevada condução de corrente superficial. Esta corrente superficial é chamada de corrente de fuga e corresponde a um fluxo de corrente anormal ou indesejada em um circuito elétrico, neste caso percorrendo o caminho entre o condutor de alta tensão e o potencial de terra. A circulação de corrente de fuga está associada com a diminuição da resistividade superficial do isolante. Assim sendo, trilhas são definidas como caminhos condutores permanentes formados na superfície do isolante [27].

2.1.2.2.1 Influência da deposição superficial de resíduos de poluição ou de maresia

A contaminação surge a partir da atmosfera e o crescente depósito condutivo decorrente de poluição ou de maresia se fixa na superfície dos materiais dielétricos, criando um filme contínuo de camada úmida, propiciando o surgimento de caminhos para correntes elétricas também superficiais entre pontos com diferentes potenciais.

A circulação de corrente em superfícies com a condutividade aumentada, no caso pela presença de partículas depositadas associadas à umidade do ambiente leva a um aquecimento do local, que resulta na evaporação da água e consequentemente na diminuição da condutividade, criando regiões secas com valores elevados de temperatura. A partir da circulação dessas correntes, pequenos arcos são formados entre as partes mais condutoras (descargas parciais superficiais) produzindo o trilhamento do material, ou seja, a carbonização do material.

Assim, a ocorrência do fenômeno de trilhamento elétrico até a ruptura do dielétrico pode ser descrita como contaminação e umedecimento da sua

superfície, formando uma camada condutora com baixa resistência superficial; passagem de corrente elétrica superficial com alta dissipação de calor e perda não-uniforme da solução da camada condutora, favorecendo a formação das bandas secas; interrupção do fluxo de corrente elétrica superficial, causando um aumento do campo elétrico local entre as bandas úmidas e iniciando as descargas superficiais; elevação da temperatura pelas descargas superficiais, causando a formação de resíduos que geram a erosão gradual; propagação da trilha de resíduo de carbono e, a ruptura completa da superfície do material, de maneira que o volume restante é incapaz de apresentar resistência à tensão elétrica aplicada. Este processo de umidificação, evaporação e posterior degradação da superfície do material, até a formação de trilhas condutoras, foi descrito por Malik [41] e está ilustrado na Figura 9.

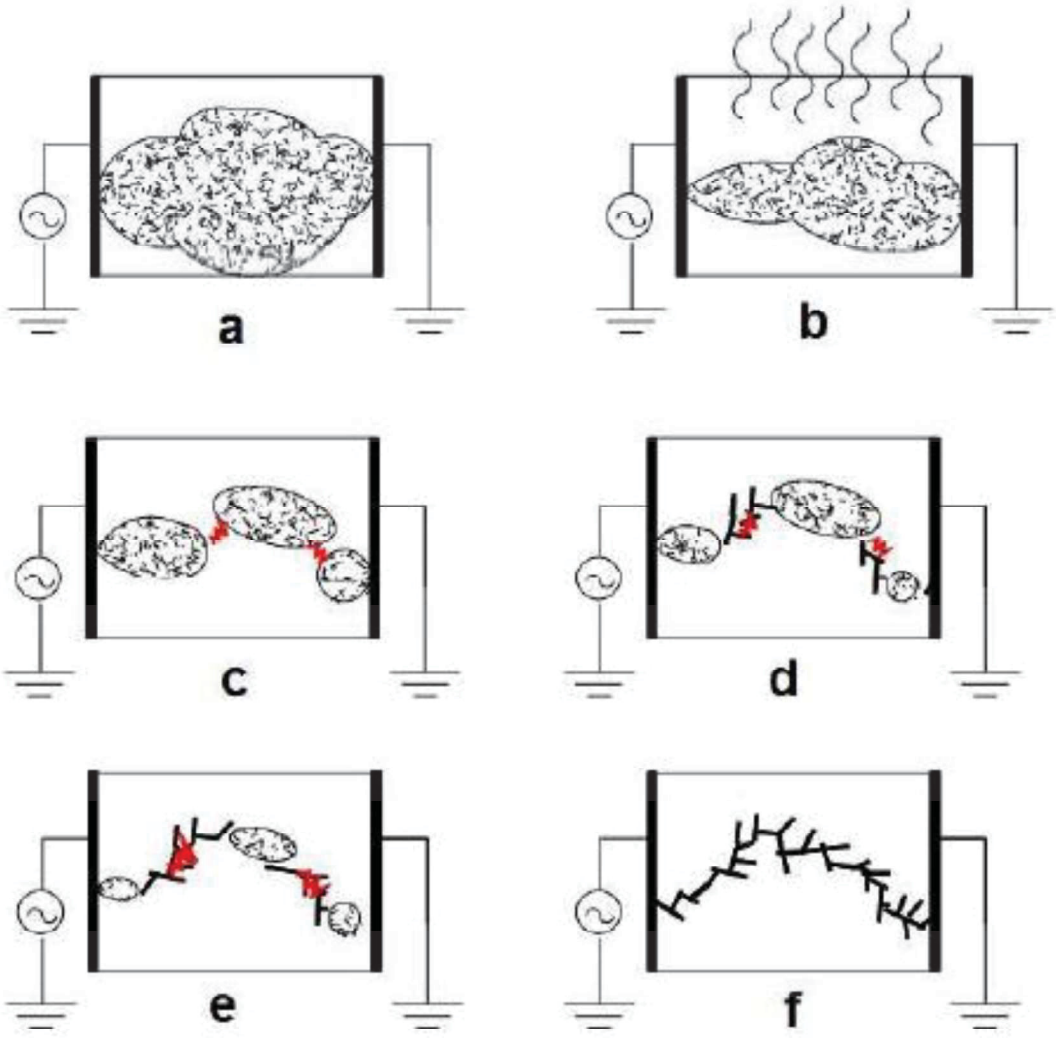


Figura 9 – Ilustração do processo de trilhamento elétrico: Modelo proposto por Malik [41]

Conforme pode-se observar na Figura 9, de acordo com o Modelo proposto por Malik [41], o processo de trilhamento elétrico apresenta as seguintes fases: a) contaminação e umedecimento da superfícies do material, formando camada condutora com baixa resistividade superficial; b) passagem de corrente superficial através da solução úmida contaminantes, com alta dissipação de calor, causando perda de massa da camada condutora e favorecendo a formação de bandas secas; c) interrupção da corrente superficial devido à presença de bandas secas, causando um aumento no campo elétrico local entre as bandas úmidas e iniciando as descargas superficiais; d) devido as descargas superficiais elevadas temperaturas são alcançadas na superfície do dielétrico, causando a formação de resíduos à base de carbono levando o material a uma gradual degradação; e) propagação e aumento do resíduo carbonáceo condutor; f) ruptura completa da superfície do material dielétrico, fazendo que o material se comporte como um condutor de eletricidade.

Sendo assim, neste caso, o trilhamento elétrico depende da intensidade da corrente de fuga, do campo elétrico e do estado das descargas parciais induzidas, os quais, por sua vez, dependem das condições do ambiente, como o nível de poluição e da umidade superficial. Em áreas com níveis pesados ou muito pesados de poluição, diferentes contaminantes podem induzir a ocorrência de trilhamento, tais como sal, poeira, umidade e agentes químicos presentes na atmosfera.

Uma vez que o trilhamento ocorre, a isolação elétrica superficial pode ser completamente perdida, sem possibilidade de recuperação, através da carbonização do material. Ainda, pode ocorrer a erosão que é um processo de degradação progressiva da isolação, que inclui perda localizada e gradual de massa do dielétrico, originada a partir da ação das descargas elétricas [24, 25].

As regiões podem ser classificadas quanto ao nível de poluição em muito pesado, pesado, médio e leve, de acordo com as seguintes características [44]:

- Muito pesado: áreas geralmente de moderada extensão, sujeitas a depósitos de poluentes condutivos e fumaça industrial. Ou ainda áreas situadas muito próximas à costa litorânea e expostas à maresia ou a ventos muito fortes. Assim, os resíduos são

provenientes do mar ou áreas desérticas caracterizadas por longos períodos de estiagem, com ventos que carregam sal e areia, sujeitos à condensação regular.

- Pesado: áreas com densidade alta de indústrias, subúrbios de grandes cidades com alta densidade de sistemas de calefação que produzam poluição, e próximas ao mar ou expostas a ventos relativamente fortes provenientes do mar.
- Médio: áreas com indústrias que não produzam particularmente fumaça poluente, com média densidade de residências com sistema de calefação, ou ainda com alta densidade de indústrias/residências sujeitas a ventos frequentes e/ou chuvas e expostas a ventos vindos do mar, mas não demasiadamente próximas à costa (pelo menos alguns quilômetros de distância).
- Leve: áreas sem industrias, com baixa densidade de residências equipadas com calefação, sujeitas a ventos frequentes, ou ainda com atividade agrícola e montanhosas. Todas essas áreas devem estar situadas a uma distância mínima de 10 a 20 km da costa e não estarem expostas a ventos que soprem diretamente do mar.

2.1.2.3 Aditivação de Polímeros

Uma vez que os materiais poliméricos passaram a ser largamente utilizados em sistemas elétricos, a preocupação com o desempenho e a vida útil destes materiais a contento com os requeridos pelas solicitações de operação também passou a existir. Neste sentido, apesar das atraentes características dos materiais poliméricos, a incorporação de aditivos conhecidos como estabilizadores pode melhorar suas propriedades, principalmente com o intuito de alterar ou inibir ações degradativas [45].

Entre os aditivos mais utilizados e suas características estão [22, 45]:

- Antioxidantes (estabilizantes): têm a capacidade de inibir ou retardar o processo oxidativo. Podem ser do tipo primário (que reagem com os radicais livres $R^{\bullet}$ e $ROO^{\bullet}$ e interrompem o ciclo de

degradação) e do tipo secundário (que previnem as ramificações de cadeias provenientes de reações fotoquímicas).

- Fotoestabilizantes: podem ser ditos estabilizadores que atuam como foto antioxidantes, absorvedores ou bloqueadores de radiação ultravioleta (UV). No caso dos absorvedores, podem absorver radiação UV para que o polímero não o faça e no caso dos bloqueadores podem refletir a radiação UV.
- Ratardantes de chama: visto que o polietileno pode ser um hidrocarboneto inflamável, conferem ao polímero maior resistência ao fogo, com uma baixa velocidade de queima quando em contato com a fonte de calor e uma rápida supressão da chama quando a fonte é removida. Podem ser do tipo inorgânicos, orgânicos não-reativos e orgânicos reativos.

Os antioxidantes primários mais comuns são os derivados do fenol com substituintes nas posições 2 e 6 (*orto* em relação à hidroxila) e com diferentes substituintes na posição *para* do anel aromático. Entre os substituintes nas posições 2 e 6 estão os grupos ter-butila, que protegem o radical fenoxila. Outra classe de antioxidantes primários que age desativando os radicais livres são as aminas aromáticas secundárias ou p-fenileno-diaminas. Os compostos usados como antioxidantes secundários são: compostos de fósforo trivalente, como os fosfitos ou fosfonitos; compostos orgânicos de enxofre, como os sulfetos; e os sais metálicos de dialquiditiocarbamatos e ditiofosfatos [19]. Quanto aos fotoestabilizantes absorvedores, os que têm apresentado maior sucesso em seu uso são os que contém benzofenonas e benzotriazóis. O negro de carbono é um dos melhores compostos bloqueador UV e fornece proteção por longo tempo, principalmente quando utilizado na faixa de 15 a 25 nm de tamanho de partícula e em concentrações entre 2 e 4%. Entretanto, como todo pigmento inorgânico, deve ser utilizado com cuidado, pois contém substâncias que podem catalisar os processos de degradação em polímeros [45]. Os aditivos retardantes de chama organohalogenados são os mais utilizados e atuam na fase sólida, dentre eles estão os aromáticos bromados que possuem baixo custo de processamento e conferem boa efetividade [46, 47, 48].

Além destes aditivos, cargas específicas podem ser aditivadas com o intuito de aumentar a resistência ao trilhamento elétrico. O termo resistência ao trilhamento elétrico refere-se à expressão quantitativa da tensão e do tempo necessários para formação dos caminhos condutores na superfície do material [49, 50]. Um problema na incorporação de cargas no polietileno para aumento da resistência ao trilhamento elétrico e para retardar a capacidade de propagação de chama é a alteração das propriedades mecânicas de forma negativa para aplicações em sistemas elétricos [51].

Uma alternativa para melhorar as características de resistência ao trilhamento e à propagação de chama pode ser obtida pela incorporação de cargas em escala nanométrica. Os estudos de Gong et al. (2014) [47] e Vas et al. (2012) [52]mostraram que a adição de pequenas quantidades de carga nanoparticulada (p. ex. alumina tri-hidratada - AHT) formando nanocompósitos podem ter efeitos semelhantes a quantidades maiores em escala micrométrica. Os nanocompósitos são uma nova classe de materiais caracterizados pela dispersão de fases ultrafinas na ordem de poucos nanômetros na matriz polimérica. A preparação de nanocompósitos pode ser uma opção na obtenção de novas formulações poliméricas para utilização específica imposta pelo setor elétrico, que deve apresentar excelentes características dielétricas, resistência à termo e fotodegradação, resistência ao trilhamento elétrico e propriedades mecânicas adequadas.

Outa alternativa também pode ser o uso de aditivos recentemente desenvolvidos por pesquisadores da Finlândia, Alemanha e do Brasil [53]. Os aditivos denominados AZONOR (bis(1-alcoxi-2,2,6,6-tetrametilpiperidina-4-il)-diazina) apresentaram considerável eficácia como retardantes de chama sendo ligeiramente superiores aos aditivos retardantes de chama e estabilizadores de UV à base de aminas impedidas N-alcoxi, principalmente os que contém um grupo alquilo curto (metilo, etilo ou propilo) ligado a uma porção de nitróxido. Quando utilizados sozinhos foram capazes de prevenir o gotejamento em chamas (de acordo com o ensaio de inflamabilidade da norma UL 94 [43]). Estes apresentaram ainda efeito sinérgico quando adicionados com retardadores bromados e a alumina tri-hidratada no processamento de composições de polipropileno. Esses aditivos além de serem retardantes de chama também

atuam como foto estabilizantes e podem melhorar as propriedades de resistência ao trilhamento elétrico, além de terem ocasionado pouca influência nas propriedades mecânicas. Tais materiais ainda não foram testados em equipamentos do setor elétrico [53].

Ainda, com o intuito de atender a necessidade de materiais poliméricos com melhor performance foram desenvolvidas composições de polietileno de alta densidade bimodal e blendas de polietileno de alta densidade (HDPE) e polietileno linear de baixa densidade (LLDPE) com incorporação de aditivos antioxidantes, retardantes de chama e fotoestabilizantes. Na Tabela 2 estão apresentadas as composições (AZ e AM) da formulação que apresentou os melhores resultados no estudo e foram obtidas contando como base com o HDPE, sendo que o polietileno denominado HDPE II é do tipo bimodal e possui índice de fluidez superior (maior facilidade de processamento) ao denominado como HDPE I [51].

Tabela 2 - Composições das formulações

Formulação	Antioxidante (%)	FLA (%)	TiO2 (%)	Negro de carbono (%)	Polímero
AZ	0,5	0,5	0,3	0,005	HDPE I
AM	0,5	0,5	0,3	0,005	HDPE II

O aditivo identificado como FLA na Tabela 2 corresponde ao Flamestab® NOR 116 que é um aditivo sem halogênio que promete melhorar a resistência à propagação de chama e atuar também com protetor da radiação solar. Este aditivo apresenta grupos nitrogenados na forma de aminas impedida estericamente. O antioxidante presente nas formulações na porcentagem de 0,5 % (ver Tabela 2) é o Irganox 1010 que tem a função de evitar a degradação durante o processamento, e por ser um antioxidante térmico também tem a função de antioxidante após o processamento. Ainda, estão presentes nas formulações o dióxido de titânio na forma alotrópica rutilo que é bloqueador da radiação UV, e o negro de carbono que é absorvedor da radiação UV, além de serem aditivos responsáveis pela coloração cinza exigida para grande parte dos equipamentos poliméricos aplicados no setor elétrico. Na avaliação de amostras com as composições AZ e AM em ensaios mecânicos, antes e após envelhecimento em câmara de intemperismo, foi obtida variação nas propriedades mecânicas abaixo dos limites estabelecidos em norma, e por

ensaios térmicos e elétricos, valores superiores aos normatizados, respectivamente de temperatura de oxidação e resistência ao trilhamento elétrico. A formulação proposta não foi testada em equipamentos do setor elétrico [51].

2.2 Redes Aéreas Protegidas

As redes aéreas protegidas têm sido utilizadas desde os anos de 1950 nos Estados Unidos com o objetivo de permitir uma convivência mais harmoniosa entre as redes aéreas de distribuição de energia elétrica e o meio ambiente [1]. Bill Hendrix foi quem desenvolveu o cabo não isolado, hoje chamado de *Spacer Cable,* para aplicações em redes aéreas. O conceito de *Spacer Cable* consistia na utilização de um espaçador isolante e de um condutor coberto, resultando em um divisor de tensão entre esses dois componentes, para uma determinada tensão aplicada e, portanto, a isolação plena dos condutores não seria necessária, resultando em economia de material [54].

Inicialmente esse tipo de sistema foi aplicado em circuitos de 5 kV, onde os condutores tinham uma cobertura de PVC (policloreto de polivinila) e eram suportados por meio de espaçadores de *plexiglass*, com espaçamento entre fases de 76,2 mm. Esse sistema trifásico era suportado por um cabo mensageiro de boa condutividade e de alta resistência mecânica, que agia como neutro e blindagem estática. Se necessário, os cabos eram suportados por isoladores de pino de porcelana para completar a instalação da linha. O desempenho desse sistema foi excelente para todos os componentes constituintes do mesmo. Por volta de 1954, esse sistema foi aplicado nos Estados Unidos em circuitos de 15 kV, alterando as dimensões do espaçador e da espessura de material isolante de cobertura do condutor. A experiência de campo demonstrou que os componentes que eram adequados para 5 kV não eram para o sistema 15 kV. Os gradientes elétricos superiores nos condutores cobertos associados com maiores correntes capacitivas provocaram trilhamento elétrico nos condutores cobertos e erosão nos espaçadores de *plexiglass* [54].

Nos últimos anos as redes protegidas vêm sendo intensamente utilizadas em países desenvolvidos, como por exemplo, nos Estados Unidos, no Japão e

na Austrália [1]. Em Portugal, as primeiras experiências com redes aéreas compactas foram iniciadas em 2007. Os resultados obtidos contribuíram para a inclusão desta tecnologia na regulamentação portuguesa, bem como para inclusão nas regulamentações europeias [55].

No Brasil, as primeiras experiências com esta tecnologia foram feitas no início da década de 1990 por algumas das maiores concessionárias do país [56]. O fator motivador para o início da utilização das redes aéreas compactas no Brasil foi o confronto existente entre as redes aéreas de distribuição e a arborização, as quais ocupavam praticamente o mesmo espaço. De um lado havia a preocupação urbanística de preservar as árvores por questões ambientais e de outro havia a necessidade de reduzir o número de falhas devido ao contato da arborização com os condutores nus. Deste modo, as redes aéreas compactas contribuiriam para a solução deste confronto através da redução do número de podas de árvores, harmonizando a preservação ambiental e promovendo uma maior confiabilidade (continuidade do fornecimento de energia elétrica) aos sistemas de distribuição [1]. Atualmente, o baixo custo de manutenção, a facilidade de operação, o elevado nível de segurança e o atrativo custo-benefício têm justificado a ampla utilização desta tecnologia, principalmente em áreas urbanas [57].

A compactação da rede permitida pelo uso de cabos cobertos, espaçadores e braços-suporte possibilita maior proximidade entre os cabos condutores, com baixos riscos de curto-circuito. Permite toques eventuais de galhos de árvores das proximidades, sem prejuízos para a rede. A rede aérea protegida ocupa um espaço físico reduzido em comparação com a rede aérea convencional e como consequência importante permite a diminuição do túnel de poda de árvores, com mínimo prejuízo para a sua recuperação [58].

Um levantamento realizado pela COPEL, concessionária de energia elétrica do Estado do Paraná, sul do Brasil, mostrou que há uma redução nos custos de manutenção (corretiva, preventiva e serviço de podas de árvore) na ordem de 70 % em comparação com a rede aérea convencional. Ainda, constatou-se uma redução de 75 % da interrupção no fornecimento de energia elétrica com relação à rede convencional. Quanto aos custos de instalação, a rede protegida custa 1,8 vezes mais que a rede convencional com cabos nus e

15 vezes menos que a rede subterrânea, a qual também possui elevada confiabilidade [58].

Muitos outros casos de sucesso da utilização de redes aéreas protegidas ao longo do mundo são reportados, nos quais os índices de interrupção do fornecimento de energia são consideravelmente reduzidos quando comparados com aqueles de redes aéreas com condutores nus. Na Figura 10 pode-se verificar o bom desempenho das redes protegidas compactas ao se comparar o índice médio de duração de interrupção nestas redes, em redes híbridas (usando condutor protegido e isoladores de porcelana) e redes aéreas de distribuição de condutores nus em um período de 5 anos no município de Orizaba no México [5].

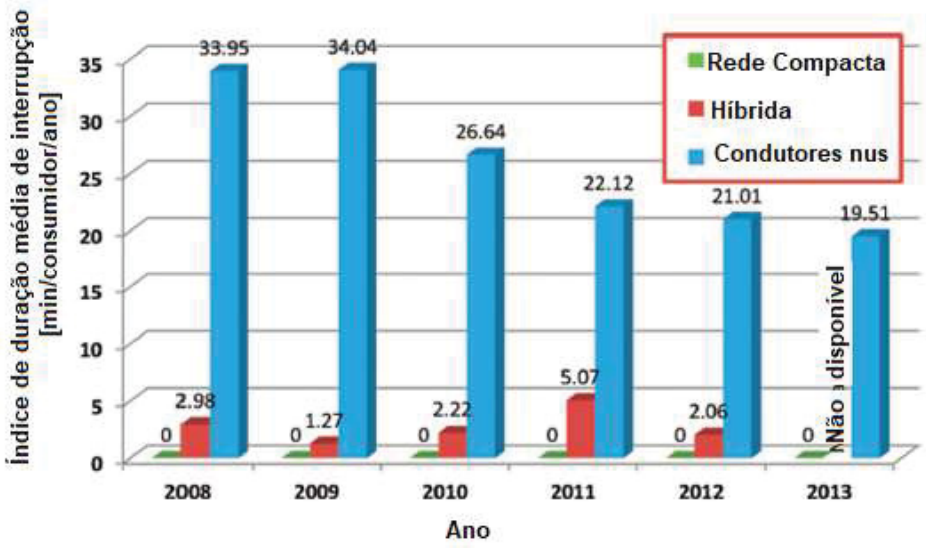


Figura 10 – Índice médio de duração de interrupções em redes protegidas, redes híbridas (condutores protegidos e isoladores de porcelana) e redes aéreas convencionais com condutores nus em Orizaba – México [Adaptado de 5]

Por não possuírem blindagem metálica e apresentarem campo elétrico não-nulo em sua superfície, os cabos utilizados nas redes aéreas compactas não são considerados isolados, apenas protegidos ou cobertos. É importante mencionar que esta rede pode usar os mesmos acessórios e as mesmas técnicas construtivas, operacionais e de manutenção da rede aérea convencional, diminuindo o custo e o tempo de construção. Adicionalmente, a rede aérea compacta possibilita a utilização conjunta de sistemas de comunicação de dados e voz, TV a cabo e sistemas para automação de linhas e redes por meio de fibras óticas incorporadas no interior do cabo mensageiro [1, 59, 60].

2.2.1 Padrão Construtivo

Cada concessionária de distribuição de energia elétrica tem seu próprio padrão de redes aéreas protegidas, sendo todos baseados na norma ABNT NBR 15992 “Redes de distribuição aérea de energia elétrica com cabos cobertos fixados em espaçadores para tensões até 36,2 kV”. Na Figura 11 e na Figura 12 estão apresentados os dois tipos de estruturas mais utilizados na construção de redes protegidas.

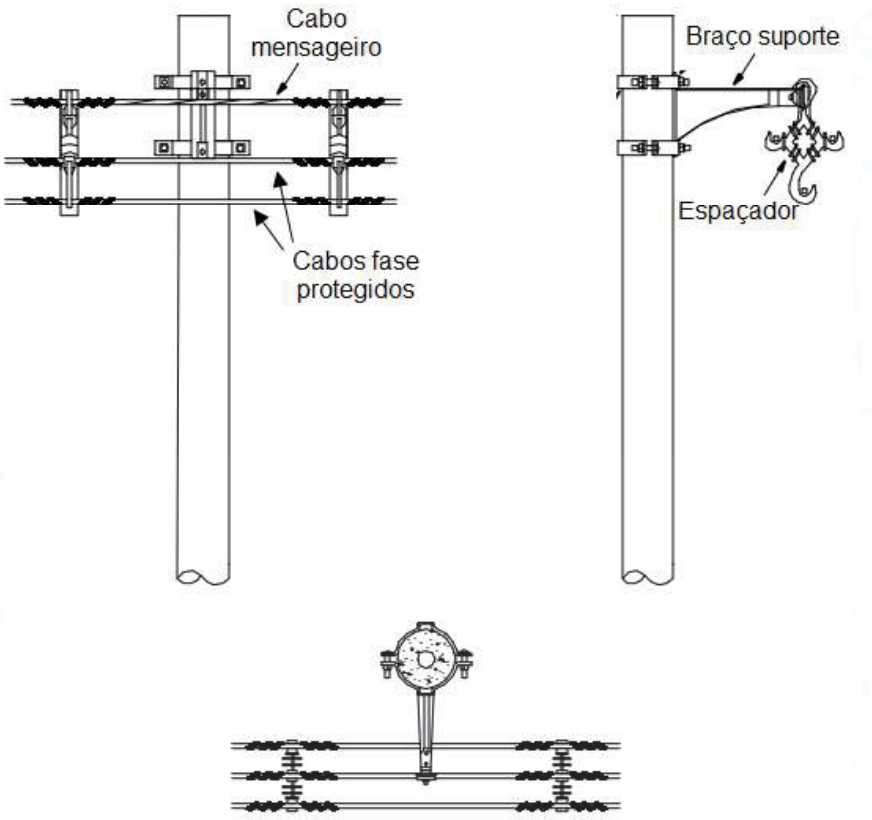


Figura 11 – Padrão de redes protegidas de estruturas em tangente

Na Figura 11 e na Figura 12 podem ser verificados os principais equipamentos e acessórios presentes nas estruturas de redes protegidas: cabo mensageiro, cabos fases protegidos, espaçadores, isoladores, braço suporte e outros. No caso de estruturas em tangente (Figura 11), nos postes utiliza-se o braço suporte para sustentação do cabo mensageiro, e, nas estruturas em ângulo (Figura 12), o cabo mensageiro é fixado (tracionado) diretamente no poste. Ambas as estruturas utilizam espaçadores ao longo dos vãos (distantes em média de 5 a 6 m entre si) e nas estruturas em tangente junto aos postes utilizam-se também isoladores para fixação dos cabos fases protegidos.

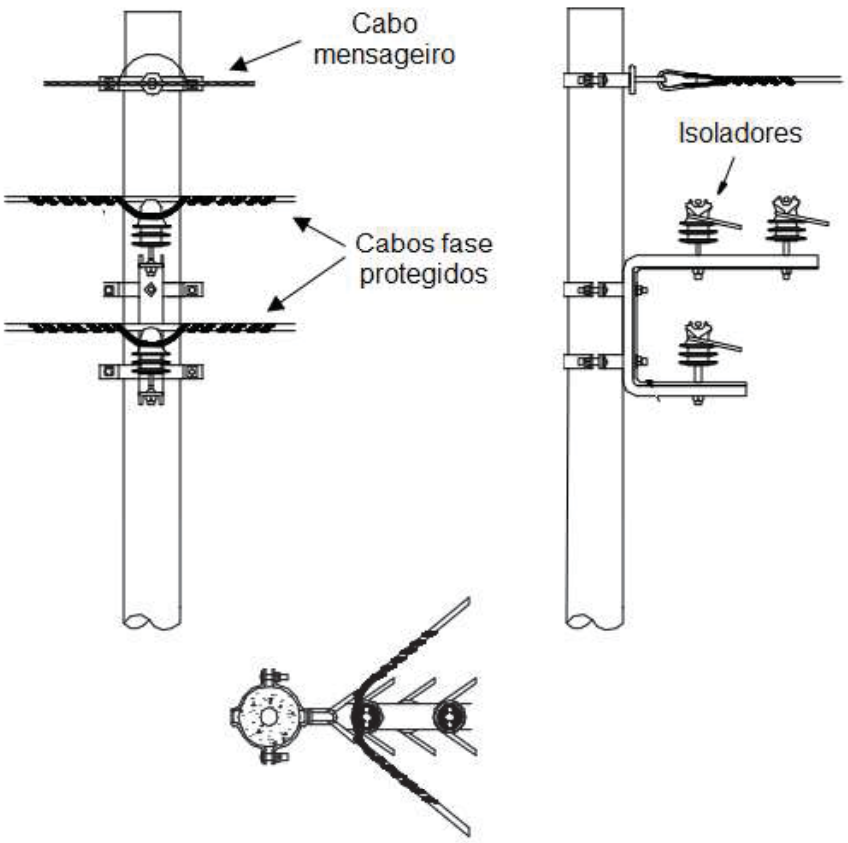


Figura 12 – Padrão de redes protegidas de estruturas em ângulo

Na construção das redes aéreas compactas são utilizados vários tipos de materiais e formulações, com quantidade e tipo de cargas e/ou aditivos diferentes, que podem alterar as características físico-químicas dos materiais. A escolha do material é essencial para o desempenho de redes aéreas protegidas [61].

Ao longo dos anos houve uma evolução na utilização de materiais para a fabricação dos espaçadores, cabos e acessórios de redes protegidas. Inicialmente para a cobertura dos cabos o material isolante utilizado era o PVC e para os espaçadores o *plexiglass*, os quais apresentaram problemas de trilhamento elétrico quando utilizados em redes protegidas com níveis de tensão maiores que 5 kV. Posteriormente o PVC foi substituído por polietileno de baixa densidade para os cabos e o *plexiglass* por PVC para os espaçadores. Neste caso, as redes protegidas tinham bom desempenho para tensões de até 25 kV e em ambientes sem poluição. Atualmente, o polietileno é o material mais utilizado para a fabricação dos espaçadores, cabos e acessórios de redes protegidas, por sua alta rigidez dielétrica associada com sua baixa constante

dielétrica, tendo a operação dessas apresentado confiabilidade em sistemas de até 35 kV em regiões de baixa e média agressividade ambiental [1, 54].

Com o intuito de se obter melhores combinações das propriedades elétricas e físicas, o polietileno utilizado em equipamentos e acessórios de redes protegidas pode ter diferentes características e propriedades. Uma combinação utilizada é o polietileno natural de alto peso molecular com uma camada de polietileno de alta densidade na cor cinza ou preta, outro polietileno bastante utilizado no Brasil em acessórios de redes protegidas é o reticulado [54]. Em geral, cada fabricante utiliza um polietileno como base com propriedades físico-químicas próprias e adiciona aditivos para a melhoria de propriedades específicas. Entre os aditivos mais utilizados estão os antioxidantes para retardo do processo oxidativo, os fotoestabilizantes para aumento da eficiência contra a degradação por radiação ultravioleta e os retardantes de chama para reduzir a propriedade de inflamação do polietileno [51].

2.2.1.1 Espaçadores

Na configuração de redes protegidas, os espaçadores têm papel de extrema relevância, sendo um acessório de material polimérico, de formato losangular, cujas funções são a sustentação e a separação elétrica, ao longo do vão, dos condutores de fases da rede compacta, mantendo o nível de isolação elétrica da mesma [62].

O espaçador consiste em uma peça monobloco moldada com polietileno de alta densidade ou outro material polimérico que atenda aos requisitos normatizados, com resistência ao trilhamento elétrico, às intempéries e aos raios ultravioletas. São apresentadas na Figura 13 as principais partes constituintes do espaçador, entre as quais os berços nos quais são apoiados os cabos das fases e do mensageiro (neutro) do sistema, as ranhuras para fixação dos cabos ao espaçador através dos anéis de amarração e as aletas que têm a função principal de contribuir para que a distância de escoamento estabelecida em norma seja obtida. A distância de escoamento do espaçador corresponde à menor distância ao longo do contorno da superfície externa do espaçador, entre duas partes condutivas que são submetidas à tensão de operação do sistema, ou seja, à separação elétrica entre fase-fase e fase-neutro. Na Tabela 3 são

apresentadas as principais características elétricas requeridas para os espaçadores de acordo com as normas técnicas ABNT NBR 16094 [63], ABNT NBR 16095 [64] e CODI 3.2.18.24 [62].

Tabela 3 – Características elétricas requeridas para os espaçadores

Classe de Tensão (kV)	Características Elétricas				
	Constante dielétrica (máxima)	Tensão mínima suportável de impulso atmosférico (kV)	Tensão mínima aplicável de frequência industrial sob chuva (kV)	Distância mínima de escoamento (mm)	Resistência ao trilhamento elétrico (kV)
15	**3**	**110**	**34**	**260**	**2,5**

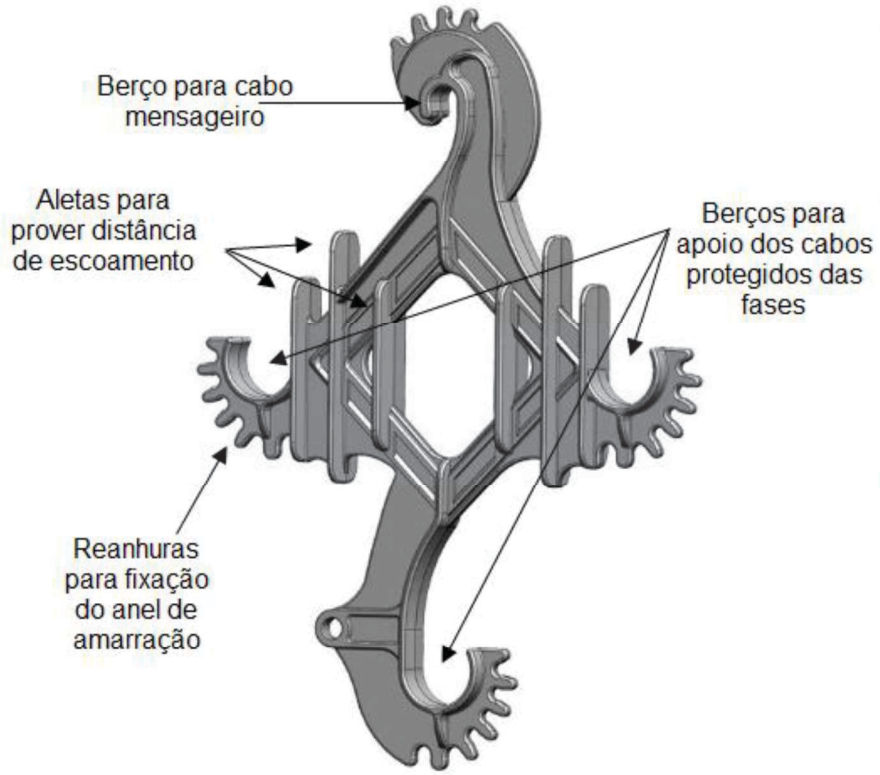


Figura 13 – Espaçador losangular [O Autor]

Para a fixação dos cabos protegidos e mensageiros da rede compacta ao espaçador são utilizadas amarrações que podem ser em formato de anel (Figura 14) ou laço pré-formado de material polimérico (Figura 15), elastomérico ou outro material com compatibilidade dielétrica com o material dos espaçadores. Há espaçadores que possuem garras próprias para fixação dos cabos (ver Figura 16).

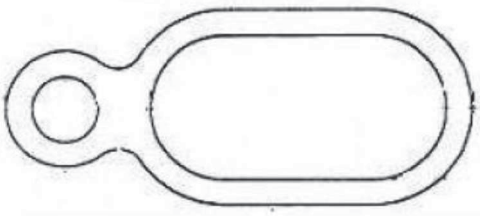


Figura 14 – Anel de amarração

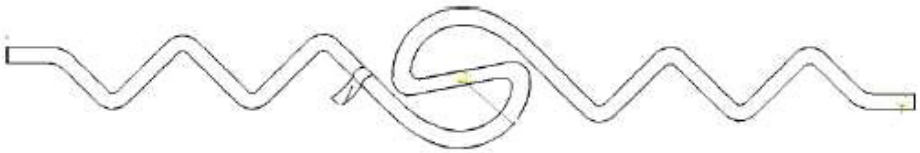


Figura 15 – Laço pré-formado

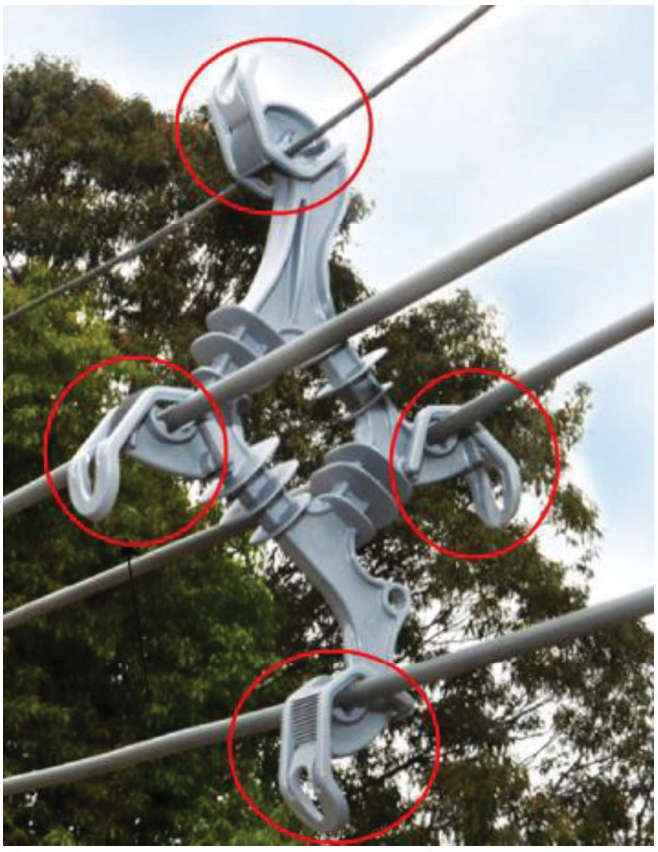


Figura 16- Modelo de espaçador com garras para fixação dos cabos

2.2.2 Operação em Regiões de Elevada Agressividade Ambiental

Na operação de redes aéreas protegidas em regiões com elevada agressividade ambiental, além das solicitações elétricas e mecânicas, a influência do meio submete os equipamentos e acessórios a estresses ambientais em função da exposição a materiais insolúveis, materiais orgânicos oleosos e sal, os quais na presença de umidade podem formar uma camada

condutiva e ocasionar a redução da resistividade superficial dos materiais [11, 61, 65]. Diversos tipos de poluentes podem causar a redução da capacidade de isolação dos equipamentos elétricos, como isoladores, porém dentre eles os mais nocivos são aqueles solúveis em água. Fierro-Chaves et al. [66] investigaram os principais contaminantes encontrados em cadeias de isoladores no México e encontraram uma proporção de cerca de 21 % de poluentes solúveis e 79 % de não solúveis. Dentre os solúveis os bicarbonatos, nitratos, e os sais de sódio, cloro, potássio e magnésio formam a maioria. Já os poluentes não solúveis eram constituídos de 39 % de gesso di-hidratado ($CaSO_4 2H_2O$), 22,6 % de quartzo (SiO_2), 10,3 % de calcita bem como baixas concentrações de ferro e alumínio.

Outras variáveis climáticas que podem influenciar o desempenho de redes protegidas são: temperatura, intensidade de radiação solar, ciclo térmico, índice pluviométrico e oxigênio contido no ar [67, 68].

Na configuração das redes aéreas protegidas o cabo utilizado não possui o campo elétrico confinado podendo surgir correntes superficiais tanto nos cabos como nos espaçadores, dando origem à ocorrência de descargas parciais e aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão. Esses processos são os principais responsáveis pela degradação dos materiais dielétricos empregados nos equipamentos e acessórios das redes protegidas, e são pronunciados em ambientes de elevada agressividade ambiental, principalmente em áreas costeiras onde o sal é depositado na superfície dos isoladores, cabos e espaçadores, ou com poluição decorrente de resíduos industriais [4, 61, 65].

Resultados de testes em campo indicaram que as variáveis climáticas da região em que os cabos protegidos estão instalados afetam fortemente o seu desempenho mecânico, elétrico e dielétrico, ao longo do tempo, quando submetidos a envelhecimento natural em distintas regiões do Brasil. Para tal, cabos protegidos foram instalados em duas redes compactas piloto de regiões distintas do Brasil. Uma das redes foi instalada em Curitiba – PR no ano de 1995 e a outra em Cuiabá – MT no ano de 2001, cuja incidência de radiação ultravioleta e a temperatura média ao longo do ano são bastante superiores às de Curitiba. Na cidade de Curitiba não foram observadas, após 4,5 anos de operação, alterações muito significativas no desempenho dos cabos cobertos,

com ressalva à baixa resistência ao trilhamento elétrico apresentada por um dos cabos. Já na cidade de Cuiabá, apesar do menor tempo de avaliação (3 anos), foi observada, através de análises das imagens de microscopia eletrônica de varredura, fissuração nos cabos, sugerindo tal ocorrência devido a fotodegradação ocasionada pela alta incidência de radiação solar e elevada temperatura da região. Ainda, foi observada redução acentuada da rigidez dielétrica e da resistência à abrasão [69].

Em outro estudo [70], a condução de testes de laboratório e de campo constatou que durante a chuva e a neblina a condutância superficial dos espaçadores é aumentada devido à poluição. Como consequência tem-se um aumento da tensão de *stress* na parede isolante do cabo e a produção de corona entre o filme de água e a isolação de polietileno do cabo.

Nos primórdios da utilização de redes protegidas, na década dos anos de 1950 nos Estados Unidos, já se observou a limitação da aplicação de redes protegidas em regiões com elevada agressividade ambiental. Com a utilização de polietileno de baixa densidade para os cabos e PVC para os espaçadores, por volta dos anos de 1960, o desempenho das redes protegidas foi considerado satisfatório para redes de 25 kV e 35 kV, desde que a corrente capacitiva de isolação fosse inferior a 35 mA e em condições ambientais sem poluição. Em atmosferas contendo contaminantes, tais como fuligens industriais, ou em ambientes salinos, ocorreram problemas nos sistemas de 15, 25 e 35 kV, onde se observou que os espaçadores de polipropileno se tornavam quebradiços (principalmente em 35 kV) [71].

Concessionárias de distribuição de energia elétrica no Brasil, ao longo dos últimos 20 anos, realizaram experiências em campo e laboratório para avaliar o comportamento de diferentes conjuntos de cabos, espaçadores e amarrações frente a condições adversas de ambientes mais agressivos, como na região litorânea, e como resultados constataram [4, 61, 65]:

- Susceptibilidade dos materiais ao trilhamento elétrico e à erosão;
- Sensibilidade dos materiais poliméricos à radiação ultravioleta;
- Susceptibilidade aos esforços termomecânicos (fissura);
- Corrosividade;

- Degradação e envelhecimento acelerados dos materiais dielétricos com redução significativa da vida útil (anos em condições sem poluição e meses em condições com poluição) dos equipamentos e acessórios.

O estudo realizado por Espino-Cortés et al. [5] mostra que as redes protegidas de média tensão (5-69 kV), que, em geral, possibilitam uma redução dos índices de interrupção do fornecimento de energia, quando instaladas sob condições de poluição pesada apresentam falhas precoces. Esta constatação foi obtida com a instalação dos mesmos equipamentos em redes protegidas distantes e próximas da costa litorânea do México. Naquelas próximas à costa, os equipamentos apresentaram trilhamento e erosão, principalmente os espaçadores e cabos cobertos. Através de simulações computacionais e ensaios de compatibilidade dielétrica, foi demonstrado que o campo elétrico nos espaçadores (em especial na região de contato do cabo com o espaçador) considerando uma camada de poluição no espaçador (cobrindo 50 % da sua área) e na área superior do cabo (região que fica sobre o berço do espaçador) é várias vezes maior que no caso do sistema em condições sem poluição.

Em função dos problemas constatados as redes protegidas não têm apresentado a confiabilidade requerida (índices de continuidade do fornecimento de energia) quando instaladas em regiões com elevada agressividade ambiental. No México, a ocorrência de interrupções do fornecimento de energia tem forçado as concessionárias a não instalarem redes protegidas em locais com estas condições [5]. No Brasil, por exemplo, no padrão técnico da Escelsa para “Estruturas para redes de distribuição aéreas primárias compactas protegidas” [72], descreve-se que foram observadas falhas em redes compactas (danos na cobertura dos cabos e surgimento de trilhamento elétrico) em redes instaladas próximas ao litoral e com elevado nível de poluição salina, razão pela qual a concessionária recomenda que este tipo de rede não seja utilizada em regiões com essas características.

Com o intuito de possibilitar melhorias de desempenho das redes protegidas em regiões de elevada agressividade ambiental e extinguir a barreira tecnológica existente, ao longo dos anos vêm sendo desenvolvidos estudos na área. Em 1960, foi proposta e testada como inovação na época a utilização de

polipropileno para a fabricação de espaçadores e cabos, apresentando esses desempenhos superiores sob condição salina em laboratório quando comparados àqueles fabricados com polietileno de baixa densidade (cabos) e PVC (espaçadores). Mesmo assim, nos ensaios dos cabos observou-se que, sob condição seca, a tensão do sistema era submetida praticamente toda no espaçador, enquanto que, sob condição úmida e na presença de poluição, a tensão elétrica era integralmente aplicada na cobertura do cabo, propiciando à formação de trilhas condutoras e descargas elétricas tanto na superfície dos cabos como na dos espaçadores [71].

Em 1969, Smith [73] procurou desenvolver um composto melhor para a fabricação de cabos e acessórios para serem utilizados em ambientes poluídos. De acordo com os resultados de testes de descarga disruptiva (*flashover*) em espaçadores de *high alumina* revestidos com materiais cerâmicos e fluorcarbonetos houve redução na corrente de fuga em ambientes com contaminação salina.

Em outro estudo [74], foram realizados testes em cabos com compostos em HDPE e HMWPE (Polietileno de Alto Peso Molecular), onde em menos de um ano, o cabo com composto HMWPE de 120 circular mils apresentou problemas em dois pontos, sendo um deles uma pequena erosão na superfície inferior do cabo, e outro uma erosão significativa na isolação, em um ponto próximo ao poste. Depois de dois anos, os cabos com HMWPE apresentaram erosão profunda, expondo o condutor de alumínio. No caso dos espaçadores, o melhor resultado foi com o espaçador de poliprolileno com inibidor de UV, o qual não apresentou erosão quando utilizado em conjunto com o cabo com cobertura em HDPE de 300 circular mils.

Em outro estudo [75], alguns materiais como EPR (borracha de etileno propileno), EVA (acetato-vinilo etileno), LTV (borracha de silicone vinílico) e HTV-SR (borracha de silicone vulcanizada a alta temperatura) foram testados como isolantes de cabos e espaçadores em local próximo à orla marítima, a cerca de 200 m da praia. Após 5 anos de operação algumas amostras foram retiradas de campo e realizadas medições de corrente de fuga, com aplicação de 10 kV. Como resultados, mostrou-se que o EPR não é adequado para uso em área de contaminação salina, e os compostos LTV, HTV-SR e EVA mostraram-se mais

adequados para serem utilizados como materiais de isolação aplicados em áreas de poluição salina.

Em estudo realizado pela concessionária distribuidora de energia Light no Brasil, envolvendo testes de laboratório e de campo, foram realizados ensaios para verificar o desempenho de diferentes materiais e acessórios da rede compacta instalados em local de alta agressividade ambiental. A rede estava localizada entre 50 e 150 metros da praia. Os estudos comtemplaram a avaliação de 7 isoladores, 4 espaçadores e 5 cabos de fabricantes distintos. Na primeira etapa foram realizados em laboratório os ensaios de inspeção visual, compatibilidade dielétrica, trilhamento elétrico, entre outros, em amostras dos equipamentos novos. Após, foi realizada inspeção visual em amostras dos equipamentos retiradas de campo com 1, 4 e 8 meses de operação. Devido ao grande número de intervenções de manutenção necessárias na rede em função da degradação dos materiais, a rede foi desativada antes de completar 12 meses de operação. Os principais resultados desse trabalho foram [4]:

- Cabos novos: no ensaio de trilhamento elétrico as amostras foram aprovadas; no ensaio de compatibilidade dielétrica todos os cabos apresentaram pontos luminosos durante o ensaio, indicando falha na cobertura, e 3 cabos apresentaram deterioração visível ao término do ensaio;
- Espaçadores novos: o ensaio de trilhamento elétrico não foi realizado; no ensaio de compatibilidade dielétrica observou-se que com determinados cabos alguns espaçadores não sofreram danos e outros sofreram danos leves, e todos sofreram danos (leves ou severos) quando ensaiados com outros cabos (ver Figura 17 e Figura 18);
- Isoladores novos: no ensaio de trilhamento elétrico dois isoladores não suportaram a tensão normalizada; nos ensaios de compatibilidade dielétrica todos os isoladores foram aprovados;
- Inspeção visual após 4 meses: danos moderados em 2 espaçadores e danos em 4 isoladores;
- Inspeção visual após 8 meses: danos mais severos em 2 espaçadores e em 4 isoladores;

- Inspeção visual após 8 meses: danos em todos os espaçadores, acentuação dos danos nos 4 isoladores e danos em diversos cabos;



Figura 17 – Espaçador 1 derretido durante ensaio de compatibilidade dielétrica com cabo do fabricante 1 [4]



Figura 18 – Danos no espaçador 2 após ensaio de compatibilidade dielétrica com cabo 4 [4]



Figura 19 – Danos no espaçador 2 após 4 meses no campo [4]



Figura 20 – Danos nos cabos após 12 meses no campo [4]

Uma vez que os resultados menos satisfatórios no estudo realizado pela Light [4] foram obtidos para os espaçadores, como continuação do trabalho, em parceria com o Cepel, foram realizados novos estudos com o intuito de indicar um espaçador polimérico para redes de distribuição compacta que atendesse as

instalações situadas em ambientes com elevado índice de poluição e altas temperaturas [76].

Em uma das etapas do trabalho foram realizados ensaios físicos, químicos e elétricos em espaçadores comerciais com o objetivo de se conhecer e comparar o material utilizado pelos fabricantes. A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, indicou-se que todos os espaçadores foram fabricados, aparentemente, com polietileno de alta densidade (HDPE). Os espaçadores dos fabricantes 3 e 4 apresentaram baixa estabilidade termo-oxidativa, estando mais propensos a sofrer degradação com o tempo e quanto à constante dielétrica, observa-se que as cargas presentes no material polimérico tiveram pouca ou nenhuma influência sobre a constante dielétrica destes espaçadores.

Tabela 4 – Resultado dos ensaios físicos, químicos e elétricos do material polimérico dos espaçadores [76]

Espaçador	Composição provável (%)	Densidade (g/m^3)	Tm (°C)	OIT (min)	Constante dielétrica
Fabricante 1	HDPE ≤ 97,2 TiO_2 = 2,8	0,98	138	> 150	2,4
Fabricante 2	HDPE ≤ 98,5 TiO_2 = 1,5	0,96	132	> 150	2,4
Fabricante 3	HDPE ≤ 99,6 Resíduo Ti	0,97	141	23,7	2,3
Fabricante 4	HDPE ≤ 94,6 $SiO_2 \simeq 3\ TiO2 \simeq 1{:}0$ Resíduos: Mg e Zn	1	136	14	2,4

onde: SiO_2 – sílica, TiO_2 – dióxido de titânio; Mg – magnésio; Zn – zinco

Outra etapa do mesmo trabalho consistiu em avaliar alguns métodos complementares para proteção da área crítica do espaçador para a ocorrência de trilhamento elétrico que já havia sido identificada como a interface espaçador – cabo – anel de fixação [4]. Para esta avaliação, foi realizado um ensaio de compatibilidade dielétrica em 1 espaçador novo sem qualquer alteração e 4 espaçadores novos de um mesmo fabricante, considerando quatro tipos de proteção complementar: borracha de silicone vulcanizada à temperatura ambiente; graxa de silicone; pasta de cobre para melhoria de contato; e realização de furos no berço do espaçador para facilitar o escoamento da água da chuva e a limpeza da região crítica. O espaçador com furos para drenagem foi o único que não apresentou danos visíveis [76]. Por fim, no mesmo trabalho

foram desenvolvidos, em conjunto com o fabricante PLP, protótipos com novos compostos poliméricos (não descritos) e com alterações no sistema de injeção para evitar a formação de bolhas internas no espaçador. Na metade deles foram feitos furos para facilitar a lavagem e evitar o acúmulo de poluentes na região mais crítica, a interface espaçador-cabo-amarração. Algumas amostras de ambas as configurações foram submetidas ao ensaio de compatibilidade dielétrica e outras foram instaladas no campo em dezembro de 2005. Os resultados do ensaio de compatibilidade realizados no laboratório mostraram que a configuração do espaçador com furos para drenagem foi a que apresentou o melhor desempenho e não foram relatados resultados do desempenho em campo [76].

No trabalho de Piazza et al. [61], com foco na avaliação de cabos, espaçadores e anéis/laços de amarração de redes protegidas instalados em região litorânea de alta agressividade salina foram utilizadas técnicas microscópicas de caracterização, simulações de campo elétrico e inspeção visual de amostras instaladas em campo para analisar a influência da geometria e do processamento de peças no aprisionamento da poluição e suas consequências para o trilhamento superficial e degradação do material das peças estudadas. Os melhores resultados foram obtidos pelo espaçador com as maiores dimensões, amarração própria e formulação do fabricante denominado “A”, indicando que dimensões, formatos e formulações influenciam no comportamento elétrico do sistema.

Ainda, na linha da avaliação da influência da geometria dos equipamentos e acessórios de redes protegidas na degradação por trilhamento elétrico, um estudo demonstra que na superfície dos acessórios da rede compacta, as diferenças de potencial podem ser mais intensas em função da existência de nervuras, anéis e laços de amarração com permissividades superiores à do ar, pois, estando os dielétricos em série, a densidade de fluxo é a mesma, porém, o campo elétrico é mais intenso no meio com menor permissividade. Para evitar o aprisionamento de partículas de sal, sugere-se que a geometria dos acessórios deve ser de tal forma que não promova a formação de vértices, ou seja, devem ser evitados os cantos vivos, de forma a promover fluxo livre [11].

Assim, a revisão bibliográfica de trabalhos relacionados à operação de redes protegidas em regiões com elevada agressividade ambiental foi realizada com foco nos seguintes aspectos: influência das variáveis climáticas; confiabilidade e desempenho de equipamentos e acessórios; avaliação da degradação de equipamentos e acessórios; e novos desenvolvimentos. De acordo comos principais trabalhos e publicações nestes temas fica evidenciado que o desempenho em campo dos materiais poliméricos aplicados nos acessórios das redes protegidas é altamente afetado pelas variáveis climáticas da região onde estão instaladas [65-70]. Nota-se ainda que, em regiões com elevado grau de agressividade ambiental o emprego desse tipo de padrão de redes aéreas não apresenta a confiabilidade nem o desempenho mínimos requeridos [4, 65, 72]. Estudos que propõem avaliações da evolução da degradação dos componentes das redes protegidas, cabo, espaçador e isolador, em função das características de poluição do ambiente vêm sendo realizados [71-74]. Entretanto, ainda existe uma carência significativa de desenvolvimentos científicos que propiciem a esses componentes atender as características de desempenho, confiabilidade e vida útil necessárias, de forma a minimizar eventuais desligamentos indesejáveis com a ruptura do cabo, espaçador e amarração, além de eventuais riscos para terceiros. Nessa linha, há a publicação apenas de poucos trabalhos que avaliam novas composições de materiais [73-76], e não foram encontradas publicações que considerem uma nova concepção construtiva para os equipamentos e acessórios de redes protegidas para instalação em regiões de elevada agressividade ambiental.

2.3 Simulações Computacionais

A simulação computacional é uma importante 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 [32]. À medida que a complexidade dos problemas cresceu, surgiu a necessidade de se utilizar uma abordagem mais sistêmica e generalista [77].

Em essência, a simulação é uma técnica que consiste em realizar um modelo da situação real, e nele avaliar experiências. Essa definição, dada por Naylor [78], é muito ampla. Uma definição mais restrita é dada por Ehrlich [79], e segundo esse autor a simulação é um método para estudar o desempenho de um sistema por meio da formulação de um modelo matemático, o qual deve reproduzir, da maneira mais fiel possível, as características do sistema original. Manipulando o modelo e analisando os resultados pode-se concluir como diversos fatores afetarão o desempenho do sistema.

Através da simulação computacional é possível obter resultados que levem à otimização de um objeto ou processo desejado através da realização de simulações, por meio de modelos de uma série de experimentos em diferentes condições e, posteriormente, escolhendo a condição cujos resultados sejam mais aceitáveis [79].

Atualmente têm-se vários programas utilizados para simulações computacionais nas diversas áreas de conhecimento. Alguns dos *softwares* apresentam uma interface gráfica que permite a visualização dos desenhos dos equipamentos, circuitos e outros, em escala, que podem ser importados de programas CAD, dependendo da complexidade da geometria ou até mesmo desenhados na área de trabalho dos próprios programas. A caracterização dos materiais e condições de contorno é que dá realidade à simulação. Os resultados podem ser observados de várias maneiras gráficas, entre as quais por mapa de cores. Durante a resolução do problema parte dos *softwares* geram uma malha composta por elementos geométricos de tamanhos variados, chamados de elementos finitos [80, 81]. Programas transformam um conjunto de equações diferenciais parciais em uma forma mais apropriada para fazer uma análise numérica e em seguida, com desempenho elevado, em geral, as resolvem utilizando o método dos elementos finitos.

2.3.1 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) teve suas origens na análise estrutural. Com o surgimento dos primeiros computadores digitais no início da década de 50, os métodos matriciais para a análise estrutural tiveram um grande

desenvolvimento. As primeiras aplicações envolviam apenas estruturas reticuladas, mas as crescentes demandas por estruturas mais leves, tais como as encontradas na indústria aeronáutica, conduziu ao desenvolvimento de métodos numéricos que pudessem ser utilizados nas análises de problemas mais complexos. Entre os trabalhos mais antigos pode-se citar os trabalhos de Turner [82] e Argyris [83]. Zienkiewics, em seu histórico artigo "*The Finite Element Method: from Intuition to Generality*" [84], apresenta uma evolução mais detalhada do MEF nessa fase inicial.

A aplicação do método dos elementos finitos requer a discretização do problema, a derivação de equações que governam um elemento típico, a montagem de todos os elementos na região da solução e a solução do sistema de equações obtidas.

A discretização consiste em dividir a geometria do objeto de estudo (domínio) em sub-regiões mais simples denominadas de elementos finitos, conforme ilustrado na Figura 21. Na Figura 22 pode-se visualizar alguns dos elementos mais utilizados para problemas bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) [85, 86].

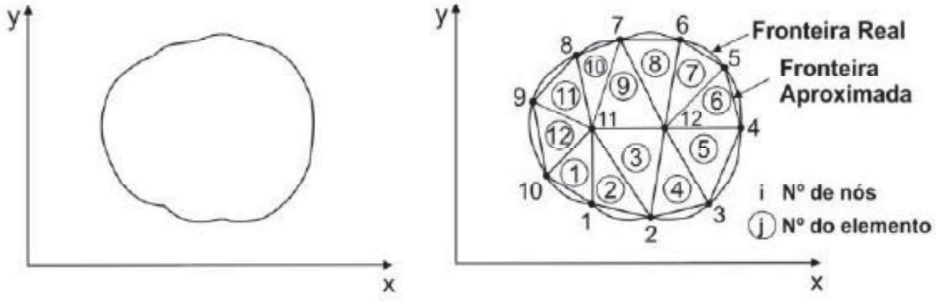


Figura 21 – Discretização de um domínio em sub-regiões [85]

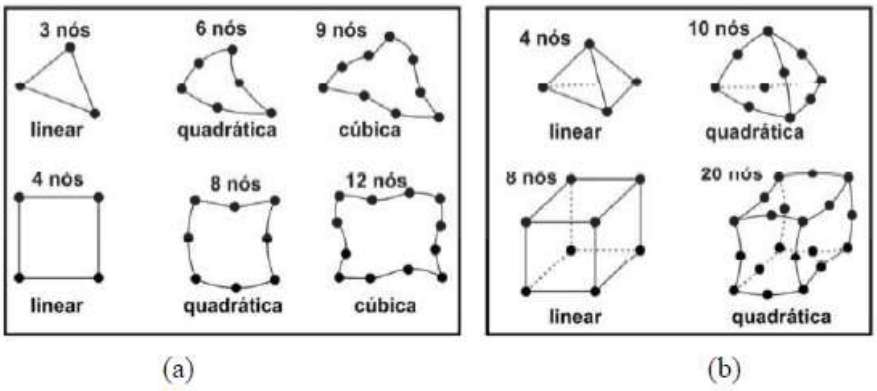


Figura 22 – Elementos finitos mais usuais: (a) para 2D e (b) para 3D [86]

Os elementos finitos são interligados através dos nós e a malha formada recebe o nome de *mesh*. A escolha dos elementos finitos e a quantidade destes elementos pode resultar em uma malha grosseira ou mais refinada, influenciando no desempenho computacional do MEF. Em geral, espera-se que a construção da malha represente a geometria do domínio da forma mais precisa possível [86].

2.3.1.1 Cálculo do Campo Elétrico

Utilizando o MEF para o cálculo do campo elétrico em uma determinada geometria é necessário calcular o valor do potencial elétrico V_e em cada nó dos elementos finitos "*e*". Na Figura 23 está ilustrado um exemplo no qual existem três elementos finitos de primeira ordem. Neste caso, as tensões v_1 e v_4 são conhecidas (condições de contorno) e para calcular as tensões nos demais nós é realizada uma interpolação linear para representar a tensão em um determinado ponto.

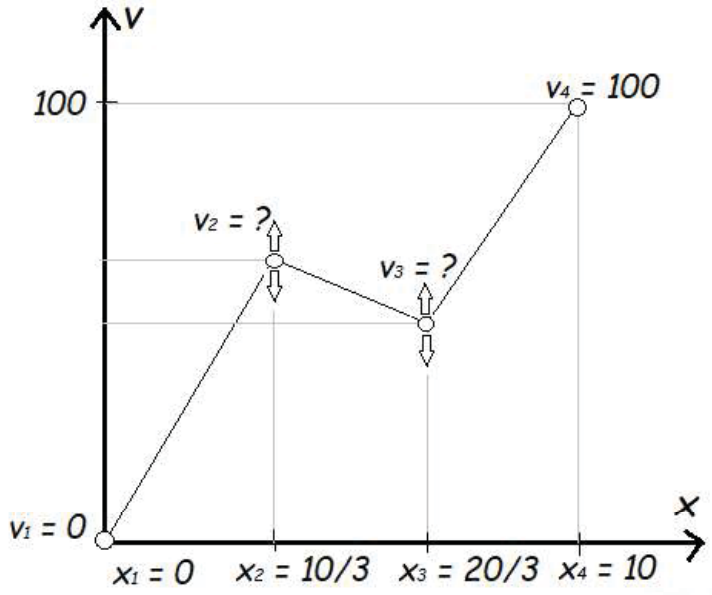


Figura 23 – Processo para o cálculo das tensões nos elementos finitos de primeira ordem

A partir desta informação, as equações de eletrostática para o cálculo do campo elétrico são aplicadas e as equações diferenciais resolvidas. Neste caso as equações de interesse são:

- Intensidade de campo elétrico (sistema de coordenadas cartesiano):

$$\mathrm{E} = -\nabla \mathrm{V}, \qquad (5)$$

onde,

E => intensidade do campo elétrico;

V => potencial elétrico;

∇ => operador *Nabla*.

- Primeira equação de Maxwell (Eletrostática):

$$\nabla \cdot \mathrm{D} = \rho_v, \qquad (6)$$

onde,

D => densidade de fluxo elétrico;

ρ_v=> densidade volumétrica de carga.

Como $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$ e relacionando as Equações (5) e (6), obtém-se:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \mathrm{V}) = \rho_v, \qquad (7)$$

onde,

ε_0=> permissividade do vácuo;

ε_r => permissividade relativa do material.

- Reorganizando a Equação (7) chega-se à equação de Poisson:

$$\nabla^2 \mathrm{V} = \frac{\rho_v}{\epsilon}, \qquad (8)$$

- Em caso de um sistema livre de cargas ($\rho_v = 0$) chega-se à equação de Laplace:

$$\nabla^2 \mathrm{V} = 0, \qquad (9)$$

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta para o trabalho pode ser dividida em duas etapas principais, sendo a primeira para o desenvolvimento da concepção construtiva de espaçador para aplicação em redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental e a segunda para a avaliação de protótipos do espaçador com a concepção construtiva proposta e materiais selecionados.

Na primeira etapa foram realizadas as seguintes atividades:

- Simulações computacionais da intensidade de campo elétrico;
- Ensaios de compatibilidade dielétrica (não-normalizado);
- Simulações computacionais de esforços mecânicos.

Nas simulações computacionais para o cálculo da intensidade de campo elétrico foram consideradas diferentes geometrias para os espaçadores de redes protegidas e avaliada a influência da presença de resíduos de poluição e/ou maresia na superfície dos mesmos, com o intuito de correlacionar com a possibilidade de ocorrência de descargas superficiais e consequentemente trilhamento elétrico. Assim, as simulações computacionais foram realizadas com os seguintes objetivos:

- Identificação de regiões críticas com maiores intensidades de campo elétrico na geometria avaliada;
- Avaliação da influência da presença de resíduos poluentes superficiais (espaçador e cabo) na intensidade de campo elétrico nas regiões críticas da geometria avaliada, reproduzindo condições com elevada agressividade ambiental (poluição pesada ou muito pesada – seção 2.1.2.1.2);
- Avaliação do aumento da distância entre os condutores, através do aumento das dimensões totais do espaçador, na intensidade de campo elétrico na geometria com a presença de resíduos poluentes superficiais (espaçador e cabo);
- Avaliação de presença de camada semicondutora na região dos berços do espaçador quanto à intensidade de campo elétrico;
- Avaliação de alterações na geometria em regiões de acúmulo de poluição.

Os ensaios de compatibilidade dielétrica da primeira etapa desta metodologia (desenvolvimento do projeto do espaçador) foram realizados com o intuito de:

- Identificar as regiões críticas com ocorrência de trilhamento elétrico em espaçadores submetidos a ciclos de aspersão de água condutiva;
- Avaliar o aumento da distância entre os eletrodos, através espaçadores com maiores dimensões em comparação com o espaçador convencional, em relação à ocorrência de trilhamento elétrico, considerando a aplicação de ciclos de aspersão de água condutiva;
- Avaliar a presença de camada semicondutora berço do espaçador em relação à ocorrência de trilhamento elétrico, considerando a aplicação de ciclos de aspersão de água condutiva.

A partir dos resultados obtidos nos estudos através das simulações computacionais e do ensaio de compatibilidade dielétrica foi proposto o projeto da nova concepção construtiva do espaçador para aplicação em redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental. Ainda, para a avaliação do projeto, foram realizadas simulações computacionais da intensidade de campo elétrico e de esforços mecânicos.

Uma vez desenvolvido o projeto do espaçador com geometria e dimensão com o intuito de propiciar maior resistência ao trilhamento elétrico para operação em regiões de elevada agressividade ambiental, foram selecionadas formulações de materiais poliméricos com aditivos com o mesmo objetivo. Assim, foram fabricados protótipos de espaçadores considerando o projeto e os materiais propostos.

Na segunda etapa proposta nesta metodologia foram realizados ensaios em laboratório e a instalação em campo em redes piloto de região com elevada agressividade ambiental para avaliação do espaçador desenvolvido.

A seguir são detalhados os materiais e métodos utilizados nas etapas da metodologia descrita.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados foram:

- Espaçador de 15 kV convencional – utilizado no ensaio de compatibilidade dielétrica;
- Espaçador de 34,5 kV convencional – utilizado no ensaio de compatibilidade dielétrica;
- Fita Semicondutora de espessura de 0,76 mm (base de borracha de etileno-propileno – EPR) – utilizada no ensaio de compatibilidade dielétrica;
- Formulações de HDPE com aditivos, denominadas AM e AZ – utilizadas para fabricação dos protótipos;
- Protótipos de espaçador de 15 kV para redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental.

As formulações selecionadas AM e AZ (HDPE com aditivos) foram desenvolvidas no trabalho de SILVA [51]. Na Tabela 5 estão apresentadas as principais propriedades de caracterização de amostras das formulações AM e AZ antes e após envelhecimento normatizado ABNT NBR 10296 [50]. Destaca-se que as amostras têm classificações para resistência ao trilhamento elétrico de 4,5 kV sem e com envelhecimento, valor superior ao requerido de 2,5 kV estipulado na norma técnica ABNT NBR 16094 [63].

Tabela 5 – Propriedades obtidas nos ensaios das amostras das formulações escolhidas

Propriedade	Formulação			
	AZ		AM	
	Sem envelhecimento	Com envelhecimento	Sem envelhecimento	Com envelhecimento
Trilhamento elétrico (kV)	4,5	4,5	4,5	4,5
Tensão de ruptura (MPa)	29,9	30,8	34,5	29,9
Alongamento (%)	741	810	824	821
Tensão de escoamento (MPa)	30,2	30	32,7	31,7

3.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados foram:

- Computador Dell Inspiron – Intel® Core™ i5-6200U CPU @ 2.30 GHz 2.40 GHz, RAM 8,00 GB, 64 bits.
- *Software* COMSOL *Multiphysics*®: programa de simulação computacional para análise multifísica através do método dos elementos finitos. Módulos:
    - Módulo AC/DC – utilizado para cálculo de campos elétricos;
    - Mecânica estrutural – utilizado para cálculo de tensões e deformações mecânicas.
- Transformador 39,8 kV Hitachi-Line – utilizado para aplicação de tensão elétrica no ensaio de compatibilidade dielétrica;
- Conjunto para geração de ciclo de aspersão de chuva (bomba d'água de alta vazão, aspersores de alta pressão, tubulação PVC, filtro de polipropileno, deionizador e reservatórios d'água, etc.) – utilizado no ensaio de compatibilidade dielétrica;
- Termohigrômetro – utilizado para monitoramento do ciclo de aspersão no ensaio de compatibilidade dielétrica;
- Condutivímetro Digital – utilizado para monitoramento do ciclo de aspersão no ensaio de compatibilidade dielétrica;
- Termômetro Digital Technos YP2151 – utilizado para monitoramento do ciclo de aspersão no ensaio de compatibilidade dielétrica;
- Estufa com circulação forçada de ar, marca FANEN – utilizada para o ensaio de resistência à tração;
- Máquina universal de ensaios, marca INSTRON, modelo 33R4467 – utilizada para o ensaio de resistência à tração.

3.3 Métodos

3.3.1 Simulações de Campo Elétrico

Foram definidas no COMSOL as geometrias para avaliação, os materiais envolvidos e as condições de contorno necessárias para a resolução das equações parciais de interesse. Na Figura 24 está apresentada a geometria de referência do problema modelado, que foi desenhada no ambiente gráfico bidimensional e tridimensional do próprio software com base no projeto de espaçador de 15 kV convencional, e os domínios presentes com seus respectivos materiais.

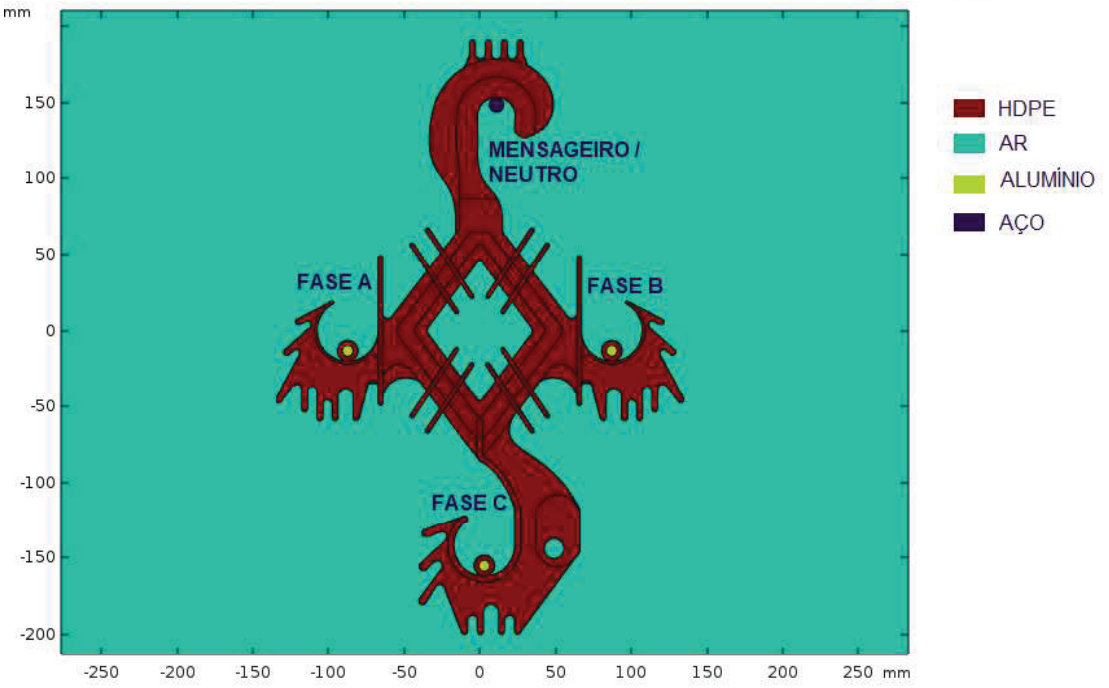


Figura 24 – Geometria base utilizada nas simulações com os materiais especificados para os domínios do problema

Conforme se pode verificar na Figura 24 a geometria base modelada conta com os seguintes domínios:

- Cabo mensageiro: 9,52 mm de diâmetro e material aço;
- Cabos fase: seção de 35 mm^2, com condutores internos de 7,1 mm de diâmetro e material alumínio e camada de proteção com espessura de 3,35 mm e material HDPE;
- Espaçador: geometria base para classe de tensão de 15 kV e material de HDPE;
- Ambiente externo: ar atmosférico (estático)

As dimensões dos cabos (mensageiro e fases) utilizados na geometria base das avaliações correspondem aos cabos normatizados para redes protegidas de classe 15 kV. No modelo não foi considerado o anel de amarração dos cabos ao espaçador e o contato entre os cabos e os berços do espaçador é realizado de maneira pontual (simulação 2D) ou linear (simulação 3D). O ambiente externo representa o ar atmosférico em condição estática, ou seja, sem ventos (0 km/h).

Adicionalmente, para as avaliações de influência da presença de resíduos de poluição ou maresia na presença de umidade foram modelados pequenos domínios sobre as superfícies dos espaçadores e dos cabos (Figura 25), com o intuito de representar bandas condutivas formadas no processo descrito por Malick [41]. Os domínios das bandas condutivas foram representadas com formato de semi-elipses ("gotículas") com características de água condutiva (em função da presença de moléculas de sal dissolvidas) [5, 87].

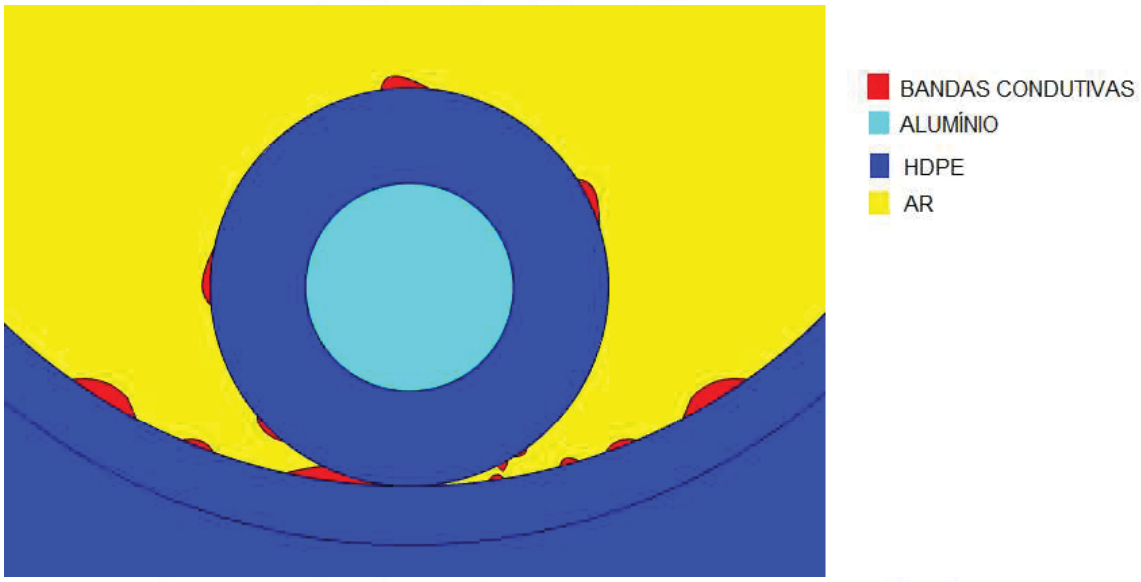


Figura 25 – Representação das bandas condutivas nas superfícies do berço do espaçador e do cabo

Outra modelagem foi realizada com o intuito de representar a presença de uma camada semicondutora nos berços do espaçador para avaliação da intensidade de campo elétrico nesta condição. Neste caso, a camada foi representada com espessura de 1 mm sobre as superfícies dos berços do espaçador, conforme pode-se verificar na Figura 26.

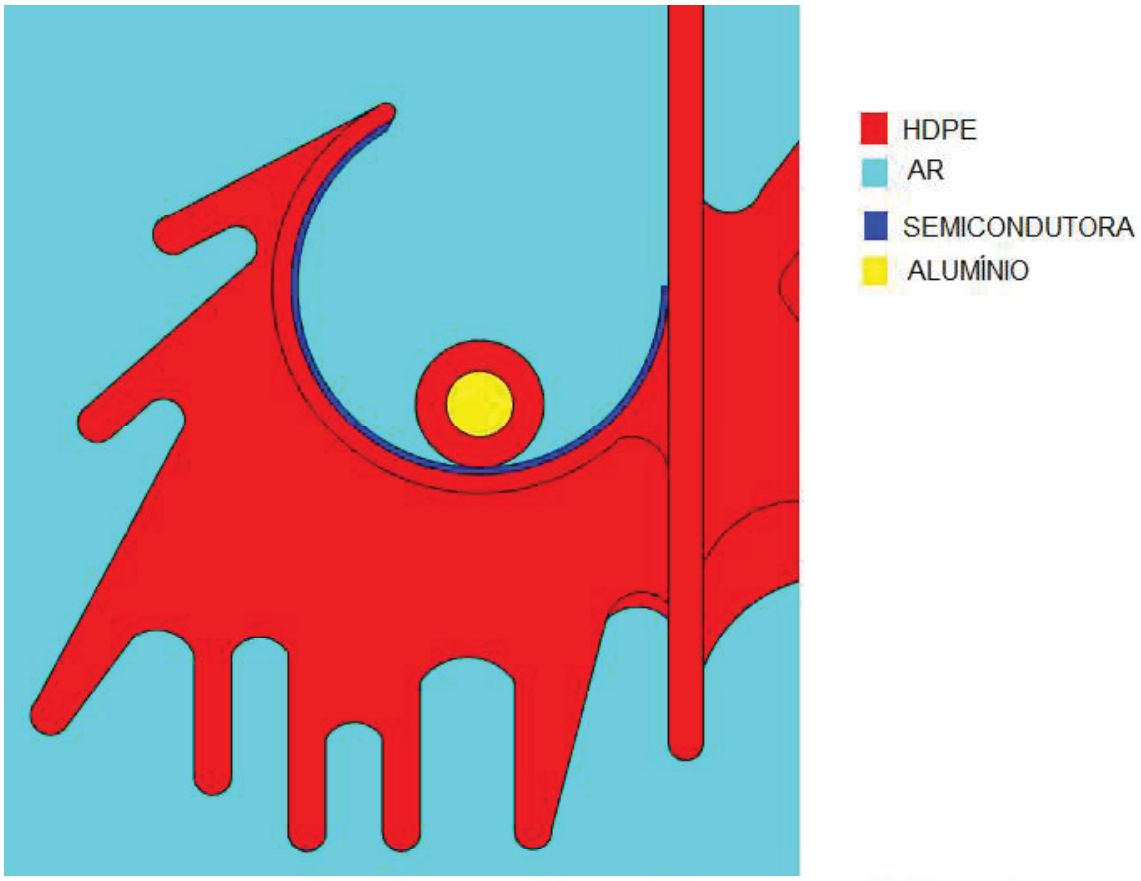


Figura 26 – Representação de uma camada semicondutora no berço do espaçador

As características dos materiais definidos no programa computacional estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características dos materiais utilizados nas simulações de campo elétrico

Material	Permissividade relativa / constante dielétrica	Condutividade elétrica (S/m)	Densidade (g/cm^3)
Aço	-	$1{,}00\times10^{7}$	7,87
Alumínio	-	$3{,}77\times10^{7}$	2,7
HDPE	2,3	-	0,95
Ar atmosférico	1	$2{,}00\times10^{-14}$	$1{,}225\times10^{-3}$
Bandas condutivas (água+sal)	80	$1{,}00\times10^{-2}$	0,99
Semicondutora	100	$2{,}11\times10^{4}$	7,7

Para a definição dos parâmetros para geração da malha no software foram realizadas avaliações considerando três níveis de refinamento denominados: grosseiro, normal e refinado. Os níveis de refinamento estão relacionados à quantidade e ao tamanho dos elementos finitos a serem utilizados para resolução do método dos elementos finitos e impactam na precisão dos

resultados e no esforço computacional para obtenção destes. Sendo que o nível de refinamento denominado grosseiro apresenta resultados com menor precisão e um menor tempo de processamento e o nível refinado apresenta resultados com maior precisão e utiliza maior tempo de processamento. O nível denominado normal tem características intermediárias entre os outros dois níveis. Para as geometrias de interesse de avaliação neste trabalho foi definido o nível normal de refinamento, uma vez que as simulações com os níveis normal e refinado indicaram resultados semelhantes e que o nível normal utiliza um menor tempo de processamento em comparação com o nível refinado. No nível normal de refinamento são utilizados elementos finitos triangulares de tamanhos variados. Na Figura 27 pode-se verificar a malha gerada para a simulação do espaçador com geometria base (convencional). Nota-se na Figura 27 que nas regiões da geometria do espaçador com maiores detalhes há um maior refinamento dos elementos triangulares, tamanhos menores e maior quantidade de elementos.

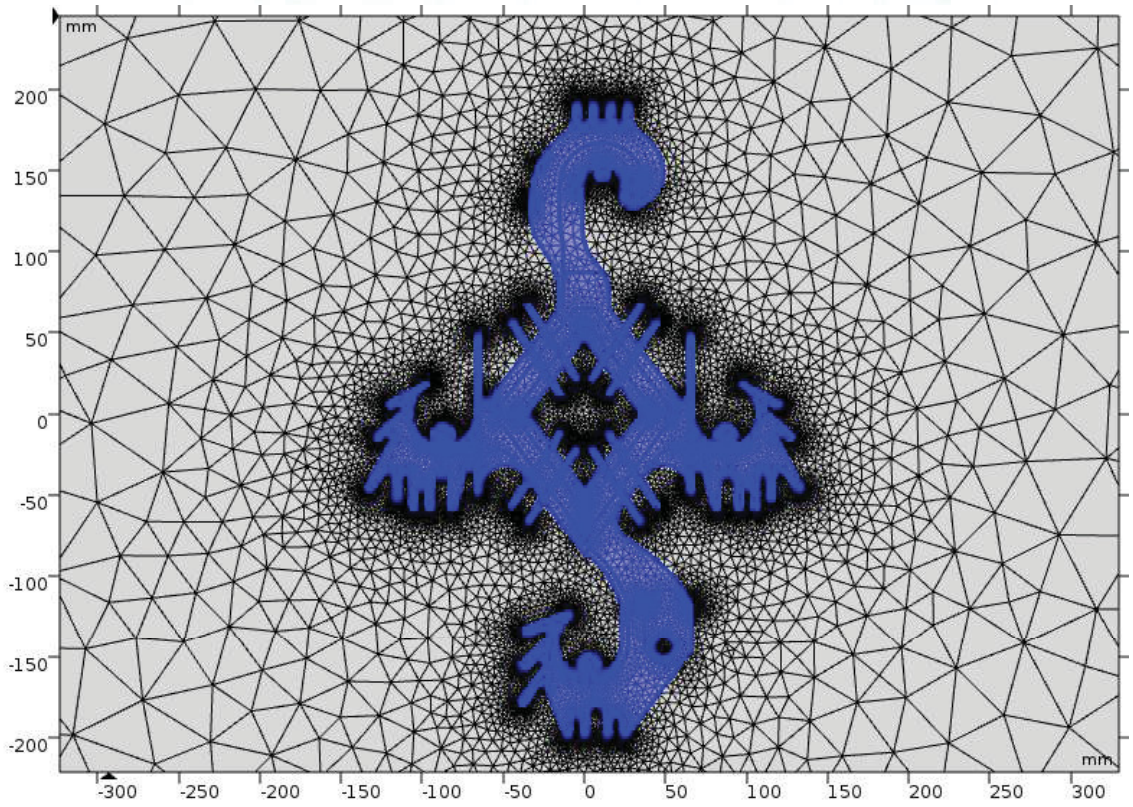


Figura 27 – Exemplo da malha gerada no software para resolução do método dos elementos finitos

Em relação às condições de contorno, conforme descrito na seção 2.3.1.1, para a solução das equações da eletrostática é necessária a definição dos potenciais elétricos conhecidos. As redes protegidas nas quais estão

alocados os espaçadores de estudo neste trabalho são redes com tensão nominal de 13,8 kV, trifásicas com tensões alternadas senoidais defasadas entre si de 120º e com frequência de 60 Hz. Por simplificação dos modelos e diminuição de processamento computacional as simulações foram realizadas no *software* com estudo estacionário do instante de tempo das funções senoidais chamado de *T1*. O instante de tempo *T1* corresponde àquele em que a tensão V_{AN} (fase-neutro) possui o valor de tensão de pico positivo de 11267 V, enquanto as tensões V_{BN} e V_{CN} possuem a metade do valor da tensão (fase-neutro) de pico negativa de -5633 V. Na Figura 28 pode-se observar as tensões trifásicas da rede protegida de 13,8 kV rms (fase-fase) e o instante de tempo denominado *T1*.

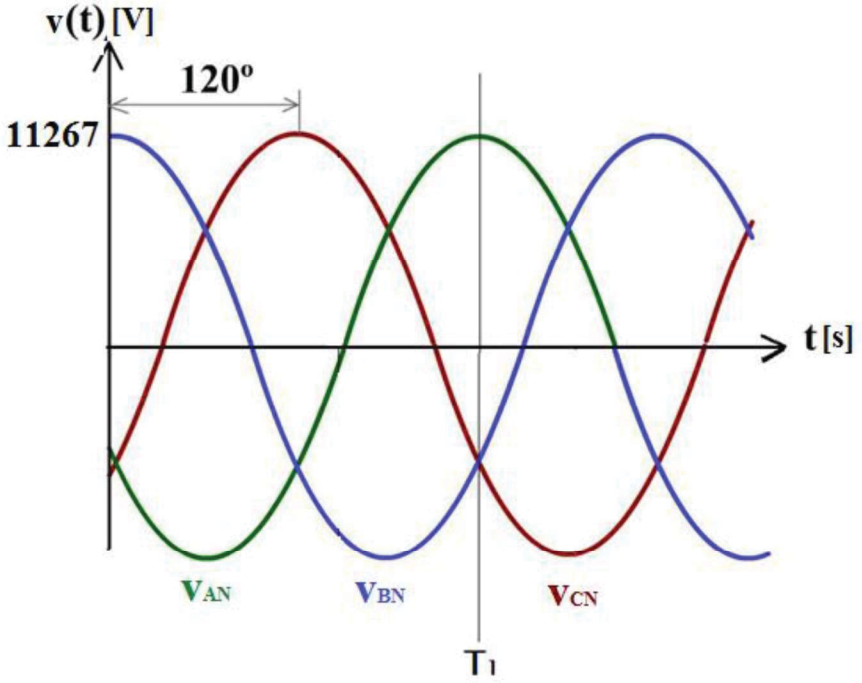


Figura 28 – Tensões alternadas da rede trifásica de 13,8 kV rms e o instante *T1* utilizado nas simulações computacionais

Convém ressaltar que se realizou o estudo dependente do tempo e os resultados encontrados para cada instante de tempo são equivalentes àqueles obtidos com o estudo estacionário considerando os valores de tensões instantâneas (em função da frequência de operação da rede elétrica). O instante *T1* foi escolhido por corresponder a um dos três instantes em que a intensidade de campo elétrico é máxima (condição crítica), neste caso no berço do condutor da fase A (detalhes na seção 4.1). Assim as seguintes condições foram definidas:

- Potencial elétrico 1 nos limites do condutor da Fase A de 11267 V;
- Potencial elétrico 2 nos limites do condutor da Fase B de -5633 V;
- Potencial elétrico 3 nos limites do condutor da Fase C de -5633 V;
- Potencial elétrico 4 nos limites do cabo mensageiro/neutro de 0 V (*ground*).

3.3.2 Simulações de Esforços Mecânicos

Foram realizadas simulações mecânicas no COMSOL, utilizando o módulo de mecânica estrutural, para o projeto do espaçador desenvolvido, utilizando como base a ABNT NBR 16094 [63]. Segundo esta norma, os ensaios mecânicos que se aplicam são:

- Item 7.1.3: Ensaios de resistência à tração de curta duração;
- Item 7.1.4 - Ensaio de resistência à tração de longa duração.

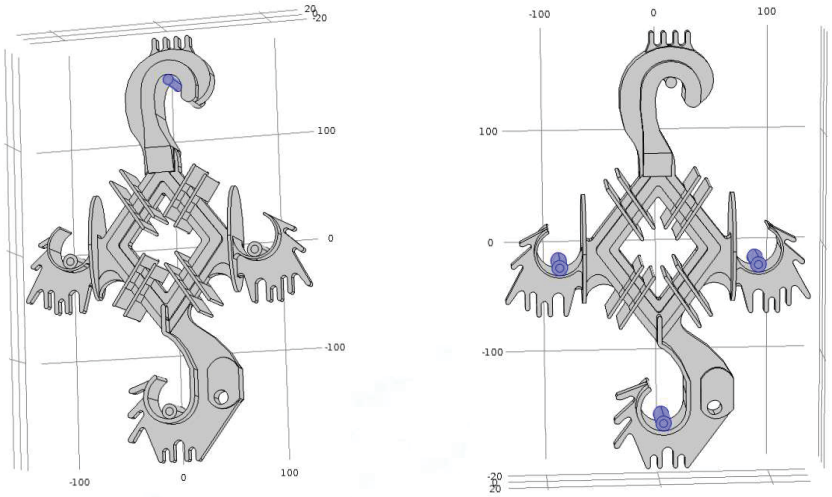
Estes itens de norma se baseiam na aplicação de forças e inspeção da deformação plástica após remoção da força aplicada durante horas, porém o método de simulações mecânicas no COMSOL apresenta resultados estáticos e não animados, permitindo apenas a aferição de máximas tensões internas e deformação do objeto em estudo quando submetido às máximas forças aplicadas.

A geometria e os materiais definidos foram os mesmos utilizados nas simulações computacionais de campo elétrico (seção 3.3.1), com a adição das propriedades indicadas na Tabela 7 para o material HPDE.

Tabela 7 – Parâmetros do HDPE utilizados para a simulação mecânica

Coeficiente de Poisson	0,45
Módulo de Young	290 Mpa

As condições de contorno para a simulação de esforços mecânicos correspondem à definição dos pontos conhecidos de esforços. Neste caso, o cabo mensageiro foi definido como ponto fixo (Figura 29a) e os cabos de fase definidos como os pontos de aplicação de força vertical de 3 kN para baixo (Figura 29b), simulando o peso dos cabos.



a) b)

Figura 29 - Pontos estabelecidos para aplicação de força

3.3.3 Ensaios de Compatibilidade Dielétrica – Multiestressamento (Etapa de Desenvolvimento do Projeto)

Os ensaios realizados tiveram como base os procedimentos adotados no ensaio de compatibilidade elétrica descrito no Documento Técnico ABRADEE 18.24: Especificação de espaçador, separador e amarrações para rede compacta de 13,8 kV e 34,5 kV [62]. O ensaio de compatibilidade, não-normalizado, será denominado daqui por diante de ensaio de multiestressamento.

O arranjo experimental para realização do ensaio de multiestressamento foi montado com diferentes configurações de espaçadores comerciais no laboratório de Compatibilidade Dielétrica do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec), considerando diferentes dimensões (espaçador de 15 kV e espaçador de 34,5 kV) e a presença de fita semicondutora nas superfícies dos berços.

A Figura 30 mostra uma representação esquemática do arranjo experimental e a Figura 31 mostra o detalhe da montagem e disposição dos espaçadores e isoladores. Na Tabela 8 estão descritos os códigos adotados para identificação equipamentos utilizados.

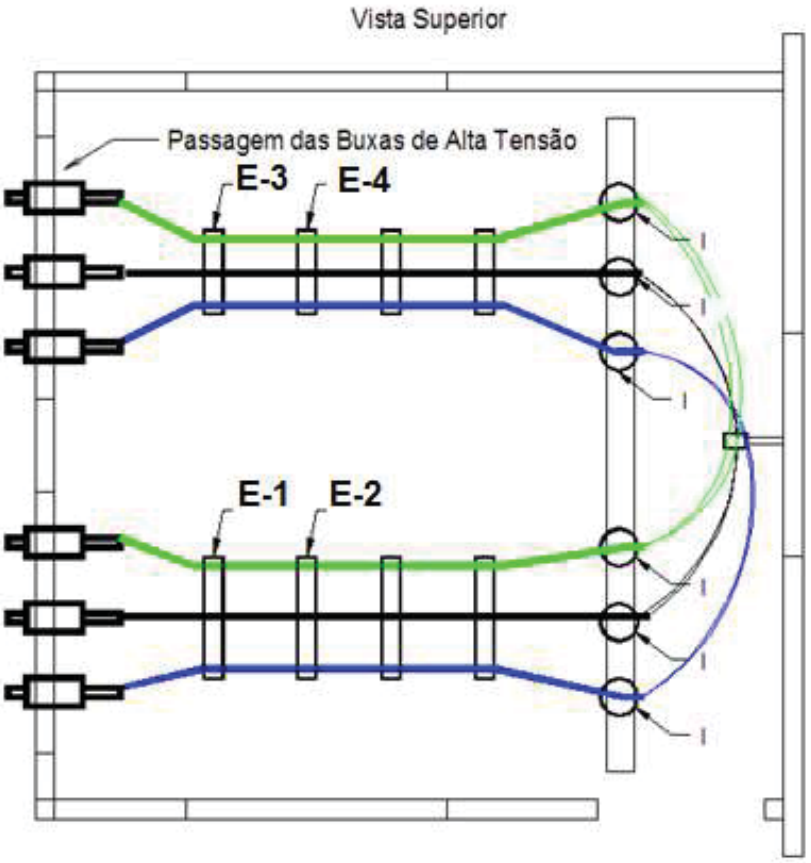


Figura 30 – Representação esquemática do arranjo experimental



Figura 31 – Detalhe da montagem e disposição dos espaçadores

Tabela 8 – Equipamentos e montagens dos ensaios de compatibilidade dielétrica

Código	Equipamento	Montagem
E-1	Espaçador 15 kV	Com fita semicondutora colada no espaçador
E-2	Espaçador 34,5 kV	Com fita semicondutora colada no espaçador
E-3	Espaçador 34,5 kV	Montagem padrão
E-4	Espaçador 15 kV	Montagem padrão

Para os ensaios, com duração de 30 dias, foram utilizados os seguintes parâmetros de teste:

- Ciclos de aspersão de chuva de 05 (cinco) minutos, com 15 (quinze) minutos sem aspersão;
- Fluxo de aspersão de 01 $\frac{mm}{min}$ de água com condutividade de 1500 µS/cm durante 12 dias e de água com condutividade de 2100 µS/cm durante 18 dias;
- Tensão aplicada de 13,8 kV entre fases e corrente elétrica para manter a temperatura da superfície do cabo em 60 ºC.

Conforme especificado em norma, após a realização do ensaio foi realizada inspeção visual (com documentação fotográfica) para avaliação dos espaçadores quanto a presença de pontos de trilhamento elétrico ou erosão nos espaçadores.

3.3.4 Ensaios de Multiestresamento (Etapa de Avaliação dos Protótipos)

Os ensaios realizados tiveram como base os procedimentos adotados no ensaio de compatibilidade elétrica [62]. Foi realizada montagem de arranjo para o ensaio de multiestressamento com o intuito de avaliar os protótipos dos espaçadores desenvolvidos. O arranjo experimental montado no laboratório de Compatibilidade Dielétrica do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec) está apresentado na Figura 32.

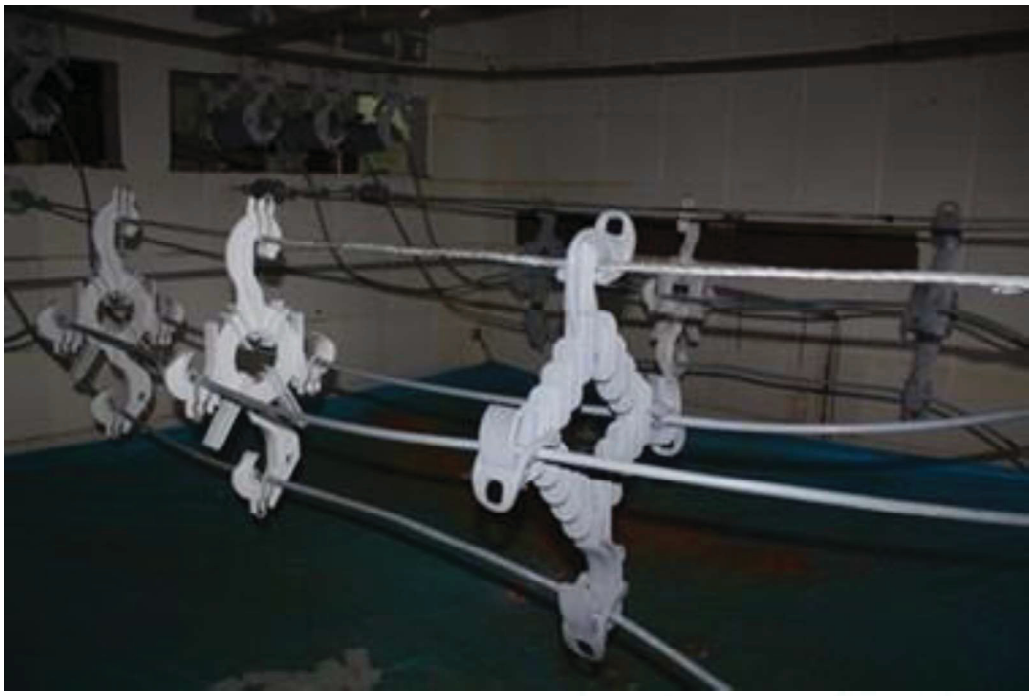


Figura 32 - Arranjo experimental

Foram realizados dois ensaios:

- 1° Ensaio:
  - Tensão aplicada: 40 kV fase-fase (tensão utilizada superior à tensão das redes de 15 kV com o intuito de aumentar o estresse aplicado);
  - Condutividade da água: 750 µS/cm;
  - Temperatura no condutor = 60 ºC;
  - Instalação de protótipos do espaçador com formulação AZ e AM, e de espaçadores convencionais de 2 fornecedores;
  - Duração: 15 dias e 30 dias.
- 2° Ensaio:
  - Tensão aplicada: 40 kV fase-fase;
  - Condutividade da água: 2250 µS/cm;
  - Instalação de protótipos do espaçador com formulação AZ e AM;
  - Duração: 15 dias e 46 dias.

Para efeitos de avaliação e comparação dos resultados obtidos no ensaio, a ocorrência de cintilação e trilhamento elétrico em relação à inspeção visual foi classificada nos seguintes níveis:

- Sem ocorrência;
- Leve;
- Moderada;
- Severa.

3.3.5 Ensaios para Verificação de Conformidade com Requisitos Normalizados quanto aos Esforços Mecânicos

Foram realizados ensaios para verificação dos protótipos de espaçador para redes protegidas de regiões com média e elevada agressividade ambiental, quanto ao atendimento dos requisitos estabelecidos na norma ABNT NBR 16094 [63]. Entre os ensaios estão:

- Resistência à tração de longa duração - foi realizado nos espaçadores desenvolvidos após envelhecimento em estufa por 168 h a 110 °C com medições das cotas antes e após ensaio, o qual teve duração de 216 h;
- Resistência à tração de curta duração - foi realizado ensaio de tração curta duração nos espaçadores antes e após o envelhecimento em estufa por 168 h a 110 °C, conforme apresentado na Figura 33.



Figura 33 – Imagem do espaçador durante o ensaio de resistência a tração curta duração

3.3.6 Avaliação em Campo

Para a avaliação em campo foram escolhidos dois trechos de redes protegidas em regiões de elevada agressividade ambiental, chamados de redes pilotos, nos quais foram instalados os protótipos dos espaçadores desenvolvidos. Não foram instalados espaçadores convencionais para efeitos de comparação com o espaçador desenvolvido em função de não haver permissão da concessionária de energia detentora da concessão da rede, uma vez que os equipamentos comercialmente disponíveis não apresentam a confiabilidade mínima requerida em regiões de elevada agressividade ambiental.

A primeira rede piloto (REDE 01) foi instalada no município de Barra do Sul, localizado no estado de Santa Catarina, estando o trecho escolhido há uma distância de 200 m do mar. A segunda rede piloto (REDE 02) foi instalada no mesmo município, sendo esta localizada em frente à orla marítima, com distância de 30 m do mar. As coordenadas geográficas das redes 01 e 02 são, respectivamente, 26°27'50.3"S 48°36'25.3"W e 26°28'07.3"S 48°36'31.0"W.

4 DESENVOLVIMENTO DE ESPAÇADOR PARA REDES PROTEGIDAS DE REGIÕES COM ELEVADA AGRESSIDIVADE AMBIENTAL

4.1 Simulações Computacionais de Campo Elétrico

A distribuição das tensões elétricas no espaçador para o instante *T1* simulado (tensão de pico na Fase A, conforme descrito na seção 3.3.1) está apresentada na Figura 34. Na Figura 35 podem ser verificados os resultados da intensidade de campo elétrico no espaçador convencional nesta condição. Para que fosse possível a visualização da intensidade de campo elétrico considerando os domínios do espaçador, dos cabos e do ar, os resultados estão apresentados para um corte na seção transversal da geometria, na posição do meio da espessura do espaçador, conforme se pode visualizar também na Figura 35. Cabe ressaltar que a escolha pela apresentação do corte (xy) no meio da espessura ($z = 0$) do espaçador deve-se ao fato de que nesta posição foi verificada a intensidade máxima de campo elétrico, comparando-se com um corte (xy) em outras posições ($z \neq 0$).

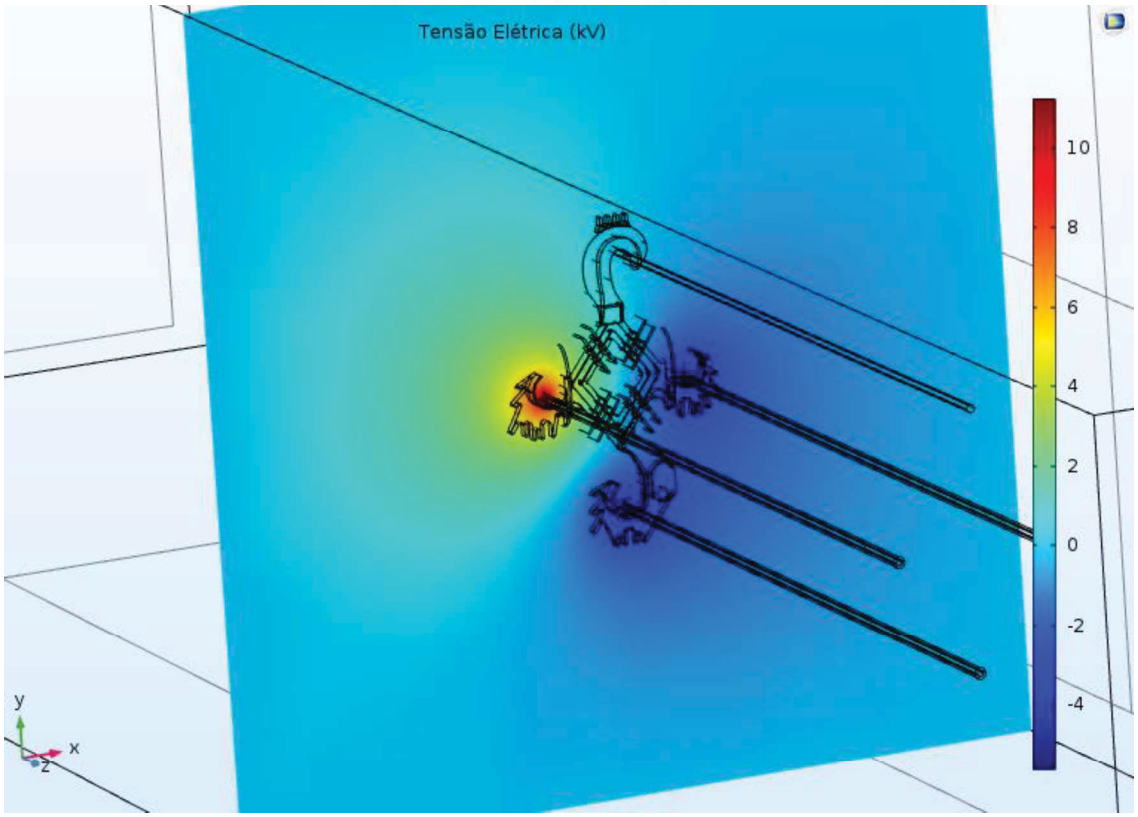


Figura 34 – Tensões elétricas no espaçador convencional

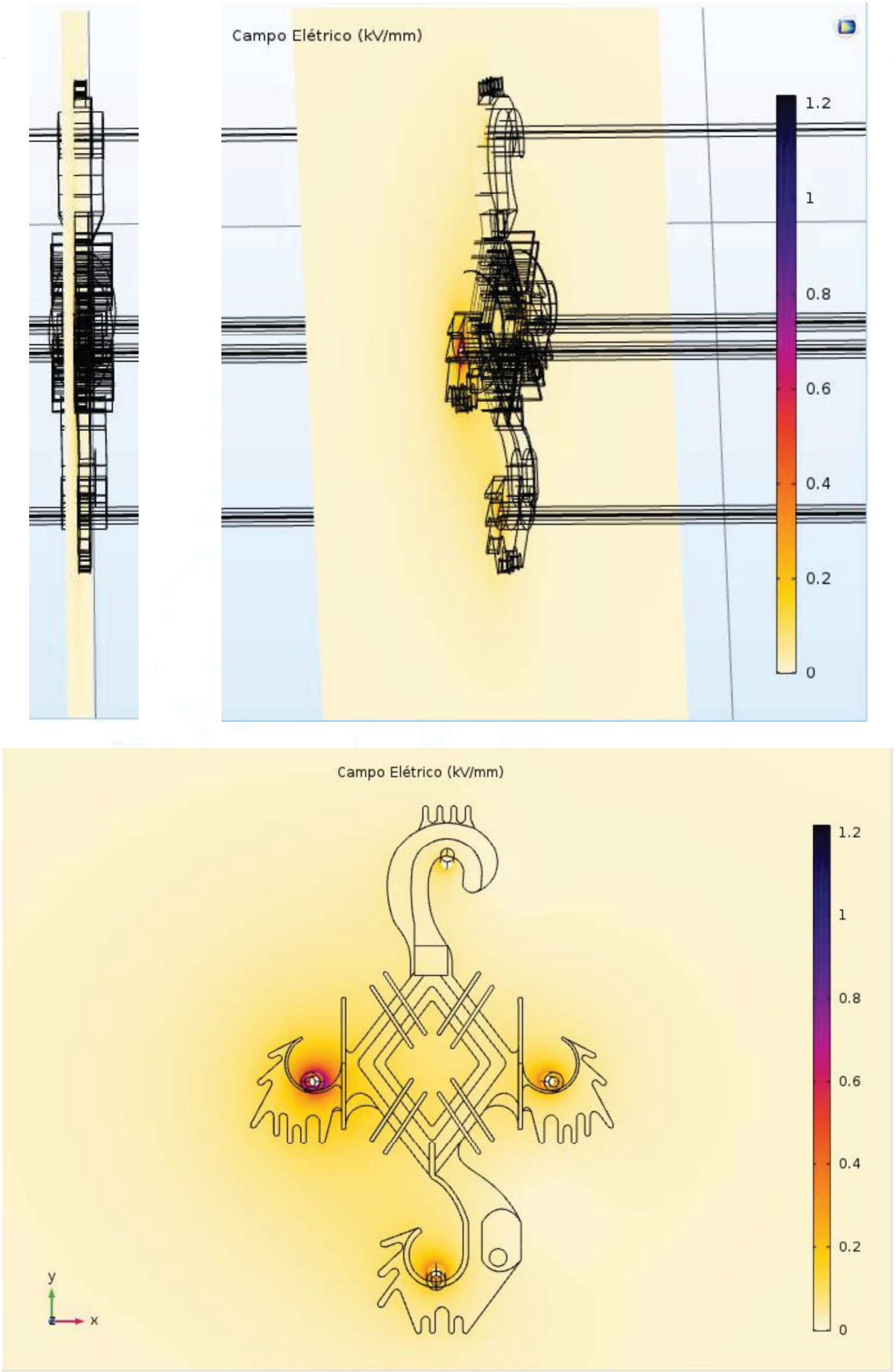


Figura 35 – Campo elétrico no projeto base do espaçador convencional 3D

Na Figura 35 pode-se verificar que os resultados da simulação computacional indicam que as regiões do espaçador com maior intensidade de campo elétrico são as dos seus berços. A maior intensidade de campo elétrico nestas regiões justifica-se pela maior proximidade dos condutores com tensão elétrica. Embora a intensidade de campo elétrico E dependa da característica e da fonte (carga) geradora deste campo (fator K), sua relação é inversa, com expoente variável n, com a distância d entre o ponto de cálculo do campo e a fonte geradora [33], conforme se pode observar na relação geral descrita na Equação (10). Ainda, uma vez que o condutor da fase A é o que apresenta o maior nível de tensão no instante *T1* simulado, o campo elétrico mais intenso observado no berço da fase A do espaçador em relação aos berços das fases B e C e do cabo de neutro do sistema também é justificado [33] (Equação (11)).

$$E = K\frac{1}{d^n} \qquad (10)$$

$$E \propto V \qquad (11)$$

Uma vez que a simulação da geometria tridimensional do problema acarreta em grande esforço computacional, foi realizada a simulação do espaçador convencional considerando a modelagem da seção transversal dos espaçadores e dos cabos em ambiente bidimensional (2D) com o intuito de avaliar a representatividade desta abordagem. Na Figura 36 podem ser verificados os resultados da intensidade de campo elétrico no espaçador convencional (2D).

De acordo com a Figura 35 e a Figura 36 é possível verificar que os resultados da simulação 2D são equivalentes a um corte transversal da simulação 3D no meio do espaçador (condição de campo mais intenso). Assim, optou-se por realizar as demais avaliações quanto a intensidade de campo elétrico em modelos bidimensionais.

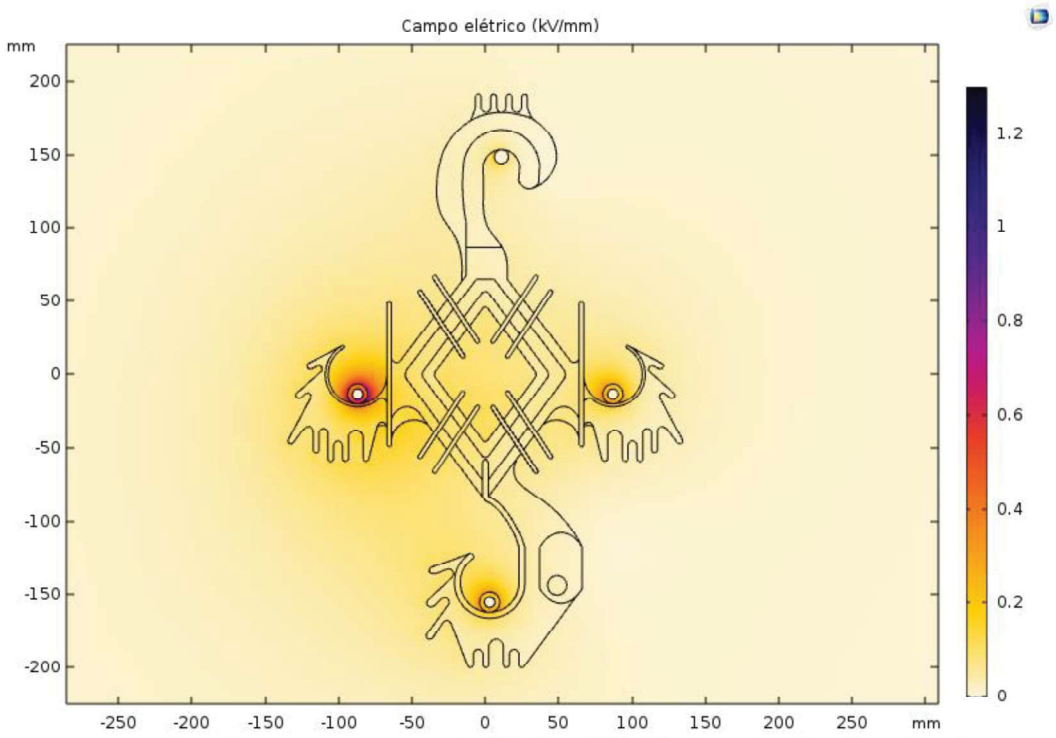


Figura 36 – Campo elétrico no projeto base do espaçador convencional 2D

Na Figura 37 podem ser verificados os resultados da intensidade de campo elétrico no espaçador convencional com escala alterada para melhor visualização (as regiões em branco possuem campo superior ao da escala utilizada).

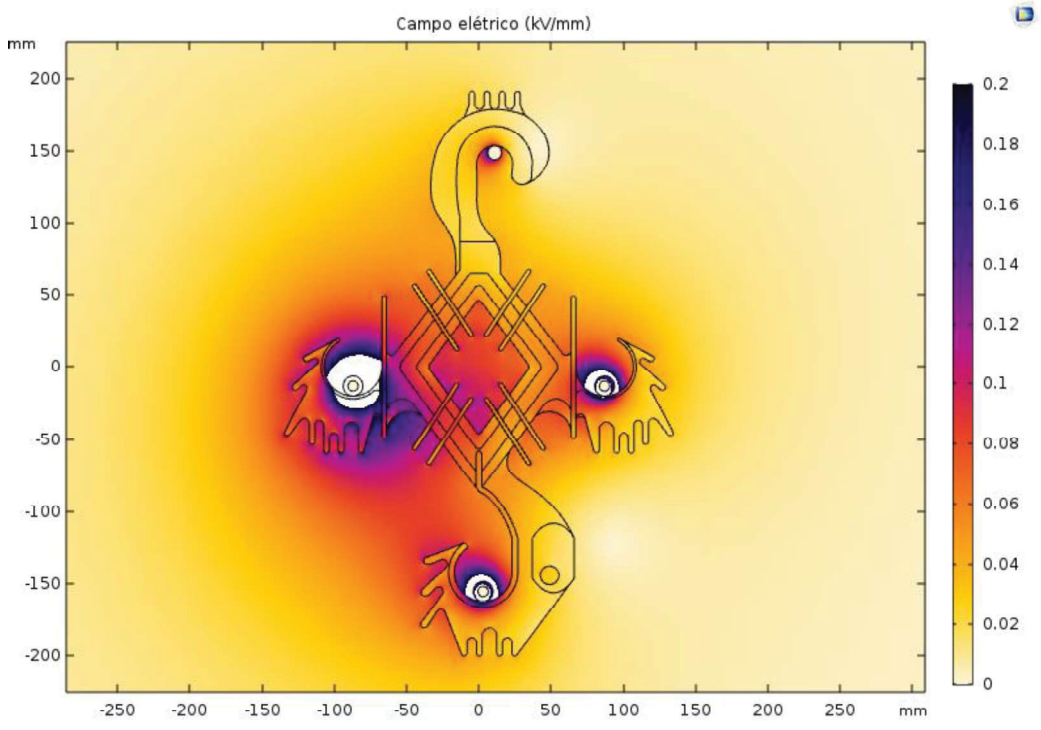


Figura 37– Campo elétrico no projeto base do espaçador convencional com escala alterada (regiões em branco possuem campo superior ao da escala)

Conforme se pode observar na Figura 36 e na Figura 37, de acordo com as simulações, os valores de campo elétrico mais intenso são observados no domínio do Ar, nas regiões da interface ar + cabo + espaçador (berços do espaçador onde os cabos das fases estão alocados). Na Figura 38 pode-se visualizar a intensidade de campo elétrico na região da interface ar + cabo + espaçador do berço da fase A do espaçador.

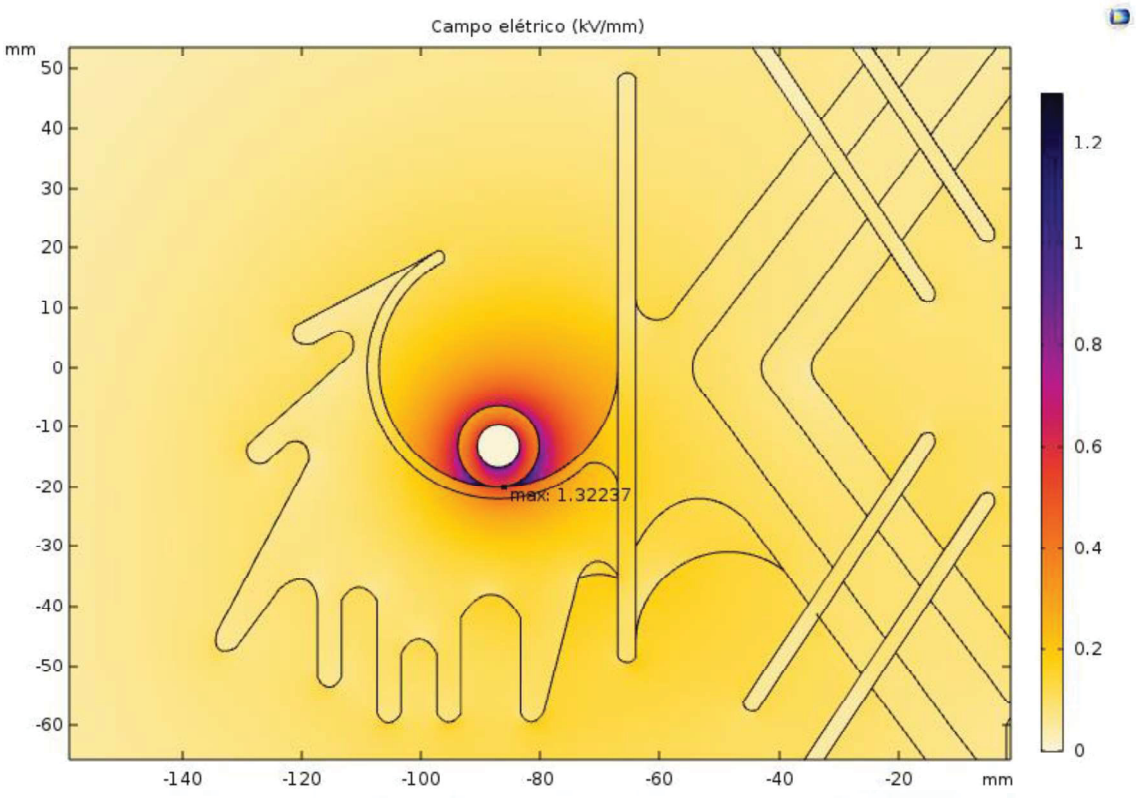


Figura 38 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional

Na Figura 38 é possível verificar que a intensidade de campo elétrico máxima na região da interface ar + cabo + espaçador no berço da fase A é de $1{,}32\ [kV/mm]$ e, conforme discutido, ocorre no domínio do Ar. O resultado encontrado é coerente com a fundamentação teórica, uma vez que a existência de um dielétrico submetido a um campo elétrico leva à concentração do campo elétrico no material na razão inversa das constantes dielétricas [10, 33]. Assim, sendo ε_{r0} a permissividade relativa do Ar e ε_{r1} a permissividade relativa do HDPE (ver Figura 39), como $\varepsilon_{r0} < \varepsilon_{r1}$, tem-se que $E_0 > E_1$. Neste caso, $\varepsilon_{r1} = 2{,}3\varepsilon_{r0}$, assim, na região da interface $E_0 = 2{,}3E_1$, conforme pode-se verificar na Figura 40 (região da interface ar + cabo + espaçador).

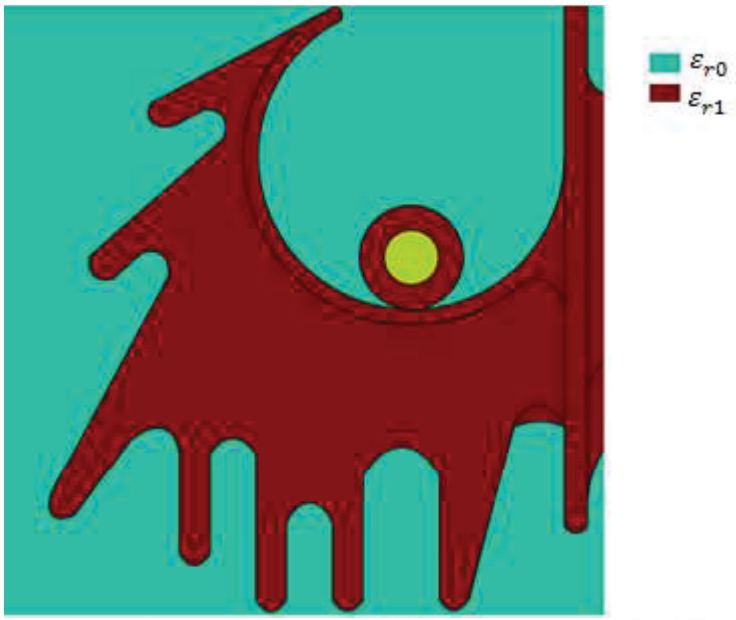


Figura 39 – Permissividades elétricas nos domínios modelados: ar e HDPE

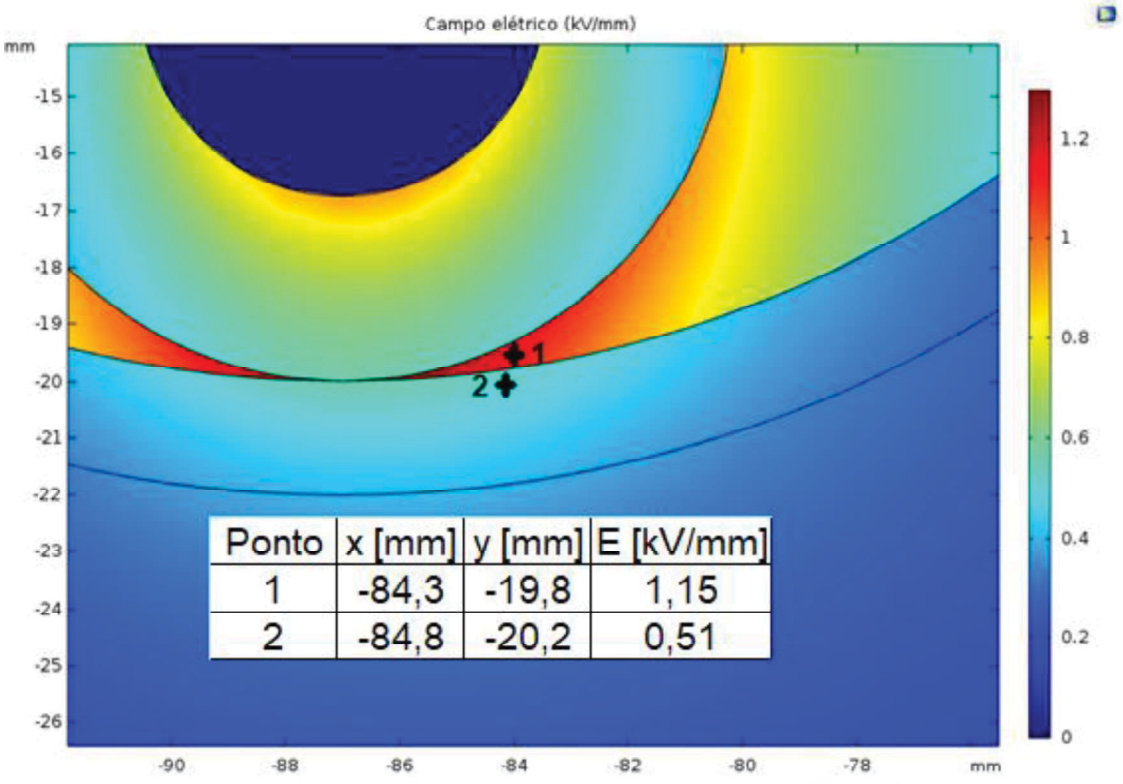


Figura 40 – Intensidade de campo elétrico na região da interface ar + cabo + espaçador

Considerando que o objetivo dos estudos dos espaçadores das redes protegidas é possibilitar sua utilização em regiões com elevada agressividade ambiental, foram realizadas simulações computacionais da distribuição de campo elétrico para avaliação dos efeitos de resíduos de poluição e maresia com umidade nos espaçadores (bandas condutivas). Na Figura 41 podem ser verificados os resultados da intensidade de campo elétrico na região do berço

da Fase A para o espaçador convencional com bandas condutivas na superfície dos berços e dos cabos.

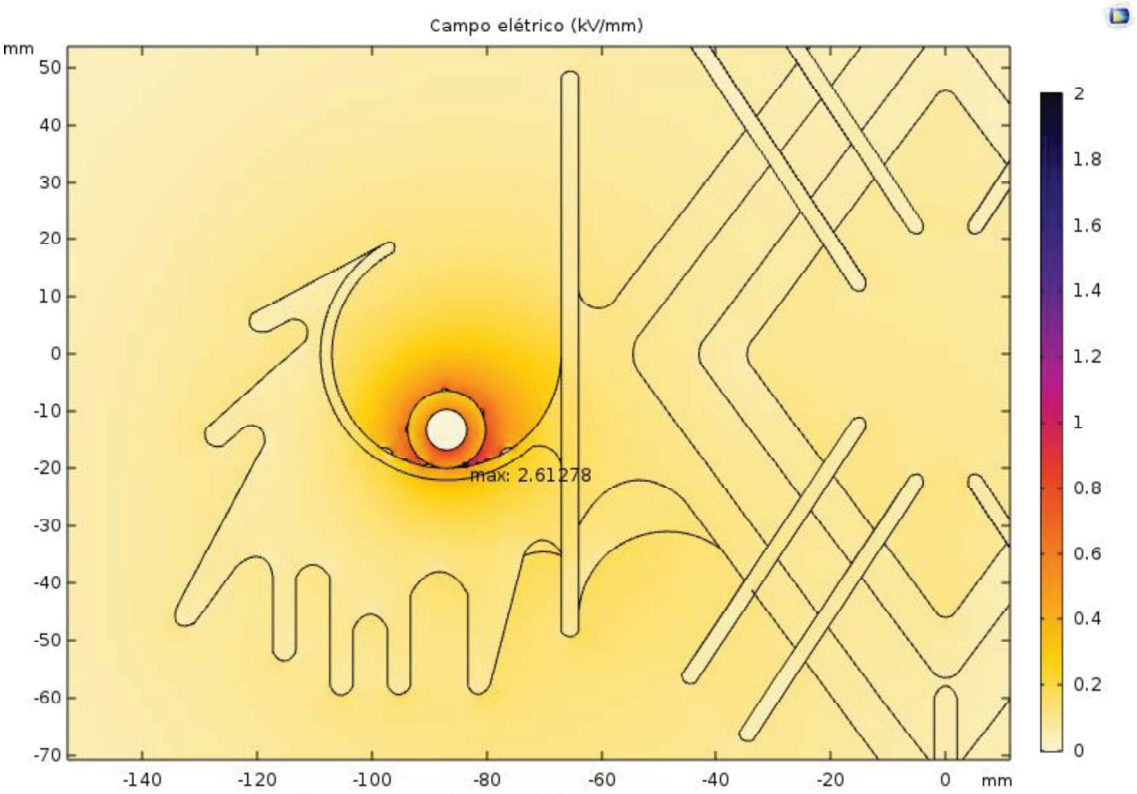


Figura 41 – Campo elétrico no berço da Fase A do espaçador convencional com bandas condutivas na superfície dos seus berços e cabos

Os resultados da simulação considerando bandas condutivas na superfície do berço do espaçador e do cabo, apresentados na Figura 41, mostram que o campo elétrico nesta região é intensificado quando comparado com a condição sem a presença de bandas condutivas (Figura 38). O valor de campo elétrico máximo sem bandas condutivas é de $1{,}32\ [kV/mm]$ e com bandas condutivas de $2{,}61\ [kV/mm]$. Essa elevação deve-se justamente à presença das bandas de poluição que possuem uma maior permissividade elétrica que o HDPE e que o Ar. Neste caso, analisando a interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas, sendo ε_{r0} a permissividade relativa do Ar, ε_{r1} a permissividade relativa do HDPE e ε_{r2} a permissividade relativa das bandas condutivas (ver Figura 42), como $\varepsilon_{r0} < \varepsilon_{r1} < \varepsilon_{r2}$, tem-se que $E_0 > E_1 > E_2$.



Figura 42 – Permissividades elétricas nos domínios modelados: ar, espaçador e camada de proteção do cabo, e bandas condutivas

Na Figura 43 visualiza-se a intensidade de campo elétrico na região da interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas e na Figura 44 a intensidade de campo elétrico nesta região ampliada (detalhe do local onde observa-se o maior nível de campo elétrico).

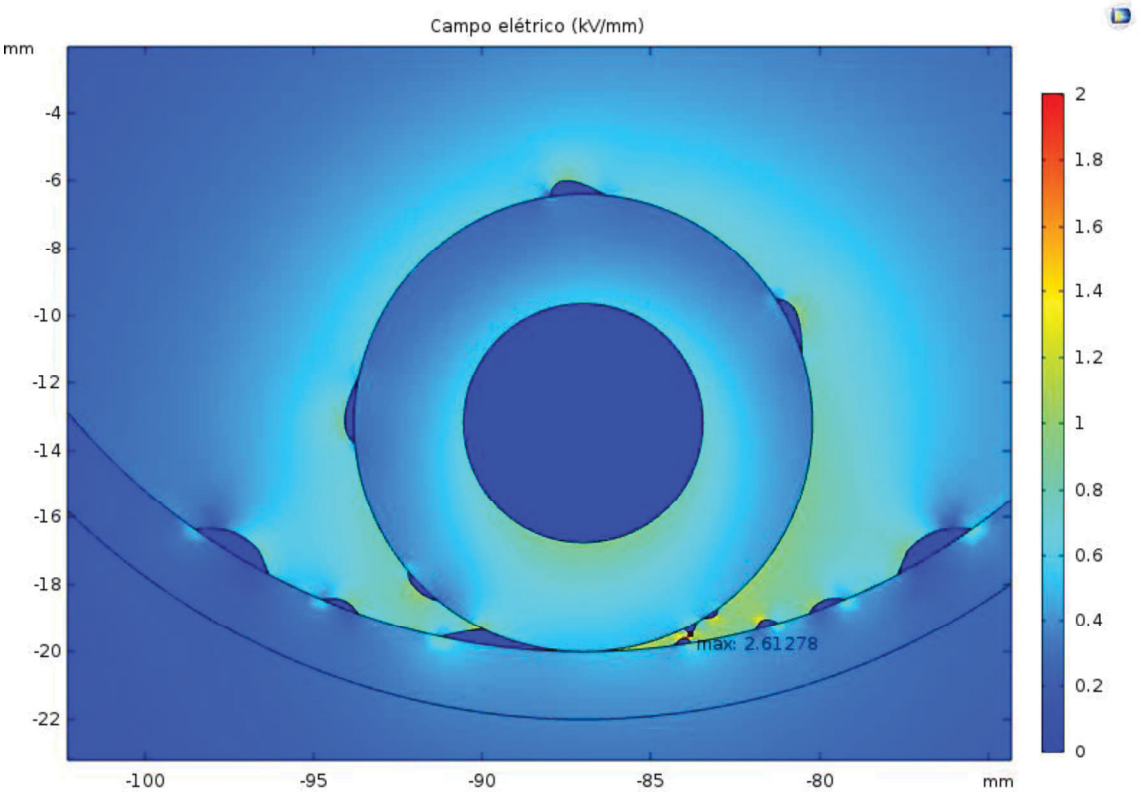


Figura 43 – Campo elétrico interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas para o espaçador convencional

Na Figura 43 pode-se verificar que as bandas condutivas foram representadas em formatos e tamanhos diferentes nas superfícies do berço do espaçador e do cabo. No lado esquerdo da interface ar + cabo + espaçadores, por exemplo, representou-se um preenchimento completo com as bandas condutivas, já no lado direito, estas foram representadas como semi-elipses (o formato arredondado utilizado é deformado na visualização em função da ampliação). Através desta avaliação foi possível identificar que os níveis de campo elétrico mais intensos ocorrem quando as bandas condutivas estão mais próximas umas das outras, mas de forma que ainda exista uma região preenchida por Ar entre elas (ver Figura 44).

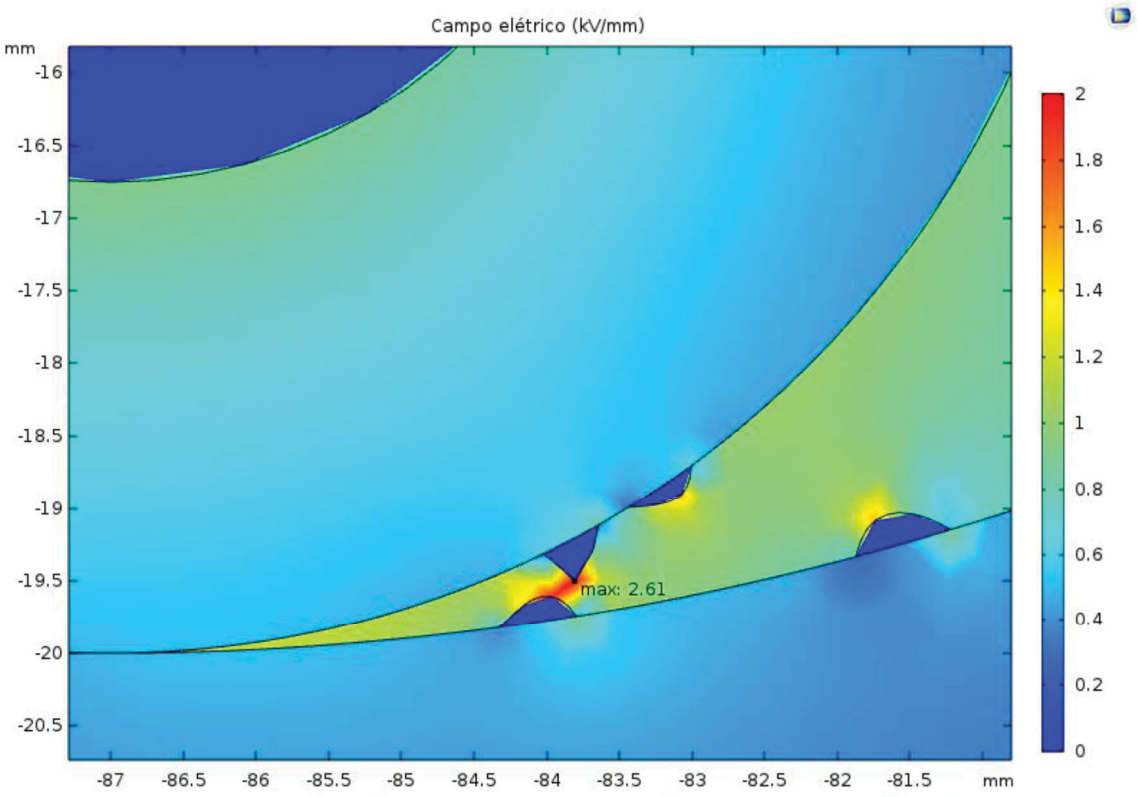


Figura 44 – Campo elétrico interface (ampliada) ar + cabo + espaçador + bandas condutivas para o espaçador convencional

Conforme descrito na fundamentação teórica deste trabalho (seção 2.1.2.1.2) a ocorrência de descargas parciais em um meio gasoso está condicionada à existência de um campo elétrico igual ou maior que o campo elétrico disruptivo para este gás, o qual depende da pressão do gás e da distância entre os eletrodos. Considerando as devidas aproximações pode-se estimar que o campo elétrico disruptivo no ar atmosférico (pressão de 1 atm) é da ordem de $3{,}00\ [kV/mm]$, para campos uniformes. No caso da geometria

analisada, com a presença dos contaminantes superficiais no cabo e no berço do espaçador verificou-se que a intensidade de campo elétrico máximo no ar (região da interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas) calculada pela simulação computacional ($2{,}61\ [kV/mm]$) se aproxima da intensidade de campo elétrico disruptivo estimado para este gás. Avaliando a área preenchida pelo ar na região da interface, a intensidade de campo elétrico máximo no ar ($E_{máx} = 2{,}61\ [kV/mm]$) é inferior a 5 vezes o campo elétrico médio ($E_{máx} = 1{,}05\ [kV/mm]$) nesta mesma área (ver Figura 45), atendendo a condição proposta por Abdel-Salam at al. [38] para que campo elétricos possam ser considerados uniformes.

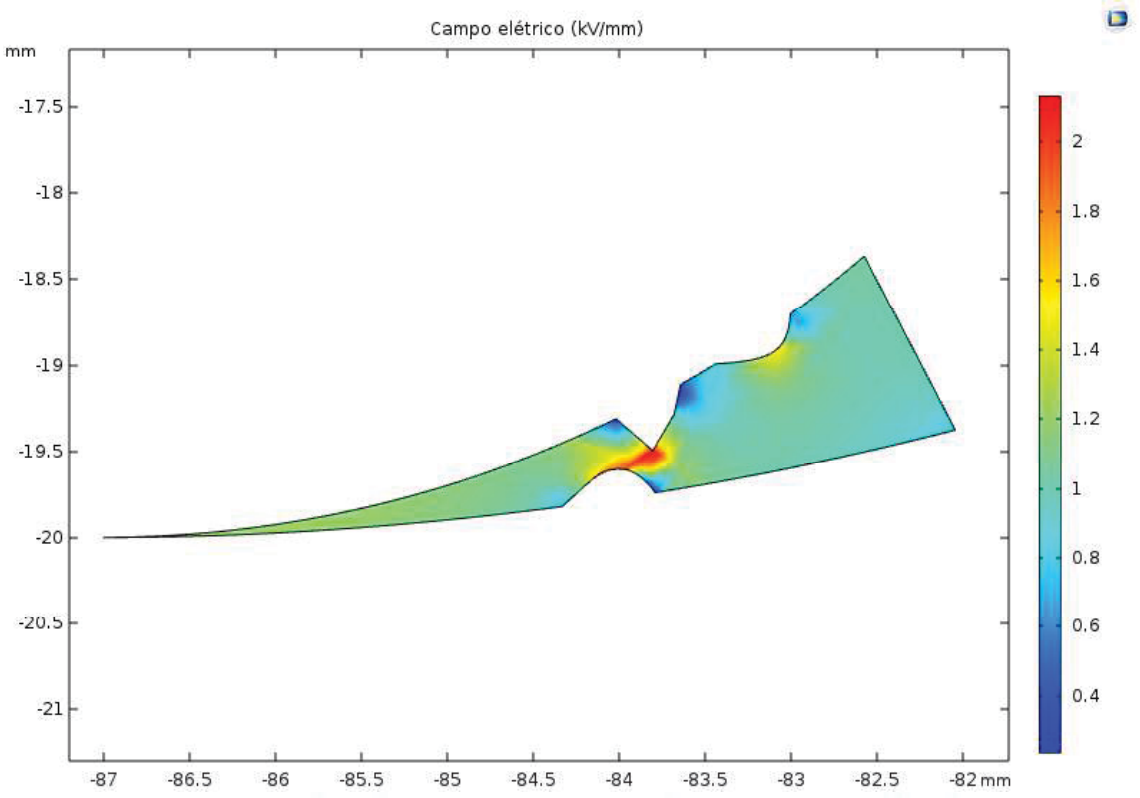


Figura 45 – Intensidade de campo elétrico máximo e médio na área preenchida por ar na região da interface

Assim, pode-se dizer que a presença de bandas condutivas nas superfícies do espaçador e do cabo protegido propiciam a ocorrência de descargas parciais superficiais, justificando a ocorrência de trilhamento elétrico observada em campo (seção 2.2.2) nos espaçadores de 15 kV quando estes são instalados em redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental.

Conforme descrito, a intensidade de campo elétrico depende da carga que o gera (puntiforme, dipolo elétrico, linha de carga, entre outras), mas sua relação com a distância é dada sempre na proporção inversa (simples, quadrática, outras) [33]. Desta forma, para o caso do espaçador das redes protegidas, com o aumento percentual das dimensões totais do mesmo haverá um maior distanciamento entre os condutores das fases e do neutro e, consequentemente, deverá haver uma redução na intensidade do campo elétrico $E = \mathrm{K}\frac{1}{\%d^n}$, para $\%d > 0$ em relação à situação inicial. Então, com o objetivo de avaliar a variação da intensidade de campo elétrico na região do espaçador susceptível à ocorrência de descargas superficiais (interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas), foram realizadas simulações computacionais em função do aumento percentual das dimensões totais do aumentadas de 20 em 20% até um aumento de 100%. Uma vez que a região de interesse nesta avaliação corresponde à região do berço do espaçador, os resultados das simulações são apresentados para esta região, conforme se pode verificar da Figura 46 à Figura 50.

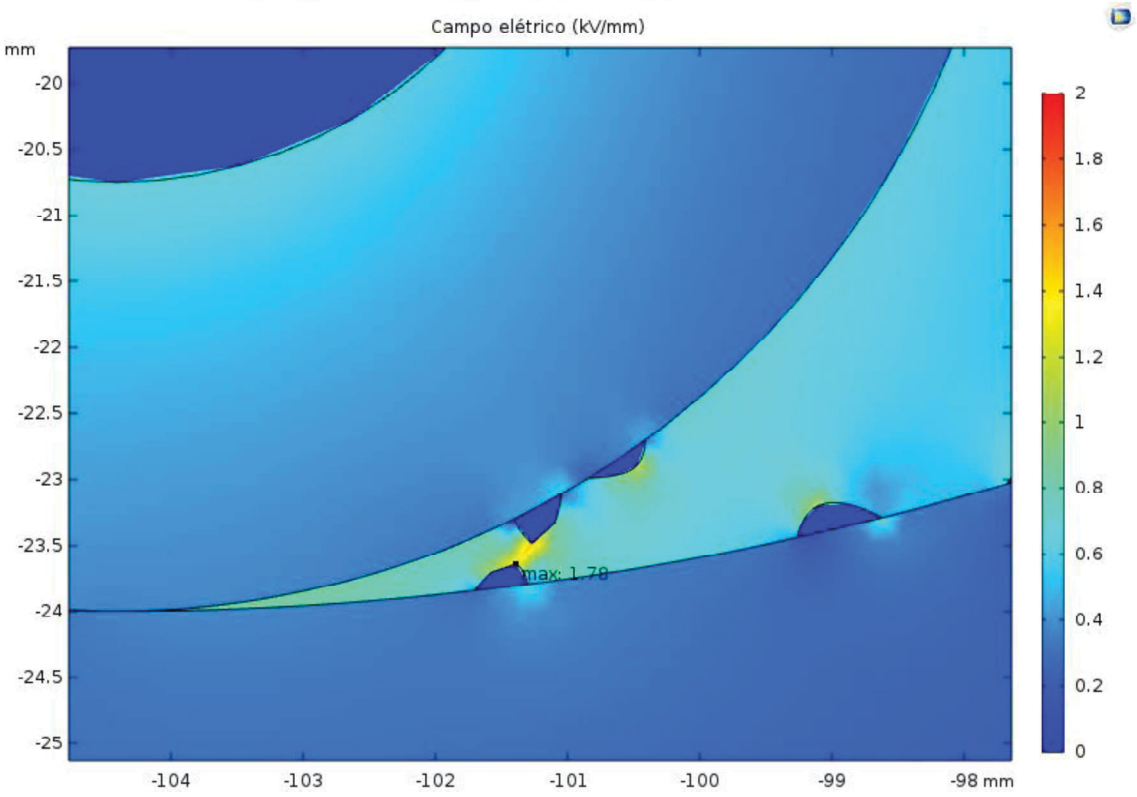


Figura 46 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 20% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços

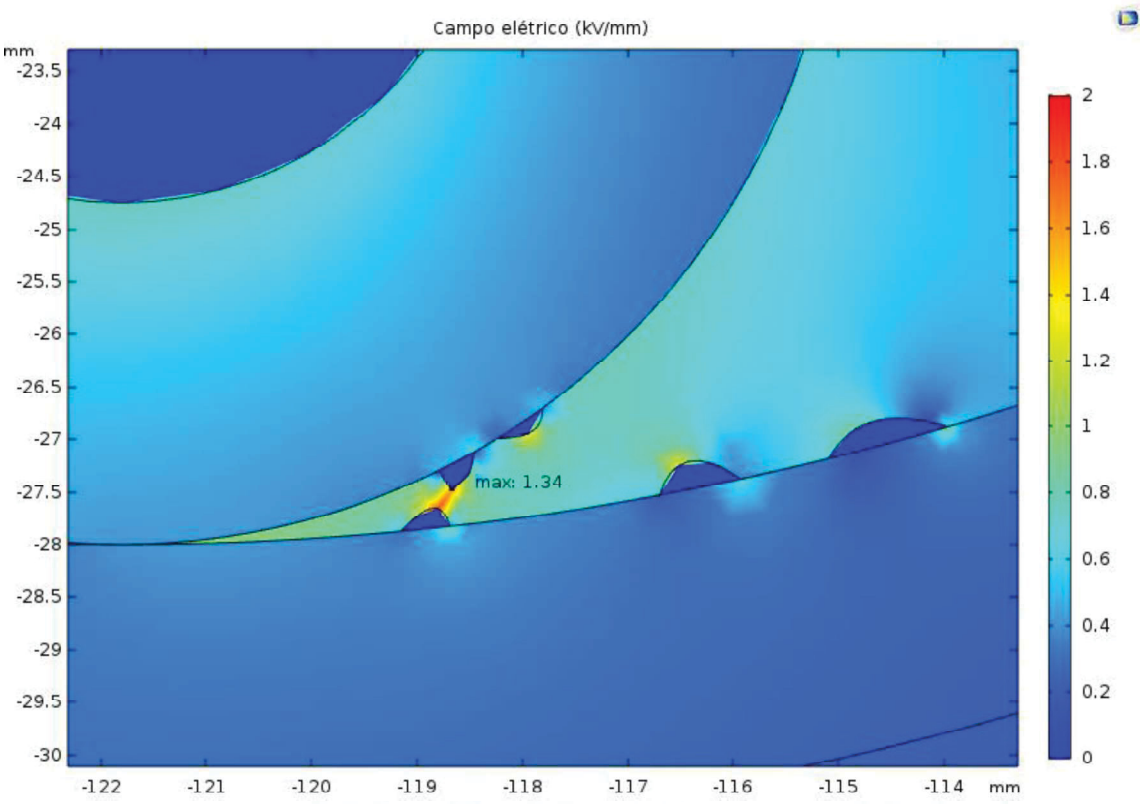


Figura 47 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 40% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços

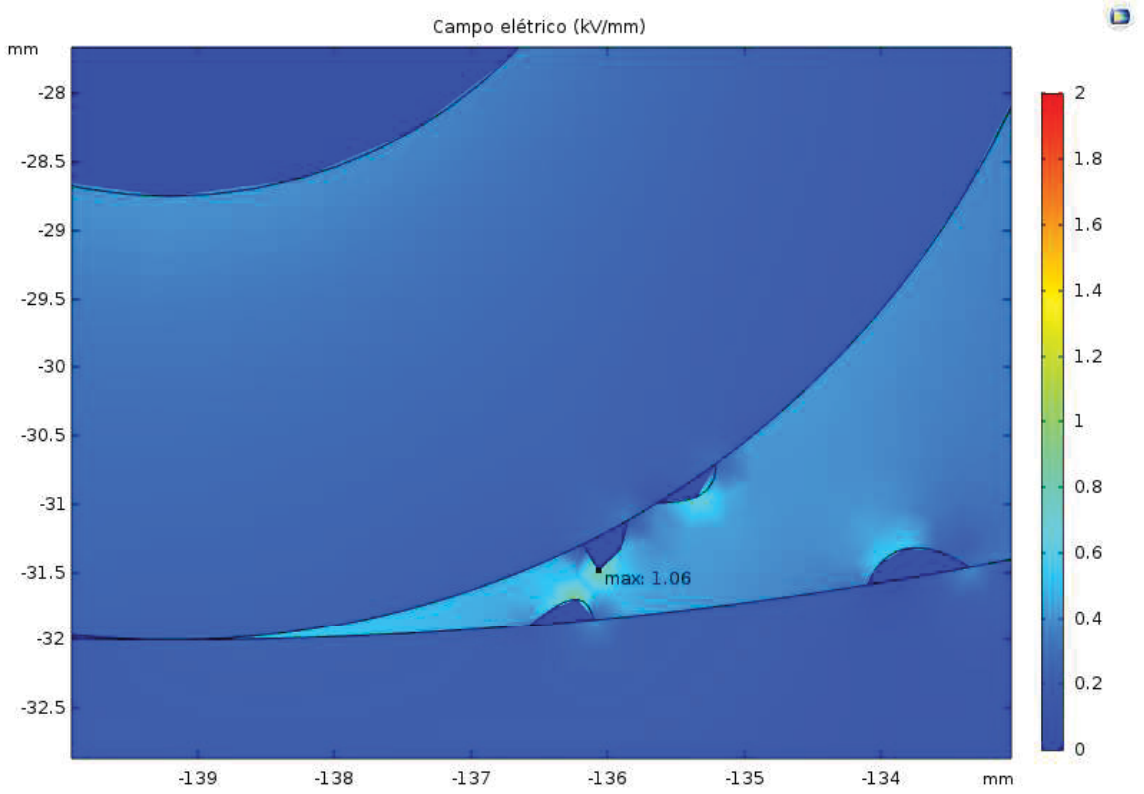


Figura 48 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 60% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços

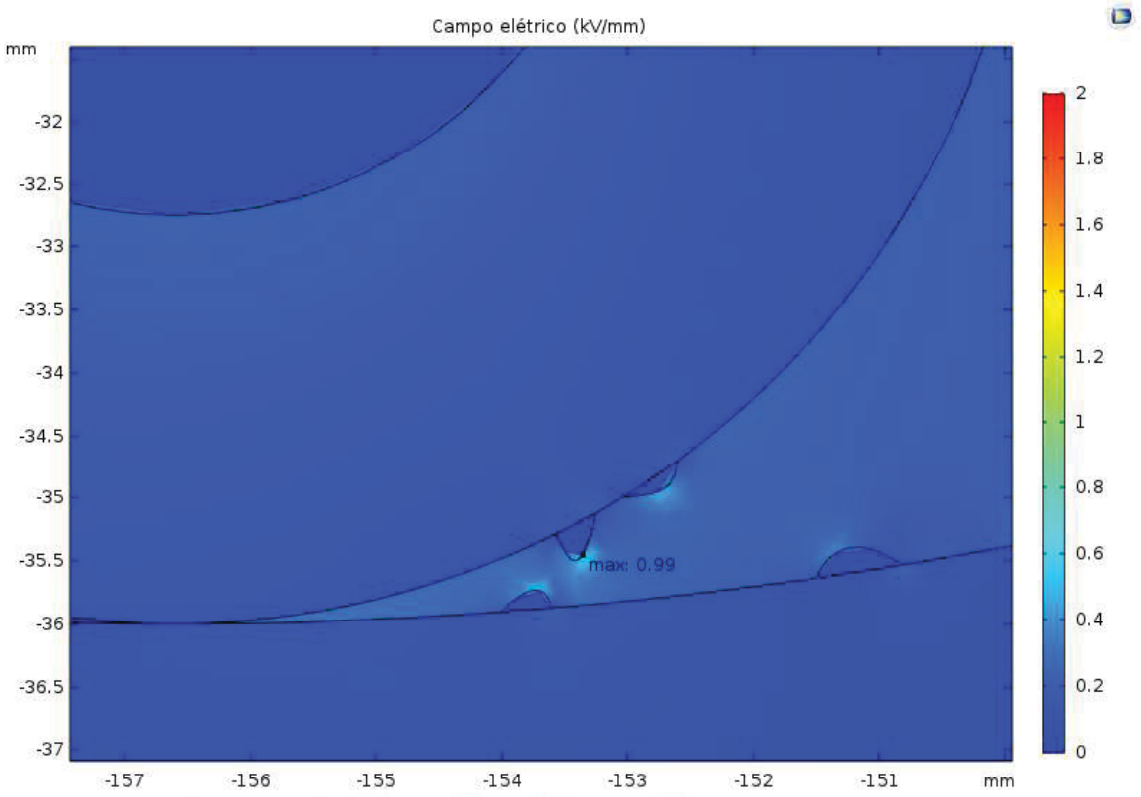


Figura 49 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 80% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços

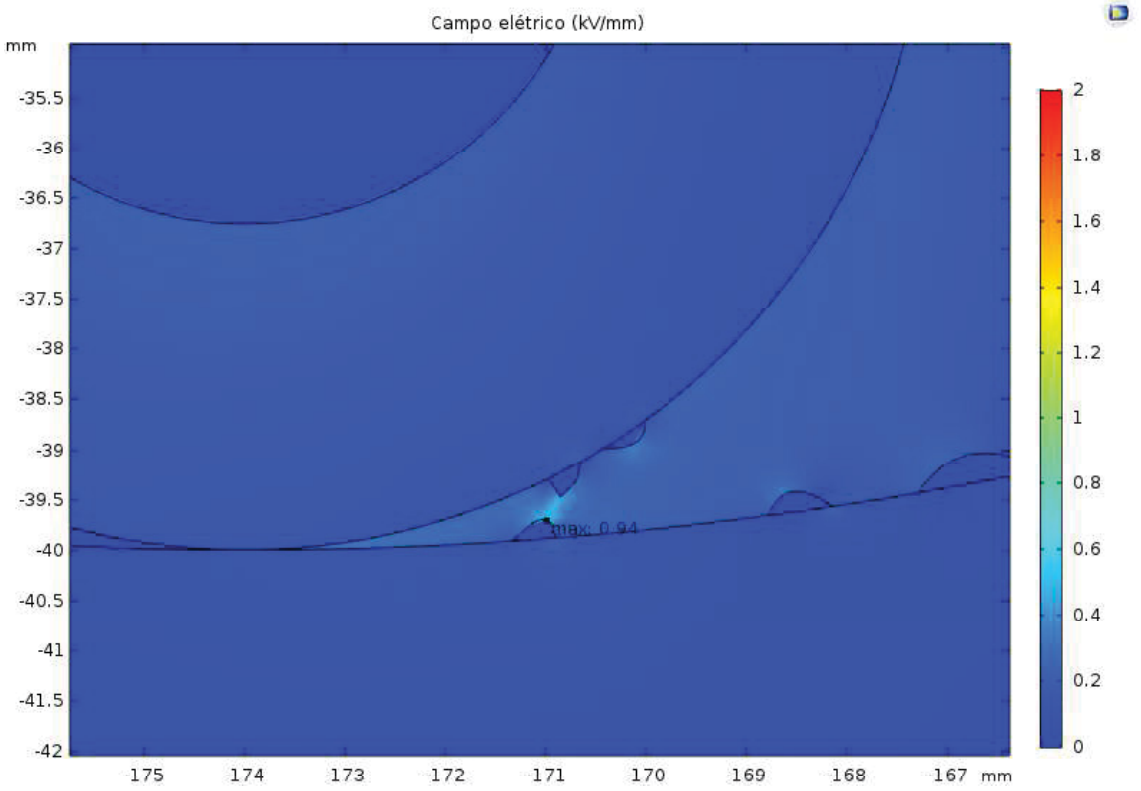


Figura 50 – Campo elétrico no berço da Fase A para o espaçador convencional com aumento de 100% em suas dimensões e com bandas condutivas nos seus berços

Observando os resultados das simulações de campo elétrico (Figura 46 à Figura 50) para aumentos graduais (20 em 20%) das dimensões totais do espaçador verifica-se uma há uma redução gradual da intensidade de campo elétrico na região da interface ar + cabo + espaçador com a presença de bandas condutivas nas superfícies do berço do espaçador e do cabo. No gráfico da Figura 51 estão apresentados os valores de campo elétrico máximo na interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas (fase A) em função da porcentagem de aumento da dimensão do espaçador obtidos nas simulações computacionais.

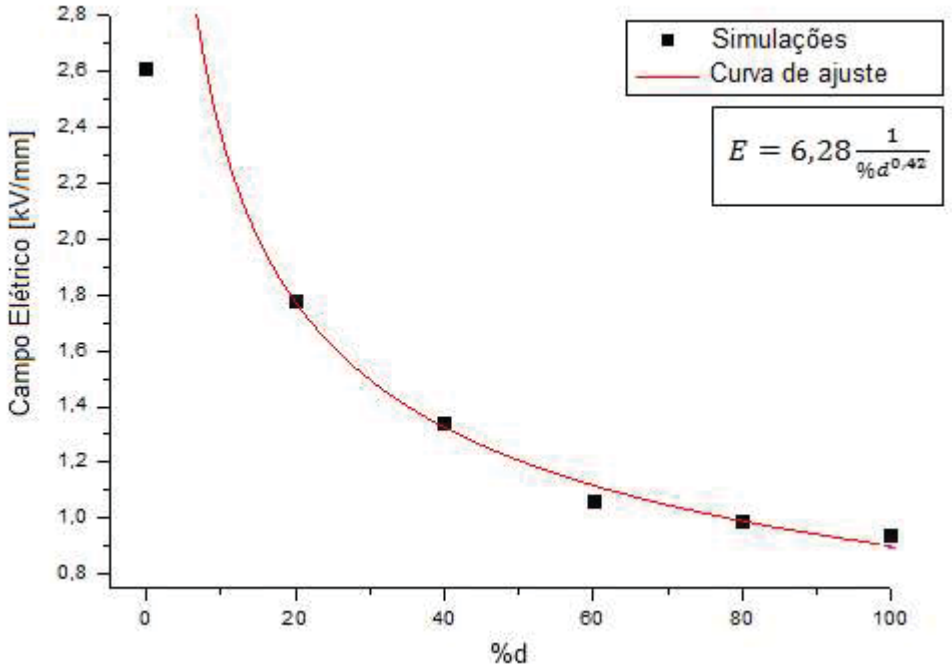


Figura 51 – Intensidade de campo elétrico máximo na interface ar + cabo + espaçador +bandas condutivas da fase A em função da porcentagem de aumento da dimensão do espaçador

Pode-se verificar no gráfico da Figura 51 que a intensidade de campo elétrico máxima é reduzida em função do aumento percentual das dimensões totais do espaçador, o que proporciona o aumento das distâncias fase-fase e fase-neutro do sistema. Para avaliação dos dados obtidos na simulação também foi realizado um ajuste de curva com base na equação geral descrita para o cálculo do campo elétrico (Equação (10)). Neste caso, verificou-se que para o problema modelado, a intensidade de campo elétrico E máximo observada na região do berço da fase A é inversamente proporcional ao aumento das dimensões do espaçador $\%d$ elevado ao expoente $n = 0{,}42$ e a dependência de E com a carga geradora é dada pelo fator $K = 6{,}28$ (relacionado à densidade e à geometria).

Ainda, analisando o gráfico da Figura 51 verifica-se que a variação da intensidade de campo elétrico máximo é maior do que 20 % para cada aumento de 20 % nas dimensões do espaçador até o aumento de 60 %. Para aumentos de 20 % em 20 % acima de 60 % a variação passa a ser menor do 10%. Assim, separando as regiões entre $0\%d$ e $60\%d$ e entre $60\%d$ e $100\%d$ e as analisando de forma independente, a primeira apresenta uma taxa de queda estimada de $0{,}0255\ [\frac{kV}{mm.mm}]$, quando para a segunda região tem-se a taxa de queda de $0{,}0030\ [\frac{kV}{mm.mm}]$, ou seja, 8,5 vezes menor.

Na condição em que o espaçador possui as dimensões convencionais e sem a representação das bandas em função da poluição de áreas de elevada agressividade ambiental, de acordo com a simulação, a intensidade de campo elétrico máxima é da ordem de $1{,}32\ [kV/mm]$. Quando a condição corresponde à porcentagem de aumento 60 % para o espaçador e a representação das bandas condutivas estão presentes os resultados da simulação indicam uma intensidade máxima de campo elétrico em torno de $1{,}06\ [kV/mm]$, ou seja, abaixo da primeira condição descrita. Deve-se ressaltar que de acordo com experiências em campo [2-5], o espaçador com dimensões convencionais apresenta bons desempenho e resistência ao trilhamento elétrico em regiões de baixa elevada agressividade ambiental.

Uma vez que, aumentos percentuais acima de 60 % nas dimensões do espaçador com representação das bandas condutivas apresentam menor taxa de decaimento ou menor variação percentual da intensidade máxima de campo elétrico no ar para a região da interface no berço do espaçador e que nessa condição a intensidade máxima de campo elétrico é inferior àquela calculada para o espaçador com dimensões convencionais e sem poluição, identifica-se que o percentual de aumento de 60% nas dimensões do espaçador deve contribuir para que este apresente maior resistência ao trilhamento elétrico quando em operação em regiões de elevada agressividade ambiental. Ainda, com o percentual de aumento de 60 % a intensidade de campo elétrico máximo é inferior ao valor estimado para o campo elétrico disruptivo estimado para o ar atmosférico na pressão $p = 1\ [atm]$.

Outra avaliação realizada consistiu em simular a aplicação de uma camada semicondutora nos berços do espaçador. Esta avaliação foi realizada para verificar a influência na intensidade de campo elétrico no espaçador, uma vez que fitas semicondutoras são empregadas em materiais elétricos com o intuito de realizar uma blindagem do campo elétrico (equalização das linhas de campo elétrico). A presença de uma camada semicondutora na interface ar + cabo (HDPE) + espaçador (HDPE) insere um material com constante dielétrica maior que a do ar e maior que a do HDPE e com condutividade elétrica entre a do ar e a do HDPE (ver Tabela 6). Na Figura 52 está apresentada a comparação da distribuição de campo elétrico no espaçador convencional e no espaçador com aplicação de camada semicondutora em seu berço. Na Figura 53 é possível verificar a intensidade de campo elétrico na região da interface ar + cabo + semicondutora + berço do espaçador.

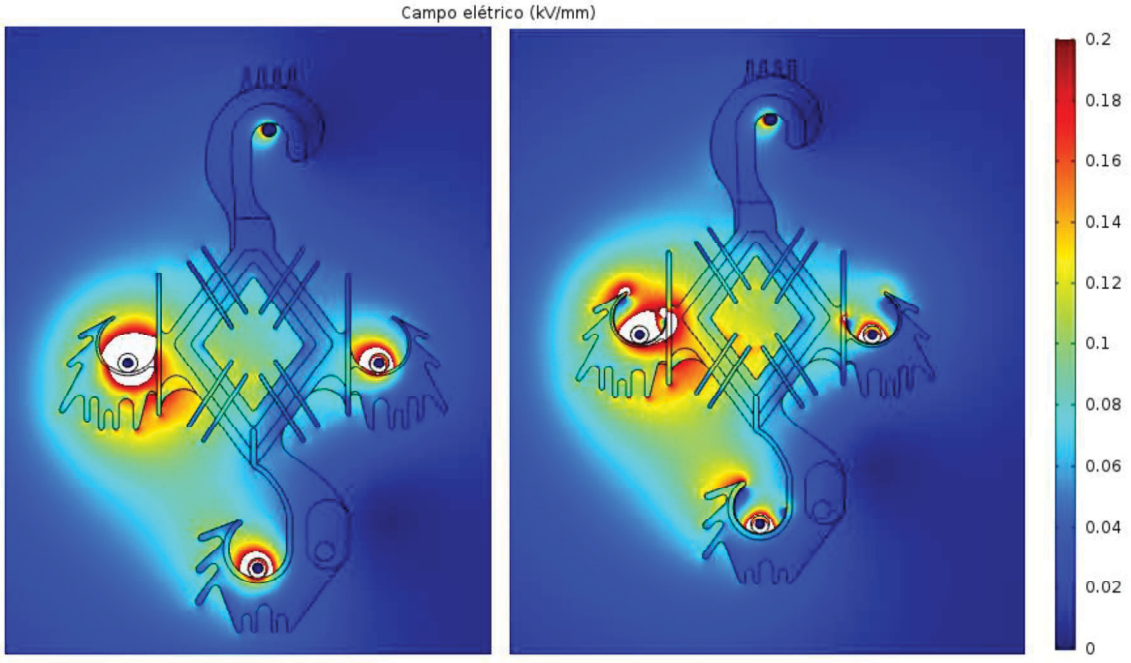


Figura 52 – Comparação da intensidade de campo elétrico no espaçador convencional (esquerda) e com camada semicondutora nos berços (direita)

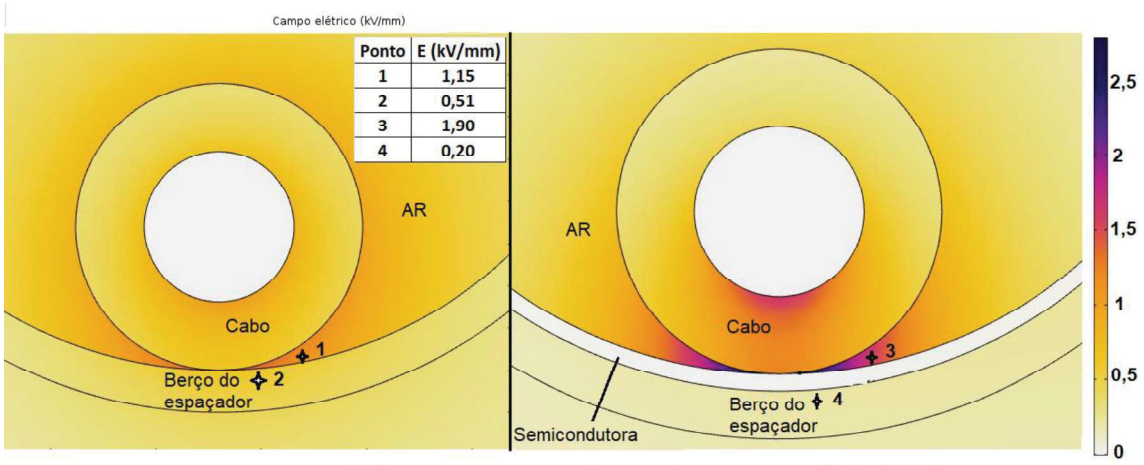


Figura 53 – Comparação da intensidade de campo elétrico no espaçador convencional (esquerda) e com camada semicondutora nos berços (direita) na interface cabo + ar + semicondutora + berço do espaçador

Com base nos resultados apresentados na Figura 52 nota-se que com a aplicação de uma camada semicondutora nos berços do espaçador a intensidade de campo elétrico é alterada em diferentes regiões do espaçador. Em algumas regiões, por exemplo, no ar acima dos condutores e no berço dos espaçadores há uma redução do nível de campo elétrico, entretanto nas imediações das terminações da camada semicondutora há uma intensificação dos níveis de campo elétrico. Na Figura 53 pode-se observar que na região de interface ar + cabo + espaçador + semicondutora a camada semicondutora equaliza o campo elétrico no berço do espaçador, reduzindo a intensidade de campo elétrico no equipamento (pontos 4 e 2) e que há um acréscimo da intensificação de campo elétrico no ar (pontos 3 e 1) em comparação com a condição sem semicondutora.

Assim, foi possível identificar que a inserção de uma camada semicondutora na superfície dos berços do espaçador é uma alternativa que pode reduzir a possibilidade da ocorrência de descargas superficiais especificamente no berço do espaçador, mas deve aumentar a possibilidade de ocorrência de descargas parciais na superfície dos cabos e consequentemente trilhamento elétrico. Ainda, há a possibilidade de criar novos pontos propícios à ocorrência de descargas parciais nas regiões de terminações da camada semicondutora (ver região indicada na Figura 54).

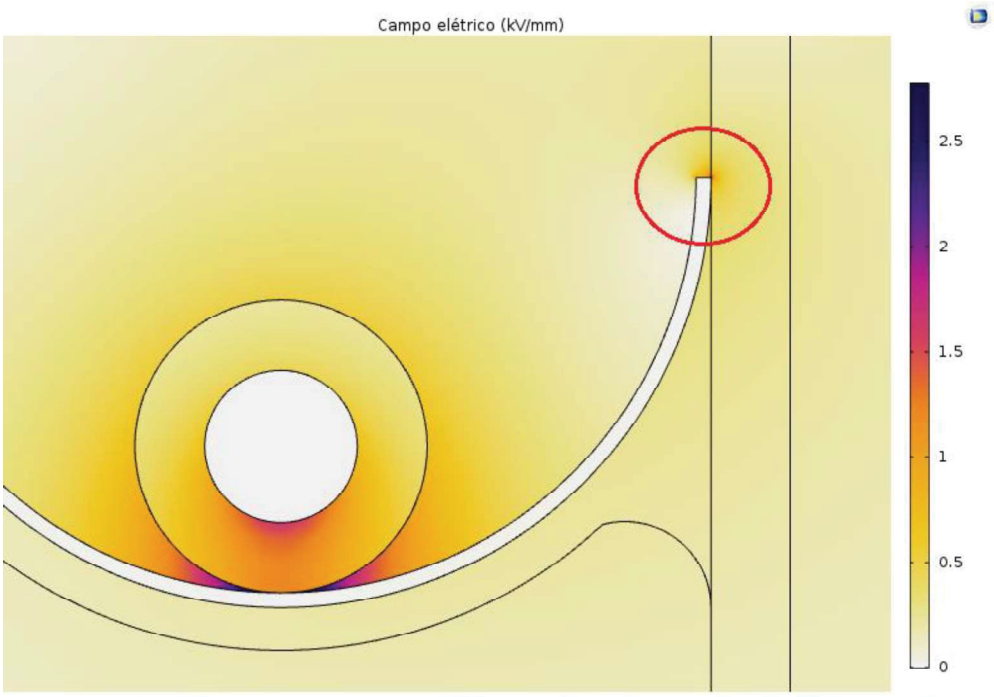


Figura 54 – Campo elétrico no espaçador com camada semicondutora nos berços

Também foi realizada a avaliação da influência na intensidade de campo elétrico da alteração na quantidade e tamanho das aletas do espaçador. A alteração nas aletas acarreta em alteração da distância de escoamento do espaçador. Os resultados desta simulação estão apresentados na Figura 55.

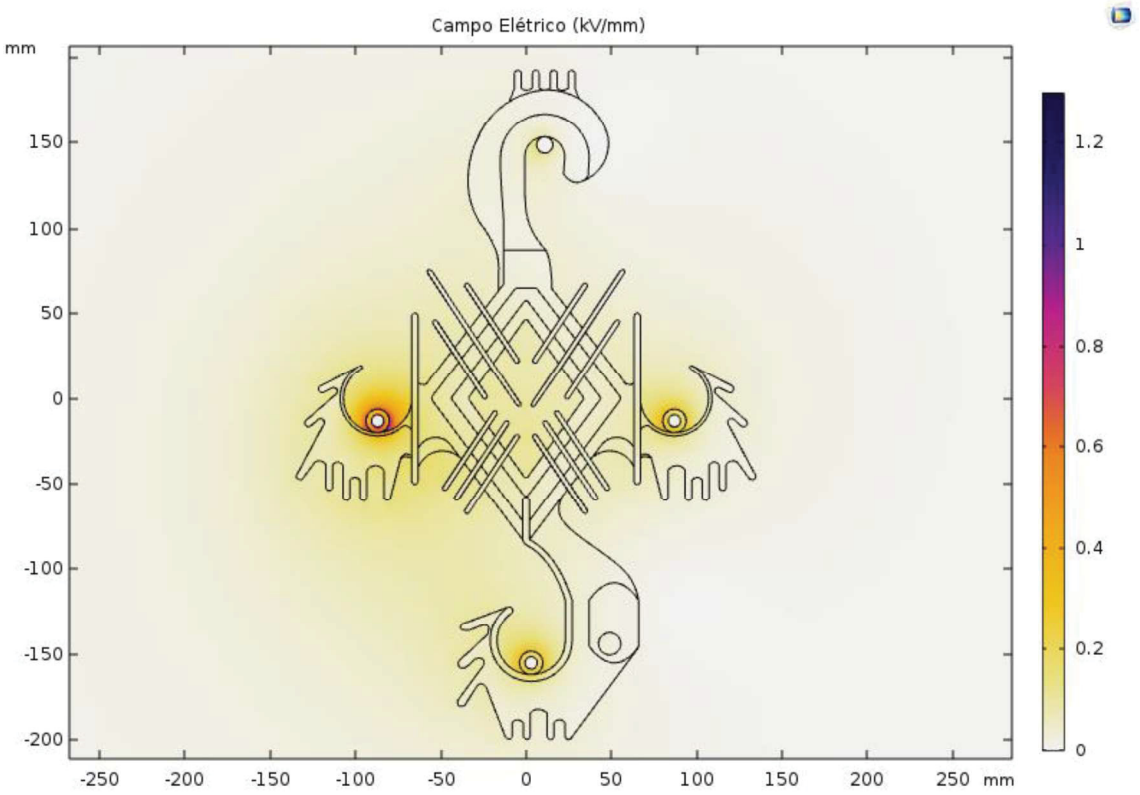


Figura 55 – Campo elétrico no espaçador com alongamento e acréscimo de aletas

Através da simulação computacional considerando alterações na geometria das aletas do espaçador apresentada na Figura 55 pode-se verificar que estas não influenciam significativamente na intensidade de campo elétrico no espaçador como um todo e também na região dos seus berços. A intensidade de campo elétrico máxima foi observada na região da interface ar + cabo + espaçador, possuindo o valor de $1{,}32\ [kV/mm]$ (aproximadamente igual ao valor verificado no projeto do espaçador convencional).

Para realizar a avaliação da presença de ranhuras (utilizadas para fixar o anel de amarração) no espaçador foi realizada a simulação computacional de campo elétrico considerando uma menor quantidade ranhuras na geometria do espaçador. Na Figura 56 é possível observar a comparação entre o projeto convencional do espaçador utilizado como base nos estudos e uma geometria com menos ranhuras nos berços.

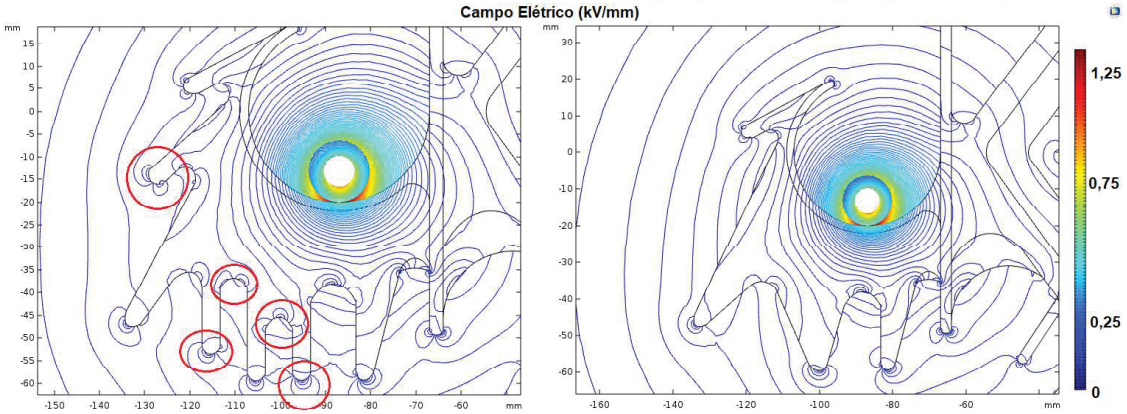


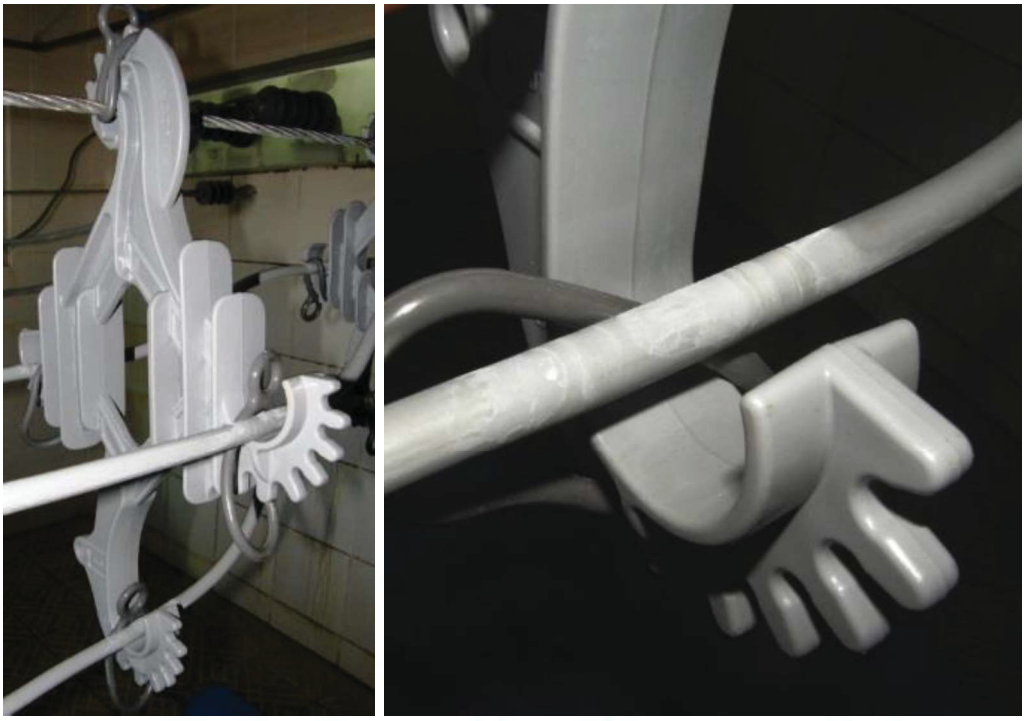
Figura 56 – Comparação da intensidade de campo elétrico no espaçador convencional (esquerda) e com menor quantidade de ranhuras nos berços (direita)

Observa-se na Figura 56 que na geometria do espaçador com menor quantidade de ranhuras são reduzidas as áreas nas quais há uma concentração mais intensa das linhas de campo elétrico. Assim, verifica-se que uma geometria com mais ranhuras pode favorecer a intensificação de campo elétrico, e, por consequência, a ocorrência de descargas parciais e trilhamento elétrico.

4.2 Ensaio de Compatibilidade Dielétrica – Multiestressamento

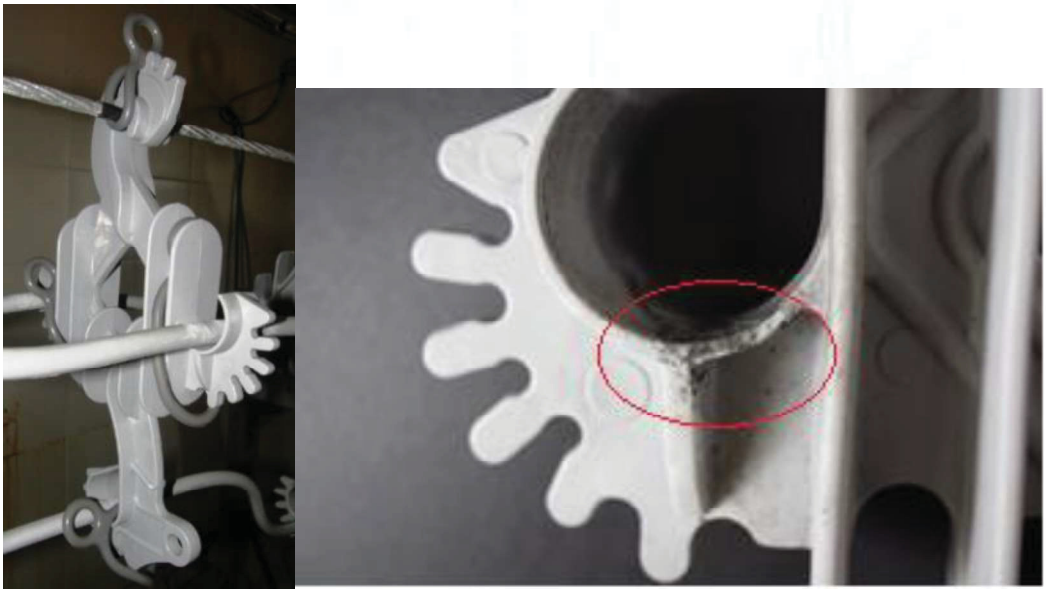
O ensaio de multiestressamento foi realizado com o intuito de avaliar a influência das dimensões do espaçador e da presença de fita semicondutora frente à ocorrência de trilhamento elétrico nos espaçadores. Na Figura 57 e na

Figura 58 são apresentados os resultados da montagem padrão para o espaçador de 15 kV (E-4) e para o de 34,5 kV (E-3). Conforme descrito (seção 3.3.3) o espaçador de 34,5 kV possui dimensões maiores do que o de 15 kV.



(a) (b)

Figura 57 – Detalhes do espaçador E-3 sem alterações nas interfaces entre o condutor e o espaçador e também internamente ao espaçador: a) vista geral, b) berço direito

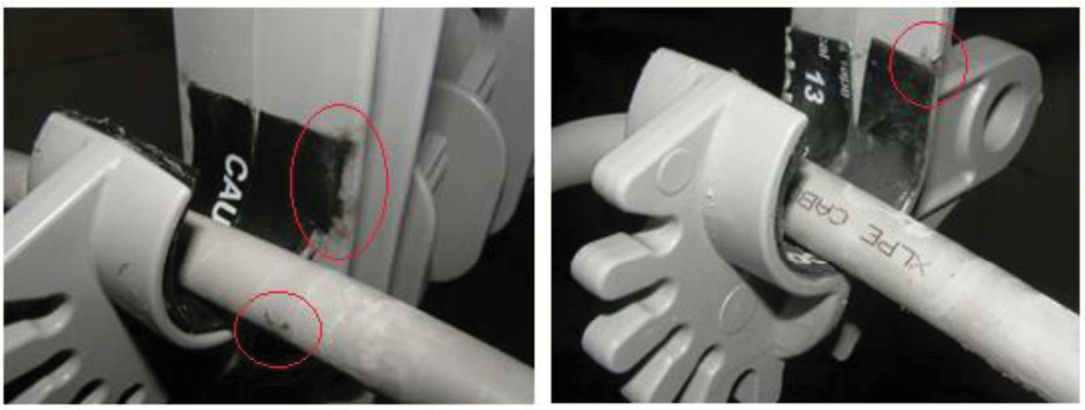


a) b)

Figura 58 - Detalhes do espaçador E-4 com sinais de trilhamento internamente ao espaçador: a) vista geral, b) berço esquerdo

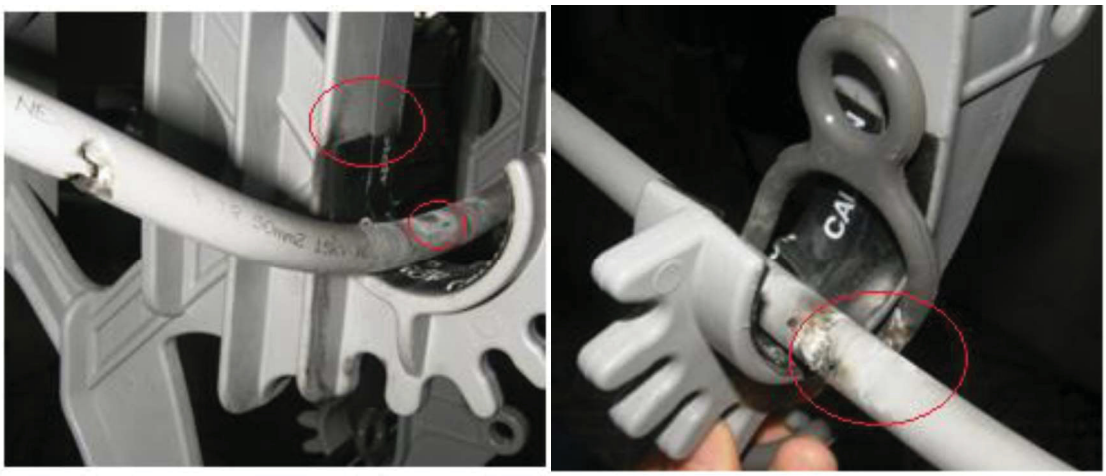
Conforme se pode observar na Figura 57 e na Figura 58, na inspeção visual foi verificado que o espaçador de 34,5 kV operando com tensão nominal de 13,8 kV entre fases apresentou desempenho superior àquele apresentado pelo de 13,8 kV quando submetido aos ciclos de aspersão de água condutiva (simulando as condições de elevada agressividade ambiental). Tal desempenho superior foi evidenciado pela presença de pontos de trilhamento elétrico nos berços do espaçador de 15 kV, o que não ocorreu para o espaçador de 34,5 kV operando nas mesmas condições. Estes resultados confirmam que o aumento nas dimensões do espaçador aumenta sua resistência ao trilhamento elétrico, conforme resultados obtidos na simulação computacional (seção 4.1). O aumento à resistência ao trilhamento elétrico ocorre em função do maior afastamento entre os condutores das fases e do mensageiro, e, consequentemente redução do campo elétrico.

Na Figura 59 e na Figura 60, onde está apresentada a montagem da fita semicondutora (propriedades descritas na seção na 3.1) no espaçador, pode-se observar: ocorrência de trilhamento elétrico no cabo e nas regiões das extremidades da semicondutora em contato com o espaçador. Na Figura 60, além destes, observa-se também erosão no cabo coberto e no anel de amarração.



(a) (b)

Figura 59 – Detalhes do espaçador E-1 com erosões e trilhamento no cabo e no espaçador: a) berço superior esquerdo, b) berço inferior



(a) (b)

Figura 60 – Detalhes do espaçador E-2 com erosões e trilhamento no cabo e no espaçador: a) berço superior direito, b) berço inferior

Assim, conforme os resultados da inspeção visual após o ensaio de multiestressamento (Figura 59 e Figura 60) verifica-se que com a presença de um material com características semicondutoras sobre o berço do espaçador não houve trilhamento nesta região do equipamento em função da blindagem elétrica realizada pelo material. Entretanto, propiciou a ocorrência de trilhamento elétrico no espaçador nas regiões das extremidades da semicondutora e na superfície dos cabos, mesmo para o espaçador com dimensões maiores, regiões nas quais não foi observado trilhamento na condição sem fita semicondutora (Figura 57 e Figura 58). Estes resultados confirmam aqueles obtidos nas simulações computacionais (seção 4.1).

4.3 Projeto do Espaçador para Redes Protegidas de Regiões de Elevada Agressividade Ambiental

A partir das simulações computacionais de campo elétrico e do ensaio de multiestressamento foi possível a avaliação de algumas alternativas que pudessem conferir maior resistência ao trilhamento elétrico para o espaçador de redes protegidas, corroborando a necessidade do desenvolvimento do espaçador para redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental. Com base nesses estudos (seção 4.1 e 4.2) foram possíveis as seguintes definições:

- O aumento das dimensões do espaçador e, consequentemente, das distâncias entre os condutores das fases e do mensageiro, na presença de bandas condutivas (provenientes de resíduos de poluição ou maresia em conjunto com umidade) reduz a intensidade de campo elétrico, em especial na região da interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas. Uma vez que a ocorrência de uma descarga parcial está condicionada à ação de um campo elétrico que ultrapasse a suportabilidade do gás (rigidez dielétrica), a redução da intensidade de campo elétrico na região favorece a maior resistência ao trilhamento elétrico em função de descargas parciais no ar sobre a superfície do berço do espaçador;
- O aumento percentual de 60% foi identificado como adequado por três razões: acima deste percentual a variação percentual da intensidade de campo elétrico é menor que 10 % para cada aumento das dimensões totais do espaçador em 20 %; quando considerada a poluição sobre os berços do espaçador a intensidade de campo elétrico máximo passa a ser inferior àquela do espaçador com dimensões convencionais sem poluição; e ainda a intensidade máxima de campo elétrico é inferior ao campo elétrico disruptivo estimado para o ar atmosférico;
- A presença de uma camada de material semicondutor nos berços do espaçador reduz a intensidade de campo elétrico no berço do espaçador, mas intensifica o campo elétrico no ar presente na interface ar + cabo + semicondutora + espaçador, além de também provocar maior intensidade nas regiões de terminação deste material, sendo descartada esta alternativa;
- Em relação à intensidade de campo elétrico no espaçador, a alteração da geometria das suas aletas não tem influência significativa e a redução da quantidade de ranhuras traz resultados favoráveis (redução de áreas com campo elétrico de maior intensidade). Este resultado, somado ao fato que para evitar o aprisionamento de partículas de sal, sugere-se que a geometria dos acessórios deve ser de tal forma que não promova a formação de vértices, ou seja, devem ser evitados os cantos vivos, de forma

a promover fluxo livre [11], indica que esta alteração na geometria do espaçador deve melhorar sua resistência ao trilhamento elétrico em regiões de elevada agressividade ambiental.

Assim, definiu-se que o espaçador para redes protegidas instaladas em regiões com elevada agressividade ambiental deve ser aproximadamente 60 % maior que aquele utilizado para redes protegidas de regiões com baixa agressividade ambiental, que o mesmo não deve possuir camada semicondutora nos seus berços, e que quanto menor a quantidade de ranhuras melhor.

A partir dessa definição, para o completo desenvolvimento do projeto do protótipo de espaçador para utilização em regiões com elevada agressividade ambiental, foram propostas alterações no seu desenho com o objetivo de reduzir as regiões de acúmulo de poluição no espaçador. As alterações em relação ao desenho base do espaçador convencional propostas para o espaçador de redes protegidas para regiões de elevada agressividade ambiental estão apresentadas Figura 61.

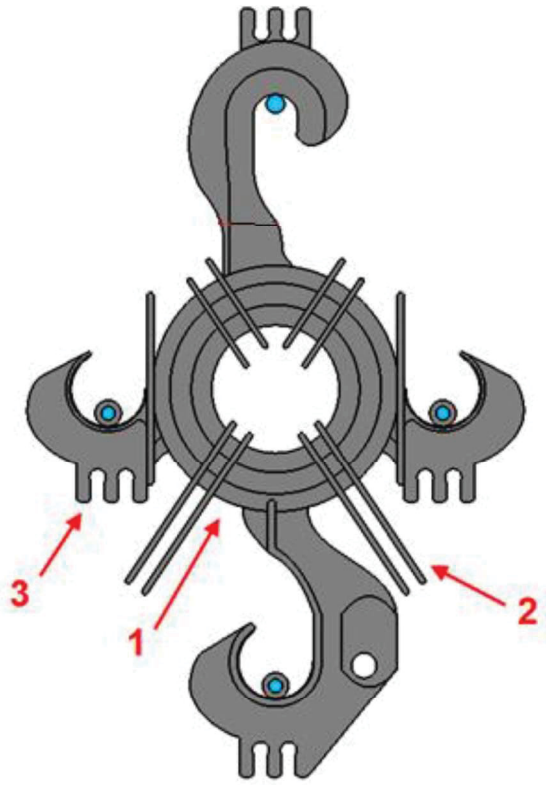


Figura 61 – Novo desenho proposto para o espaçador para redes protegidas em regiões de elevada agressividade ambiental

Os principais aspectos no desenho do espaçador proposto estão sinalizados na Figura 61. A alteração sinalizada como número 1 corresponde a sua base central que passaria a ser circular e não losangular, reduzindo as regiões de cantos sujeitas ao acúmulo de poluição [11]. A sinalização número 2 corresponde ao alongamento das aletas inferiores do espaçador, que tem o intuito de evitar que ocorra gotejamento destas aletas no braço inferior do espaçador, onde também é evidenciado trilhamento elétrico [3, 4, 61], além de "proteger" quase toda a região do braço inferior do espaçador da exposição a ventos que possam depositar poluentes. A sinalização número 3 tem o intuito de diminuir as ranhuras na região dos berços do espaçador de modo a reduzir a quantidade de regiões susceptíveis à concentração de poluição e de campo elétrico intenso.

4.3.1 Avaliação do Projeto de Espaçador de Redes Protegidas de Regiões de elevada Agressividade Ambiental

Para a definição final do projeto foi realizada simulação computacional de campo elétrico e de esforços mecânicos considerando às proposições da nova concepção construtiva do espaçador para aplicação em redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental. No caso da avaliação elétrica também foi considerada a presença de bandas condutivas nas superfícies dos berços do espaçador e do cabo.

Na Figura 62 está apresentado o resultado da intensidade de campo elétrico obtido na simulação e na Figura 63 o mesmo resultado, porém com escala alterada para melhor visualização (regiões em branco possuem campo superior ao da escala). Na Figura 64 é possível verificar a intensidade de campo elétrico no berço da Fase A do espaçador, na região com a presença de bandas condutivas e na Figura 65 a interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas.

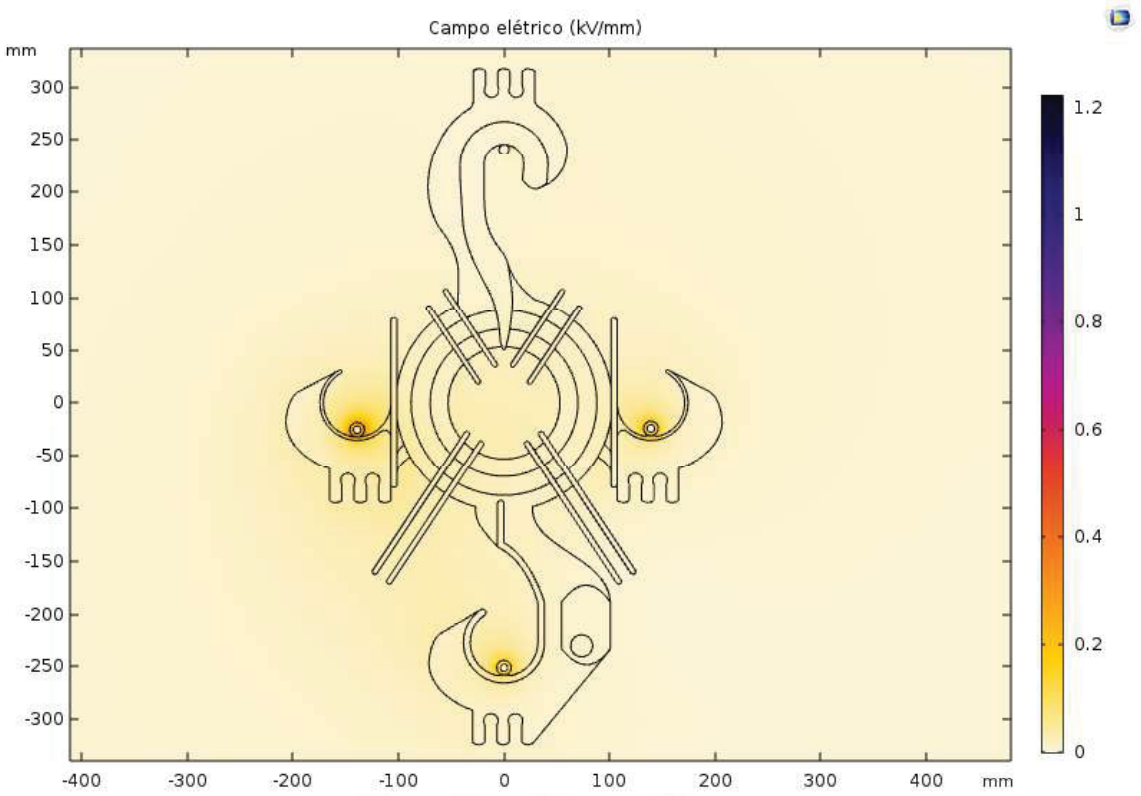


Figura 62 – Campo elétrico no novo projeto proposto para o espaçador de redes protegidas com elevada agressividade ambiental

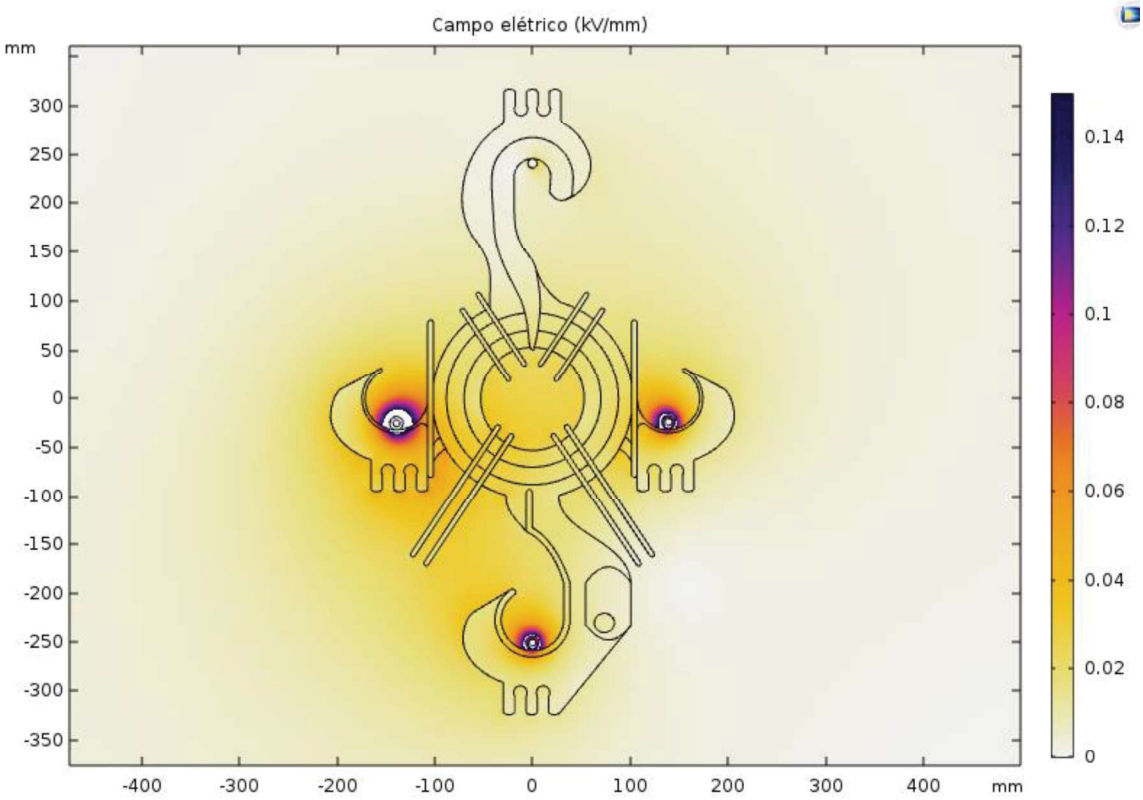


Figura 63 – Campo elétrico no projeto proposto para o espaçador de redes protegidas com elevada agressividade ambiental com escala alterada (regiões em branco possuem campo superior ao da escala)

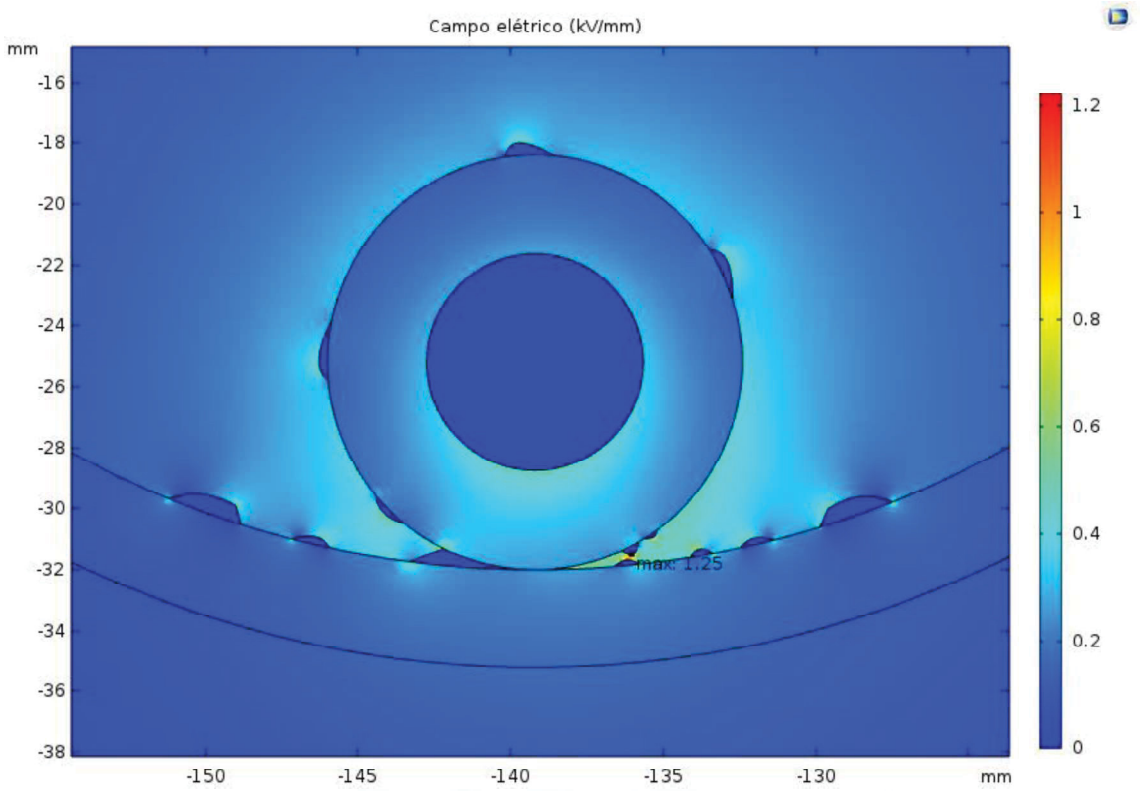


Figura 64 – Campo elétrico no berço da Fase A do projeto do espaçador de redes protegidas com elevada agressividade ambiental considerando bandas condutivas na superfície dos seus berços e cabos

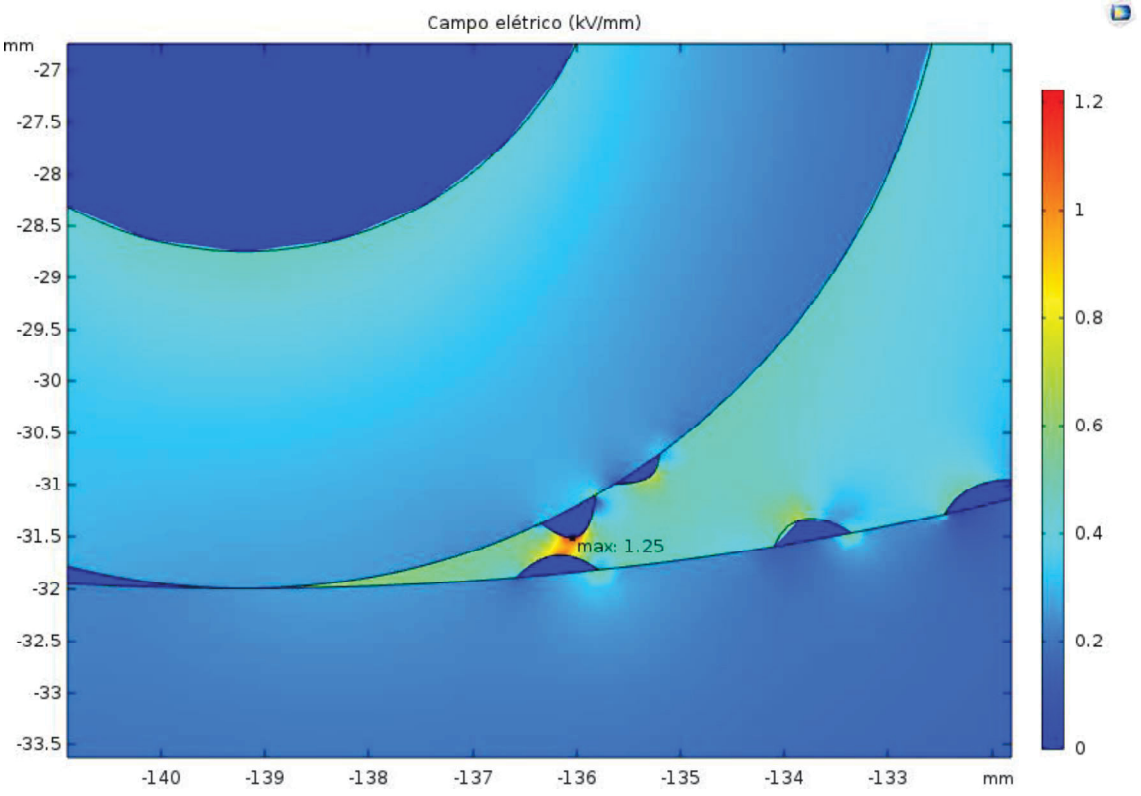


Figura 65 - Campo elétrico na interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas do projeto do espaçador de redes protegidas

De acordo com as simulações de campo elétrico (Figura 62 à Figura 65) no projeto do espaçador proposto para regiões de elevada agressividade ambiental verifica-se que os níveis de campo elétrico são próximos daqueles observados para o projeto convencional do espaçador sem a presença de bandas condutivas, o qual apresenta bom desempenho em regiões de baixa e média poluição. A intensidade máxima de campo elétrico é observada na interface ar + cabo + espaçador + bandas condutivas e é da ordem de $1{,}25\ [kV/mm]$, inferior ao valor de $1{,}32\ [kV/mm]$ obtido no espaçador convencional sem bandas condutivas. Este resultado é decorrente principalmente do aumento das dimensões na ordem de aproximadamente 60% em relação às dimensões do espaçador convencional.

Em relação às alterações no desenho do espaçador, verifica-se que quanto à intensidade de campo elétrico não há variação significativa nesta grandeza. Este resultado é importante, pois seria negativo se estas alterações acarretassem em aumento da intensidade de campo elétrico, podendo propiciar à ocorrência de trilhamento elétrico. Considerando que estas alterações têm o objetivo principal de reduzir as áreas susceptíveis ao acúmulo de poluição, as mesmas serão avaliadas através de ensaios em laboratório simulando condições de elevada agressividade ambiental e na instalação em campo dos espaçadores em condições reais de elevada agressividade ambiental.

Uma vez que além das solicitações elétricas os espaçadores também devem atender a solicitações mecânicas para operação em redes protegidas, foram realizadas simulações computacionais para avaliação dos esforços mecânicos no projeto proposto (Figura 67) em comparação com o projeto do espaçador convencional (Figura 66).

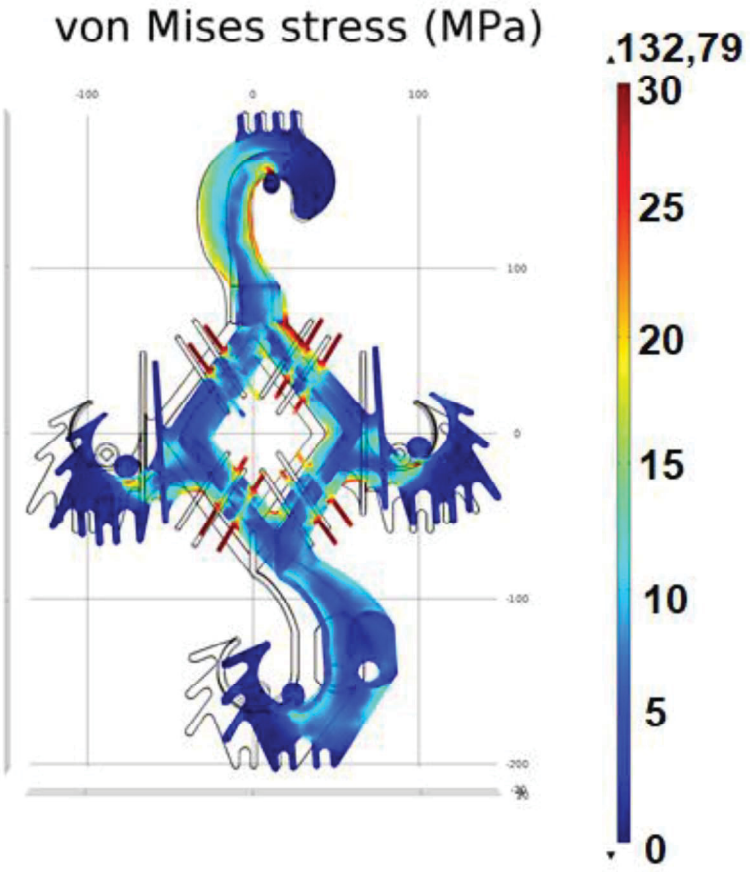


Figura 66 - Simulação de deformação mecânica do espaçador convencional

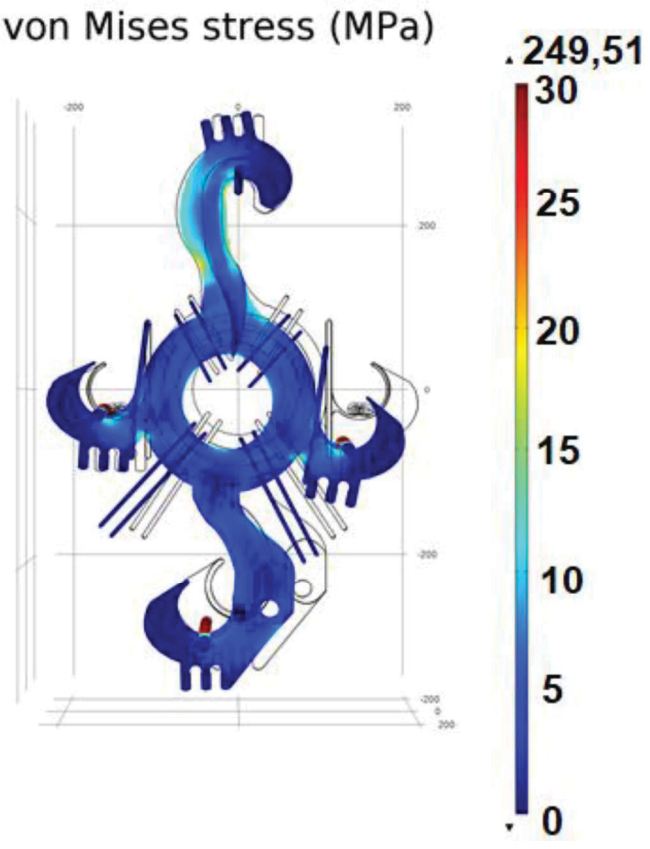


Figura 67 – Simulação de deformação mecânica do projeto do espaçador desenvolvido

Na Figura 66 e na Figura 67 pode-se verificar a simulação de tração com aplicação de forças nos berços dos cabos fase. A máxima força suportada pelo espaçador convencional foi de 132 MPa e o para o espaçador proposto foi da ordem de 249 MPa. Em relação às regiões submetidas a maiores pressões mecânicas, no caso do espaçador convencional foi obtido o valor de 30 MPa e do projeto do espaçador desenvolvido de 20 MPa. Os resultados das simulações computacionais de esforços mecânicos evidenciaram que protótipo do espaçador proposto suporta pressão limite superior ao espaçador convencional e é submetido a pressões mecânicas inferiores.

Quanto às distâncias de escoamento do projeto de espaçador (distância mínima para separação elétrica entre fases e fase-neutro), estas foram medidas e verificou-se que as mesmas estão de acordo com aquelas estabelecidas em norma do Comitê de Distribuição (CODI-3.2.18.24.1 [62]) e do projeto de norma da ABNT (ABNT/CB-03 PROJETO 03:513.04-005 [63, 64]) para espaçadores de classe 15 kV e 36,2 kV.

4.4 Protótipos de Espaçador para Redes Protegidas de Regiões com Elevada Agressividade Ambiental

Nas Figura 68 à Figura 70 estão apresentadas as vistas do projeto de espaçador desenvolvido. Cabe ressaltar que foi registrado junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual – INPI pedido de patente do modelo de utilidade do projeto de espaçador desenvolvido (PU n. BR 20 2015 018640 7 “Disposição construtiva em espaçador para redes protegidas de classe de tensão de 15 kV para regiões com elevada agressividade ambiental”).

Para a manufatura dos protótipos do espaçador para redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental foram consideradas a disposição construtiva desenvolvida e as formulações de materiais poliméricos aditivados selecionadas, denominadas AM e AZ (seção 3.1). Os protótipos foram manufaturados por empresa especializada através de máquina de injeção (Hatian de 600 ton).

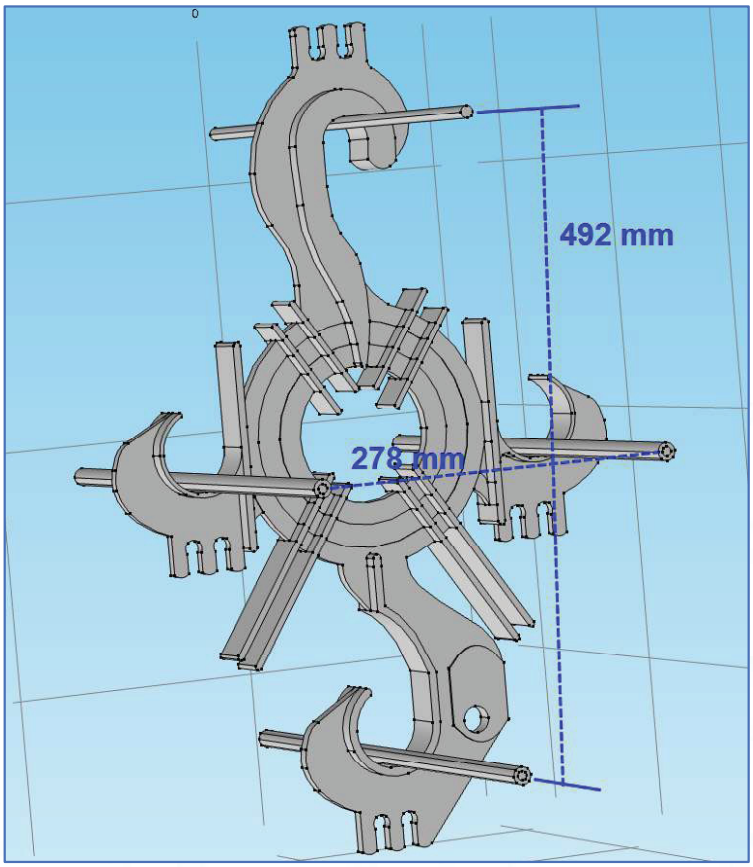


Figura 68 – Vista frontal do projeto de espaçador desenvolvido

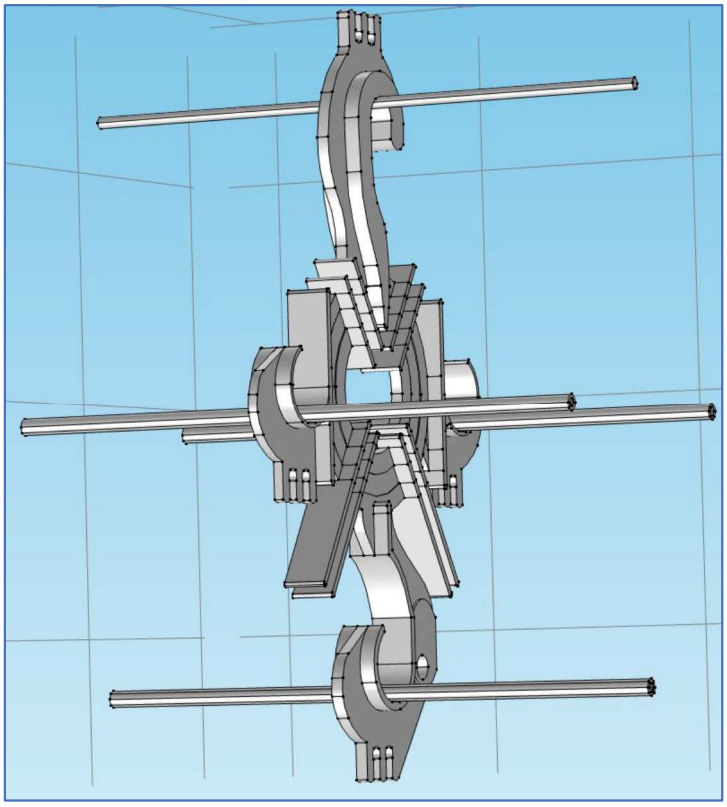


Figura 69 – Vista lateral esquerda do projeto de espaçador desenvolvido

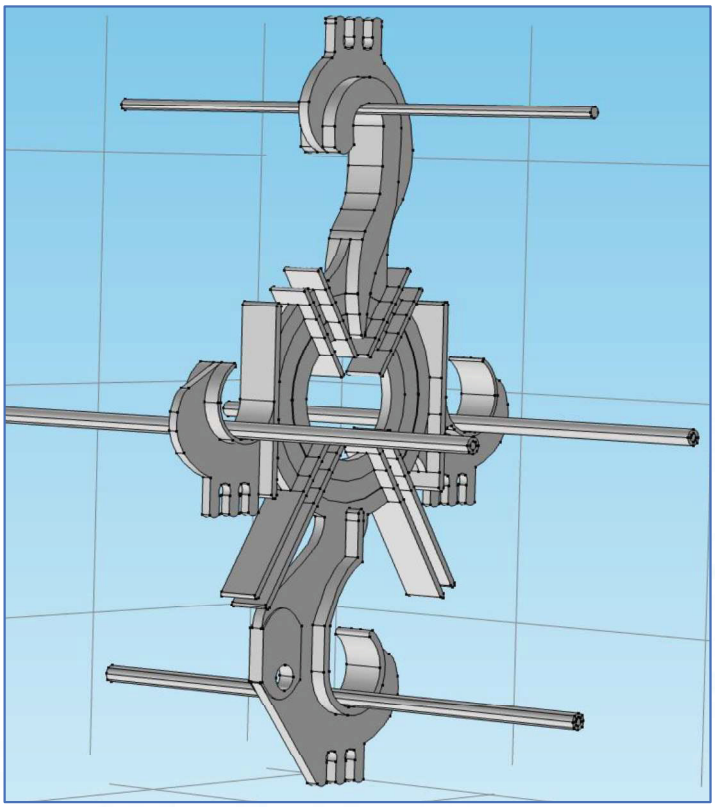


Figura 70 – Vista lateral direita do projeto de espaçador desenvolvido

5 AVALIAÇÃO DE ESPAÇADOR PARA REDES PROTEGIDAS DE REGIÕES COM ELEVADA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

5.1 Ensaio de Multiestressamento

5.1.1 1° Ensaio

A Figura 71 apresenta os resultados da inspeção visual com documentação fotográfica para o espaçador com material AM após 15 dias de ensaio. Foram observados pontos de cintilação leve no lado direito da base central circular, próximo à região que forma ângulo de 90º (próximo ao berço).

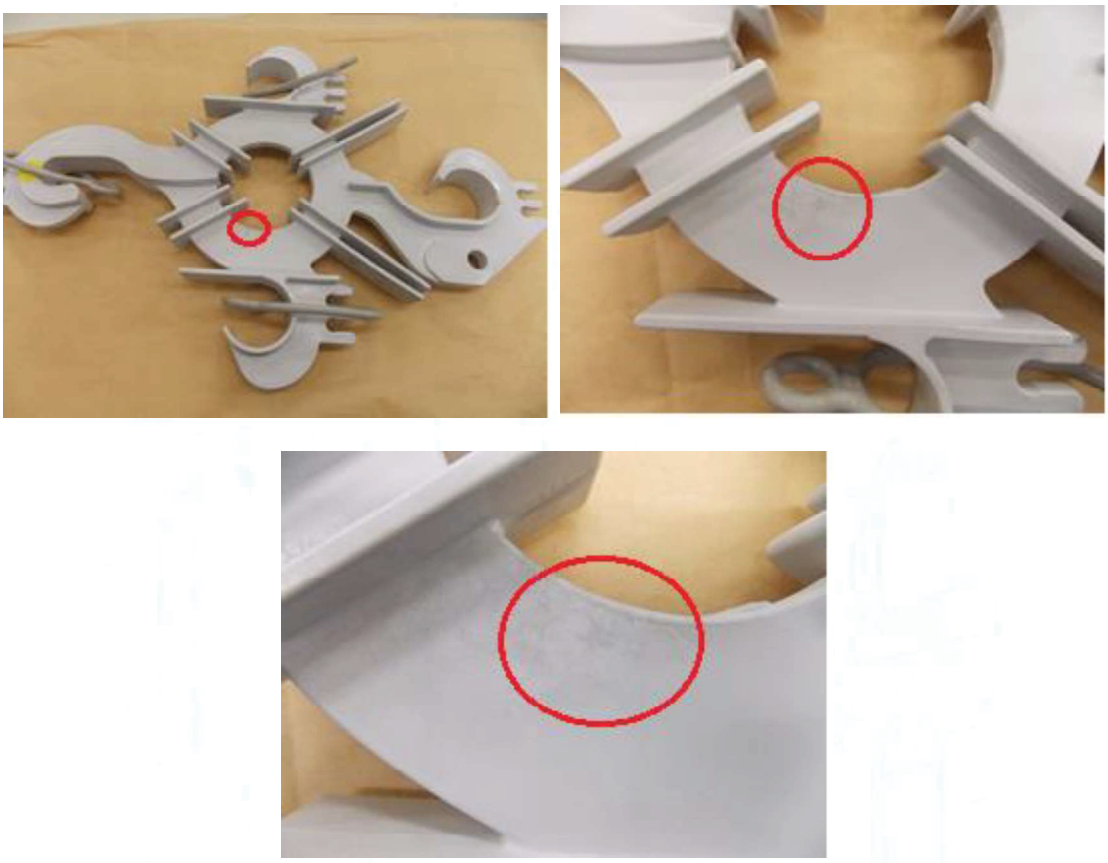


Figura 71 - Inspeção visual do protótipo de espaçador com material AM

A Figura 72 apresenta os resultados da inspeção visual com documentação fotográfica realizada para o material AZ. Neste caso foram observados alguns pontos de cintilação moderada no lado direito do círculo central, próximo à região que forma ângulo de 90º (próximo ao berço), assim como nas aletas maiores (região próxima à furação).

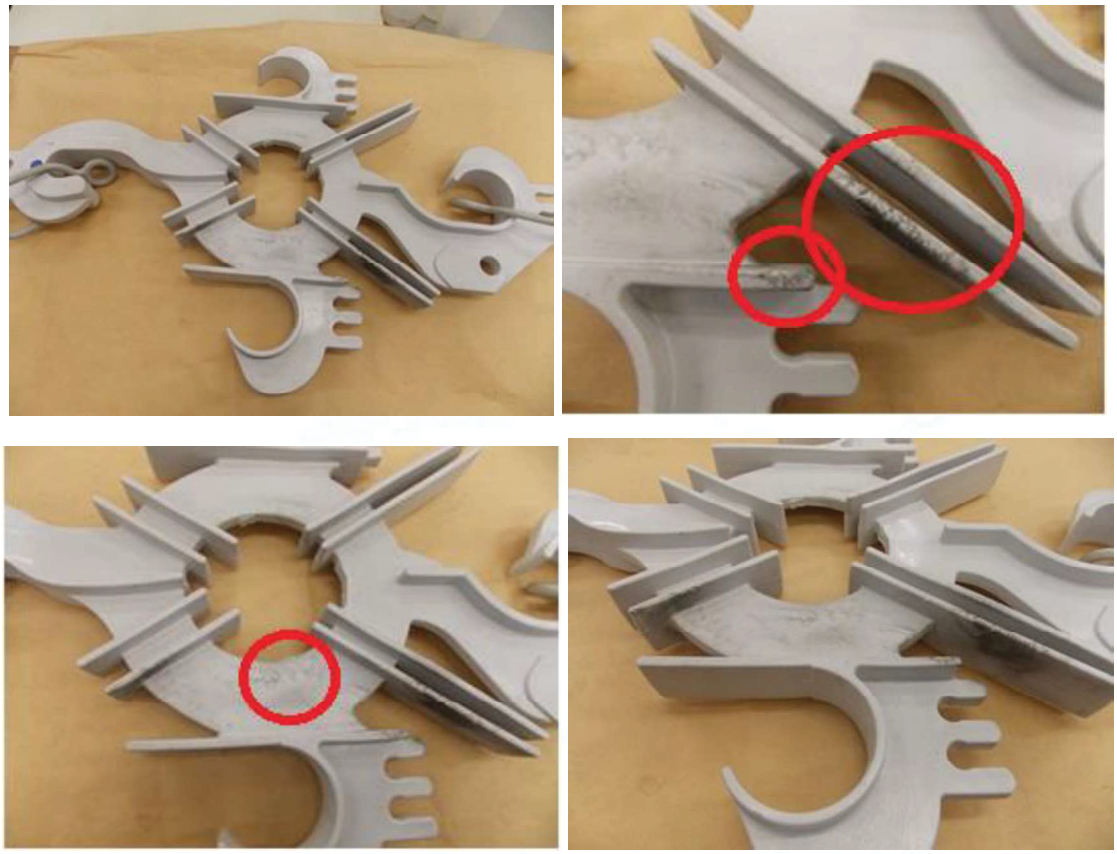


Figura 72 - Inspeção visual do protótipo de espaçador com material AZ

Na Figura 73 e na Figura 74 estão apresentadas as imagens termográficas obtidas durante ciclo de aspersão nos protótipos de espaçadores AM e AZ. Pode ser visto nas imagens os locais onde as cintilações tenderam a ocorrer, isto é, no círculo central e região das aletas maiores e no berço inferior. Cabe ressaltar que esta avaliação não têm efeito comparativo entre as formulações AM e AZ, pois as temperaturas nos cabos eram diferentes.

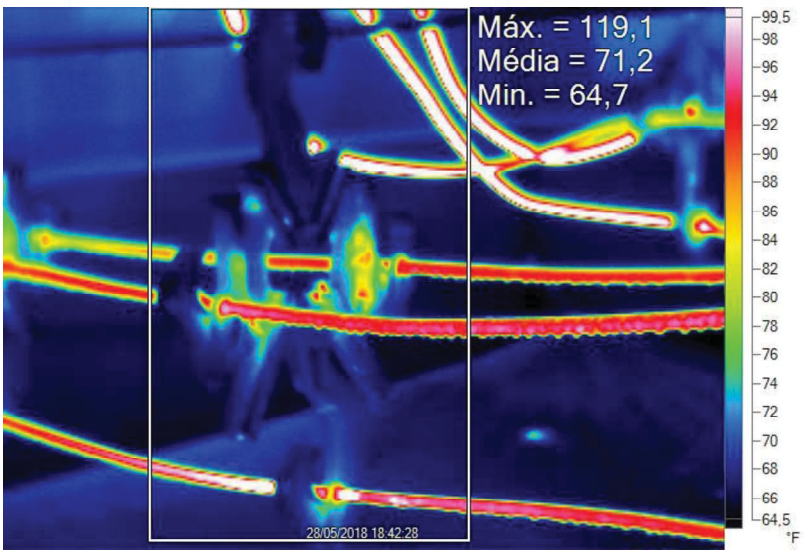


Figura 73 - Termografia do protótipo de espaçador AM

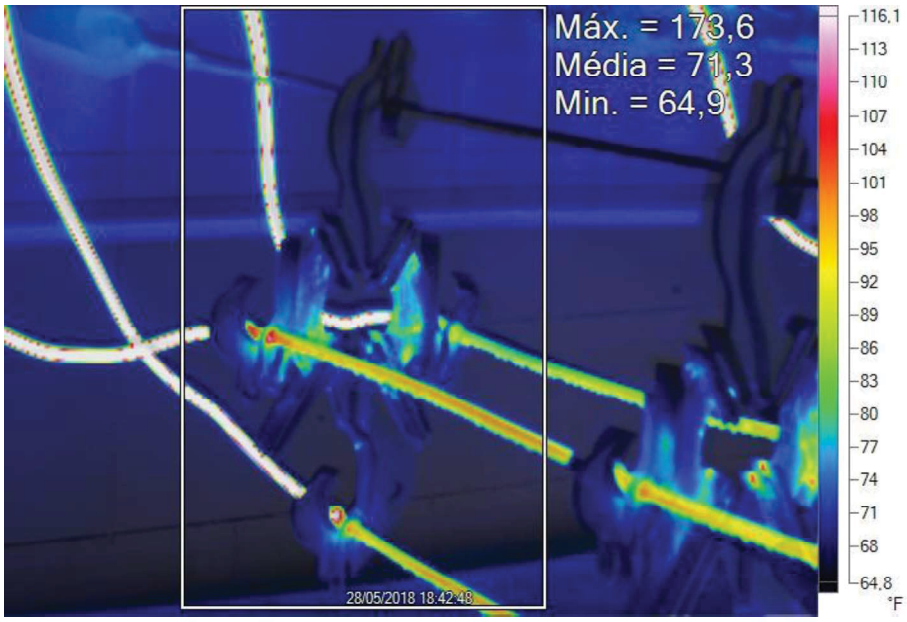


Figura 74 - Termografia de protótipo de espaçador AZ

Na mesma condição de ensaio os espaçadores comerciais chamados de C1 e C2 apresentaram após 15 dias, respectivamente, trilhamento elétrico na garra do espaçador (Figura 75) e no berço do espaçador (Figura 76). Em ambos os espaçadores foi observada ocorrência de cintilações severas em todo o corpo do espaçador, ou seja, em intensidade superior às classificadas como leve e moderada observadas nos protótipos de espaçador desenvolvidos.



Figura 75 - Inspeção visual do espaçador C1



Figura 76 - Inspeção visual do espaçador C2

Após 30 dias de ensaio outras amostras do espaçador desenvolvido foram retiradas para inspeção visual. Conforme se pode verificar na Figura 77 e na Figura 78, após término do ensaio, nenhum dos espaçadores apresentou sinais de trilhamento elétrico ou erosão.



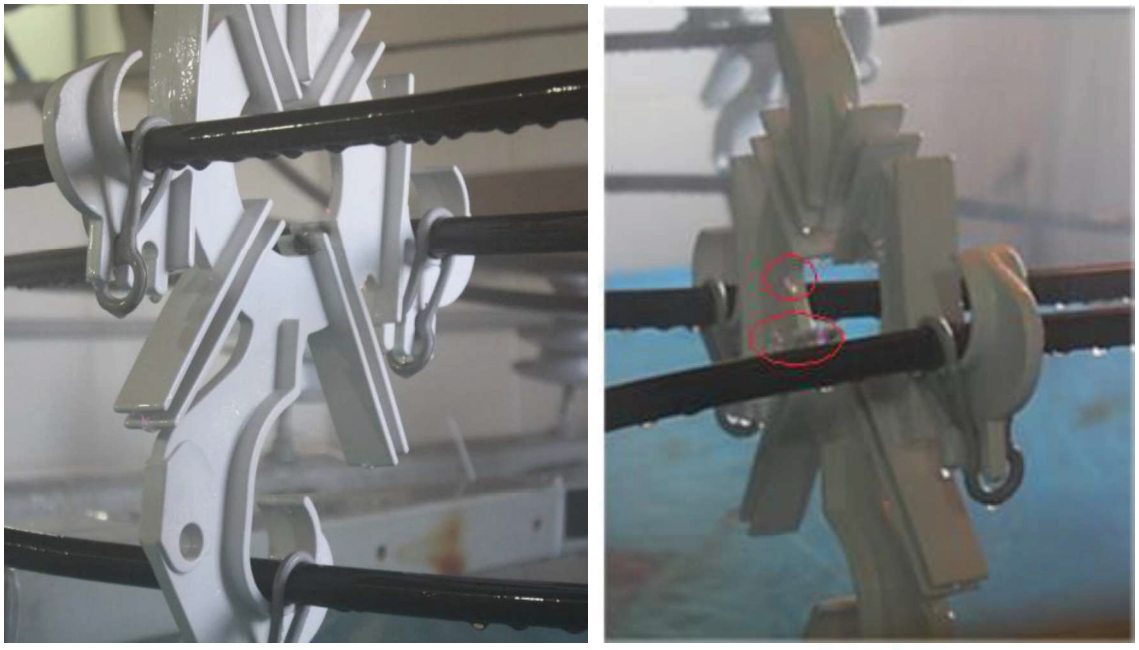
Figura 77 - Imagens do espaçador AZ: a) no arranjo experimental; b) durante inspeção visual



Figura 78 – Imagens do espaçador AM: a) no arranjo experimental; b) durante inspeção visual

5.1.2 2° Ensaio

Foi realizada uma primeira inspeção visual com documentação fotográfica com 15 dias de ensaio, onde foram notados os primeiros sinais de erosão e trilhamento (leve a moderados) nos espaçadores com formulação AZ, conforme mostrado na Figura 80. Já os espaçadores AM não apresentaram vestígios de trilhamento e erosão, conforme mostrado na Figura 79 e na Figura 81.



(a) (b)

Figura 79 - Imagens do espaçador AZ: a) sinais de trilhamento e erosão no corpo do espaçador; b) centelhamento na região de trilhamento e erosão durante período de aspersão de névoa condutiva



(a) (b)

Figura 80 - Imagens do espaçador AZ: a) sinais de trilhamento e erosão no corpo do espaçador; b) sinais de trilhamento e erosão no berço do espaçador

Após 46 dias do início do ensaio foi realizada nova inspeção visual com documentação fotográfica. Na Figura 82 estão apresentados os espaçadores AZ que tiveram o trilhamento intensificado (moderado) no corpo e berço. Os espaçadores AM continuaram não apresentando sinais de trilhamento e erosão, conforme Figura 83.

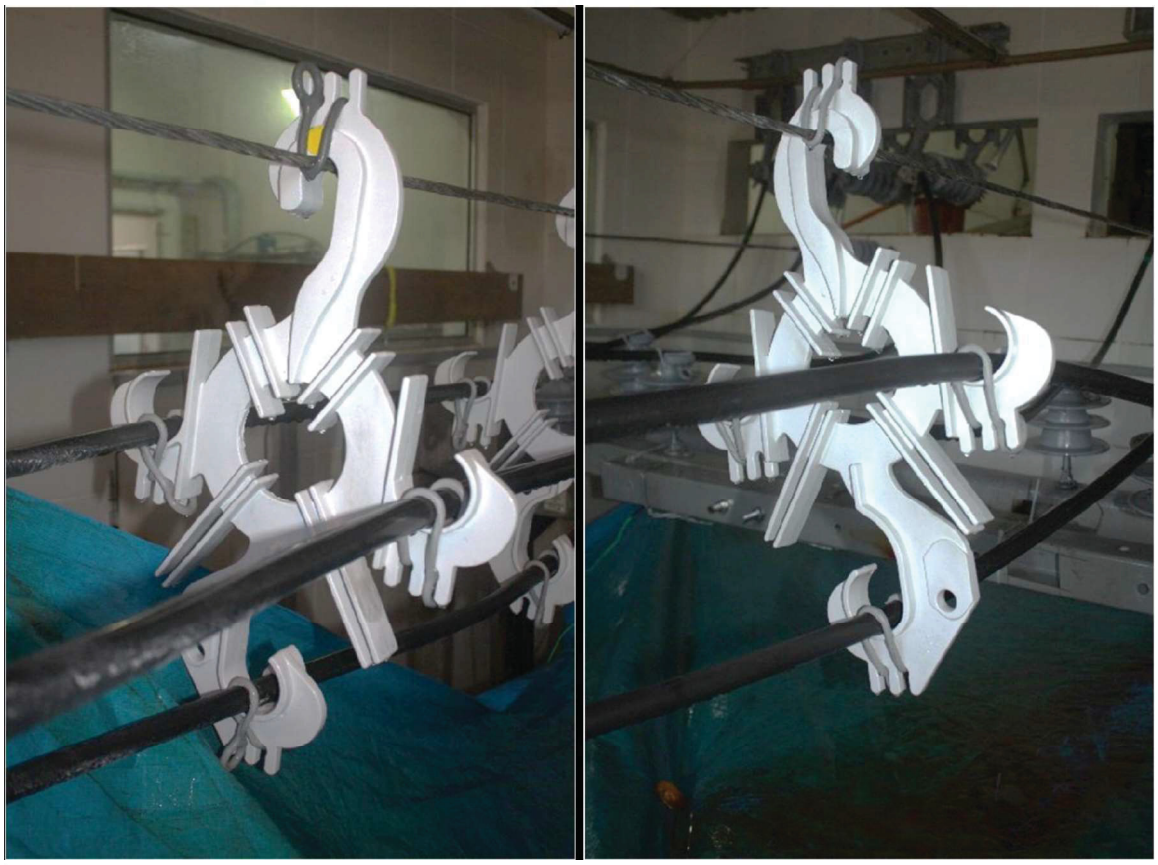


Figura 81 - Imagem do espaçador AM sem vestígios de trilhamento ou erosão

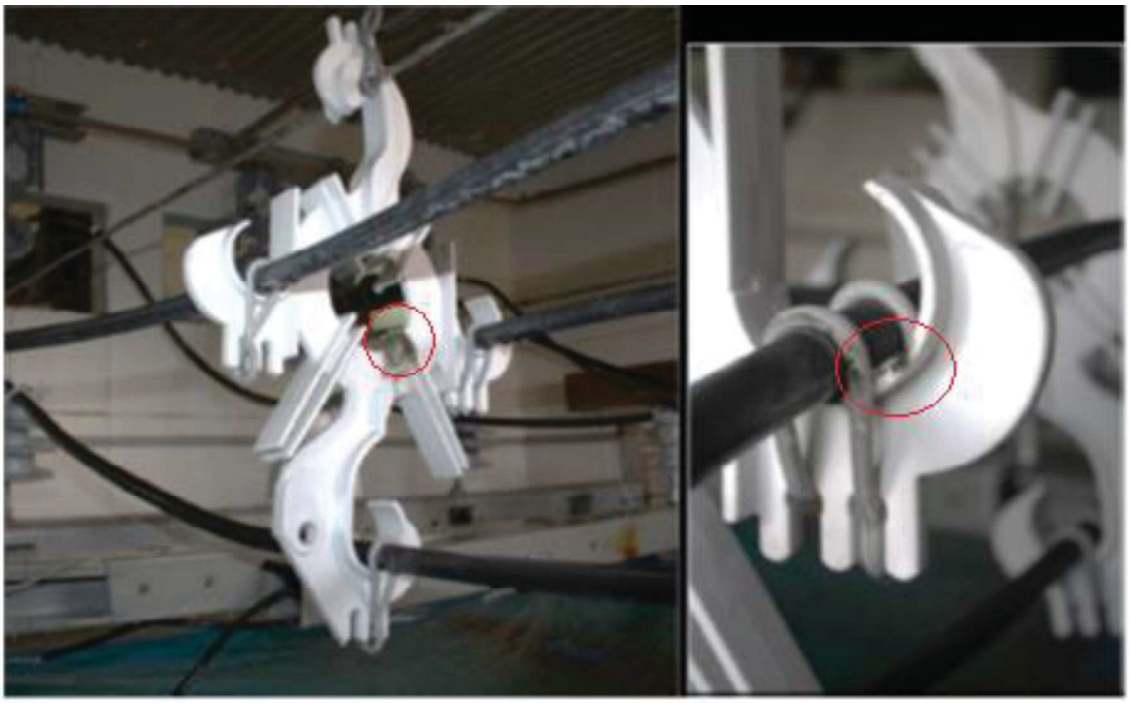


Figura 82 - Imagem do espaçador AZ com trilhamento e erosão no corpo do espaçador

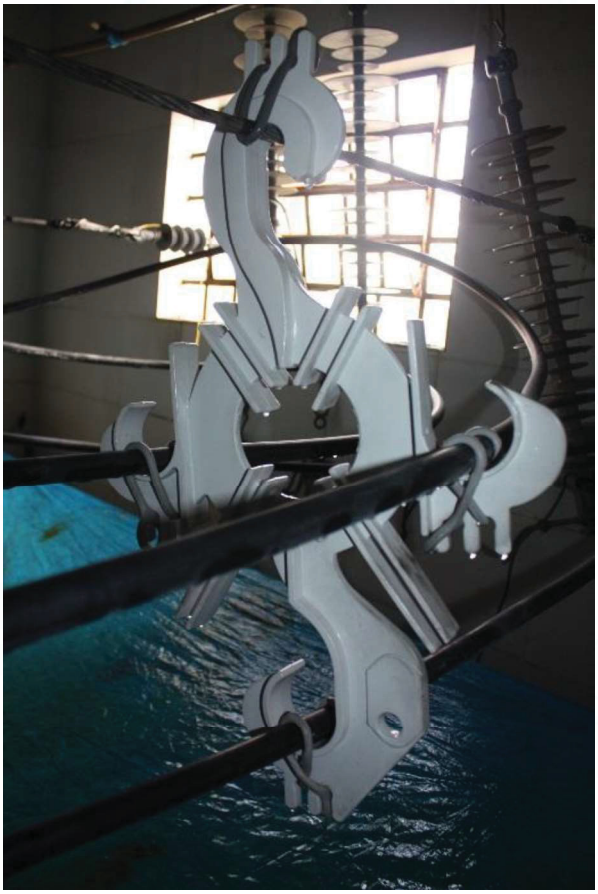


Figura 83 - Imagem do espaçador AM sem vestígios de trilhamento ou erosão

5.1.3 Análise dos Resultados

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de multiestressamento realizados nos protótipos do espaçador desenvolvido verificou-se que os mesmos apresentaram resistência ao trilhamento elétrico. Foram observados poucos sinais de trilhamento elétrico, mesmo considerando condições de ensaio mais severas que as estipuladas em norma. No ensaio em que foi realizada a comparação entre os protótipos desenvolvidos e espaçadores convencionais, os resultados indicaram que os protótipos apresentaram maior resistência ao trilhamento elétrico e à erosão.

Quanto ao desempenho entre os protótipos com as composições de materiais AZ e AM, para aqueles com a composição AM foram obtidos melhores resultados. Uma vez que a formulação de aditivos utilizada nas duas composições é a mesma, este resultado deve-se ao polietileno base da composição (HDPE), o qual para as duas composições possui fornecedores diferentes e no caso do contido na composição AM ser do tipo bimodal e possuir índice de fluidez superior (maior facilidade de processamento) ao da composição AZ.

5.2 Ensaios Verificação de Conformidade dos Protótipos com Requisitos Normalizados

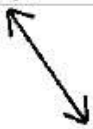
5.2.1 Resistência à Tração de Longa Duração

O critério de aprovação indicado pela norma [63] informa que o acessório deve suportar a carga durante todo o período de teste. Após o término do teste e retirada da carga não pode haver variação superior a 15% nas distâncias entre fases e entre fases e mensageiro. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10, indicam que a variação percentual máxima (obtida entre fase e mensageiro) do espaçador com formulação AM foi de 5,0 % para formulação AZ 6,6 %, estando ambos aprovados nesse ensaio.

Tabela 9 - Resultados das medições das cotas realizadas no espaçador com formulação AM após ensaio de tração longa duração

Cota	Direção da cota	Cota (mm)	Variação (mm)	Variação(%)
Distância entre berço do mensageiro até fase mais distante.		490	21	4,28
Distância entre fases paralelas		280	0	0
Distância entre fase e mensageiro lado A		300	15	5,00
Distância entre fase e mensageiro lado B		300	14	4,66
Distância entre fase A e fase inferior		265	5	1,88
Distância entre fase B e fase inferior		265	3	1,13

Tabela 10 - Resultados das medições das cotas realizadas no espaçador com formulação AM após ensaio de tração longa duração

Cota	Direção da cota	Cota (mm)	Variação (mm)	Variação(%)
Distância entre berço do mensageiro até fase mais distante.		490	20	4,08
Distância entre fases paralelas		280	-5	1,78
Distância entre fase e mensageiro lado A		300	15	5,00
Distância entre fase e mensageiro lado B		300	20	6,66
Distância entre fase A e fase inferior		265	0	0
Distância entre fase B e fase inferior		265	-5	1,88

5.2.2 Resistência à Tração de Curta Duração

De acordo com a especificação da norma [63] exige-se que a máxima força suportada pelos espaçadores seja no mínimo de 600 DaN e a variação antes e após o envelhecimento inferior a 25%. Assim, conforme pode-se observar na Tabela 11, os protótipos atenderam os requisitos do ensaio quanto à máxima força suportada. Em relação à variação foi observada de 3,0% para o espaçador com a formulação AZ e 1,1% com a formulação AM, também atendendo ao critério normativo.

Tabela 11 – Máxima força suportada pelos espaçadores antes e após o envelhecimento em estufa

Amostra	Antes do enavelhecimento	Após o enavelhecimento
AZ	601 DaN	619
AM	621 DaN	628

5.2.3 Outros ensaios

Ainda de acordo com a norma ABNT NBR 16094 [63] o espaçador deve atender os critérios estabelecidos para aprovação nos seguintes ensaios:

- Fatiação;
- Radiografia digital;
- Impacto;
- Temperatura de oxidação;
- Tensão suportável de impulso atmosférico;
- Tensão suportável à frequência industrial.

Os protótipos foram submetidos e aprovados a esse conjunto de ensaios.

5.3 Instalação e Avaliação em Campo

Foram instalados alternadamente os espaçadores com as formulações AM e AZ na rede protegida a 200 m da orla marítima (REDE 01) e na rede protegida em frente à orla marítima (REDE 02). Na Figura 84 e na Figura 85 estão apresentadas imagens registradas durante instalação na REDE 01 e na Figura 86 na REDE 02.



Figura 84 – Protótipos de espaçadores sendo instalados em rede protegida de região com elevada agressividade ambiental



Figura 85 - Rede protegida a 200 m da orla marítima com protótipos de espaçadores desenvolvidos



Figura 86 - Rede protegida em frente à orla marítima com protótipos de espaçadores desenvolvidos

Em uma primeira etapa de avaliação em campo, estando a REDE 01 em operação há 7 meses e a REDE 02 há 3 meses, foi realizada inspeção visual com documentação fotográfica da mesma. As imagens obtidas na inspeção visual estão apresentadas na Figura 87 e na Figura 88. Nota-se que há acúmulo de sal no cabo e no espaçador, mas não foram observadas sinais de trilhamento nos protótipos de espaçadores instalados. É importante ressaltar que nos demais equipamentos da rede, como o isolador e o grampo de ancoragem, além do cabo mensageiro, verificou-se sinais de oxidação, demonstrando a alta agressividade ambiental no local escolhido.

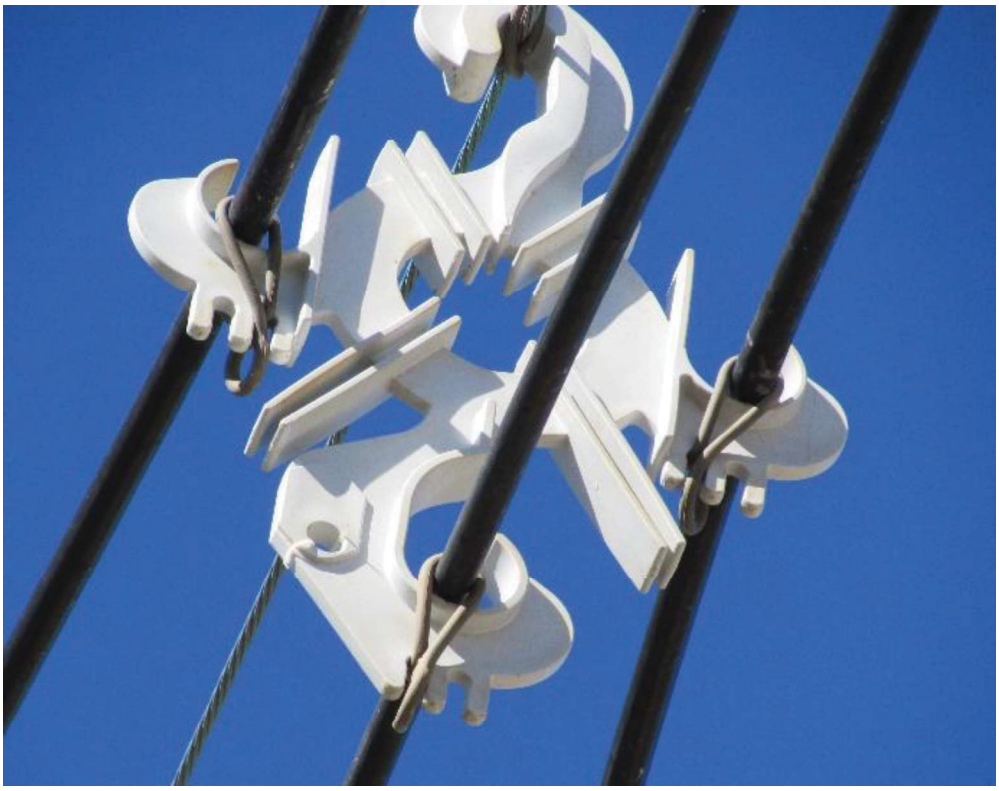
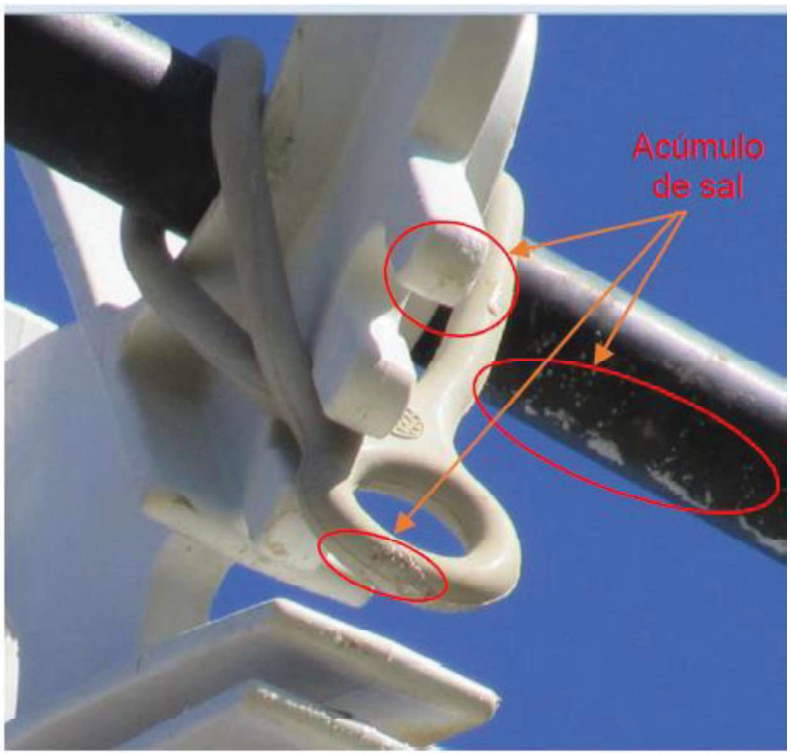
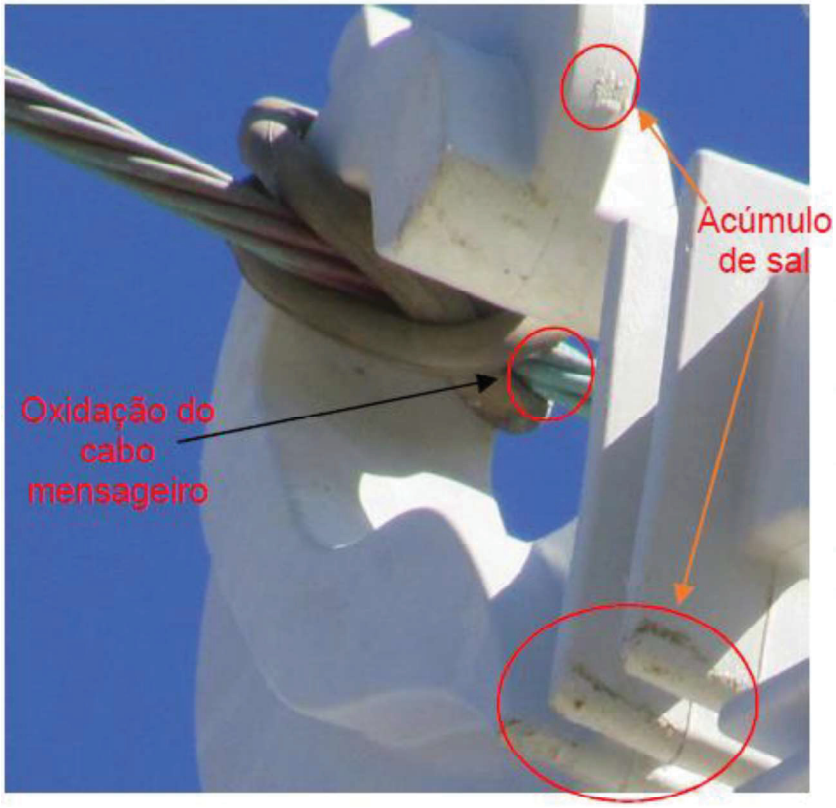


Figura 87 – Imagens do espaçador instalado nas redes piloto: imagem geral do espaçador



(a)



(b)

Figura 88 - Imagens do espaçador instalado nas redes piloto: a) detalhe na região de amarração cabo espaçador e anel b) detalhe da região de amarração como o cabo mensageiro

Em uma segunda etapa da avaliação dos protótipos instalados em campo, foi realizada inspeção nas redes pilotos, estando a REDE 01 há 1 ano e 9 meses e REDE 02 há 1 ano e 5 meses de instalação. As imagens obtidas dos equipamentos instalados na REDE 02 (em frente à orla marítima) estão apresentadas na Figura 89 e na Figura 90.

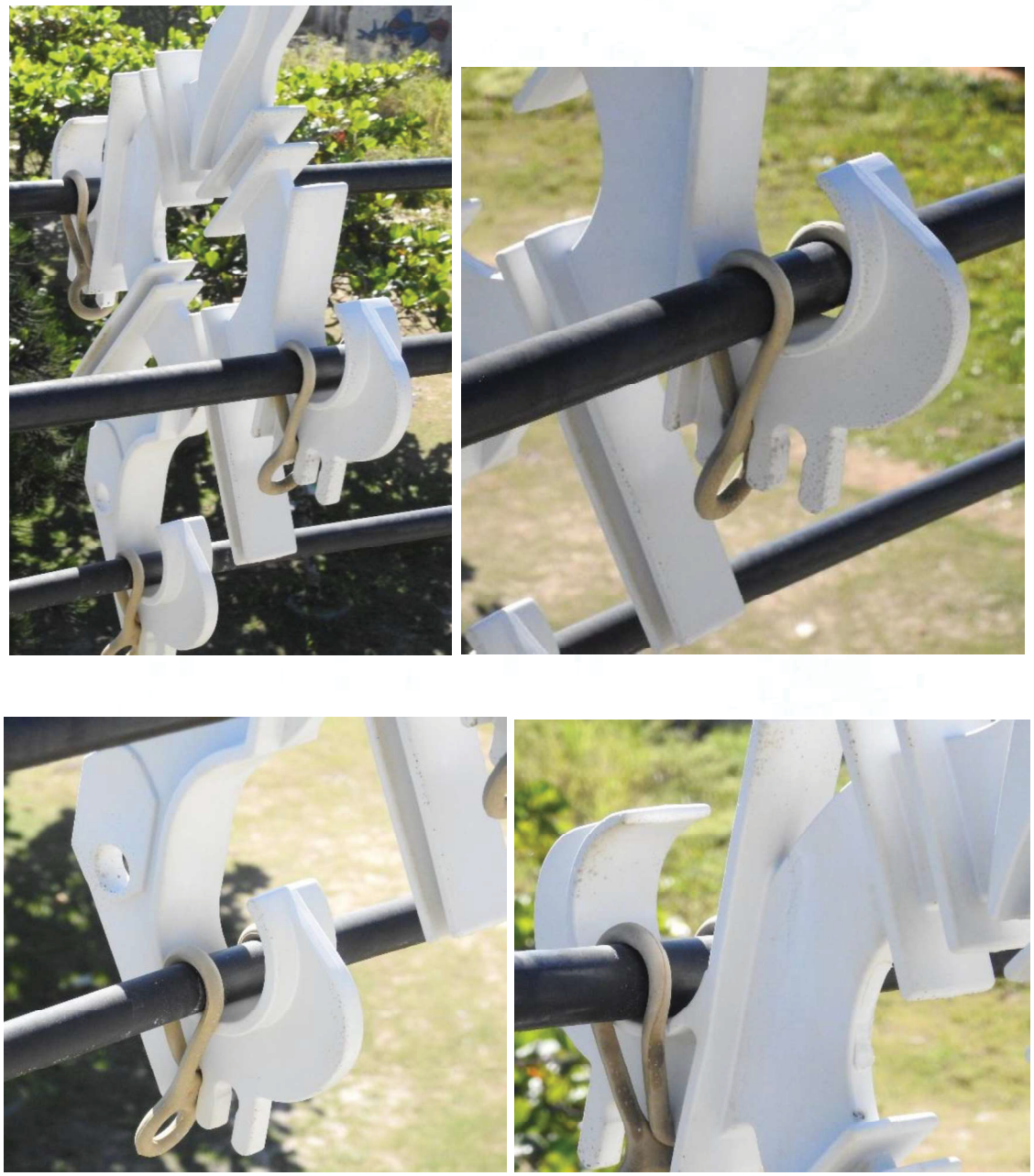


Figura 89 – Imagens do espaçador AM e detalhes das regiões de fixação com o cabo no qual não é observado trilhamento



Figura 90 – Imagens do espaçador AZ e detalhe das regiões de fixação com o cabo onde um dos cabos condutores apresenta trilhamento

Com base nas imagens da inspeção visual da rede piloto em frente à orla marítima nota-se que no espaçador da formulação AM não foi observada a presença de trilhamento elétrico (Figura 89) e no da formulação AZ foi observado trilhamento no cabo da fase mais afastada de orla marítima (Figura 90), mas não no espaçador. Mais uma vez, na inspeção visual, os outros equipamentos e acessórios demostraram sinais significativos de oxidação, indicam a alta agressividade do local de instalação da rede.

Para o trecho distante de 200 m da orla marítima com aproximadamente 1 ano e 9 meses de operação as imagens obtidas na inspeção estão apresentadas na Figura 91. Não foram observadas regiões de trilhamento nessa rede. A Figura 92 apresenta o espaçador substituído na rede com detalhe mais brilhante no cabo onde o anel de amarração estava fixado indicando acumulo de poluição na superfície do mesmo.



Figura 91 – Imagens do espaçador instalado na rede piloto e detalhes as regiões de fixação com o cabo

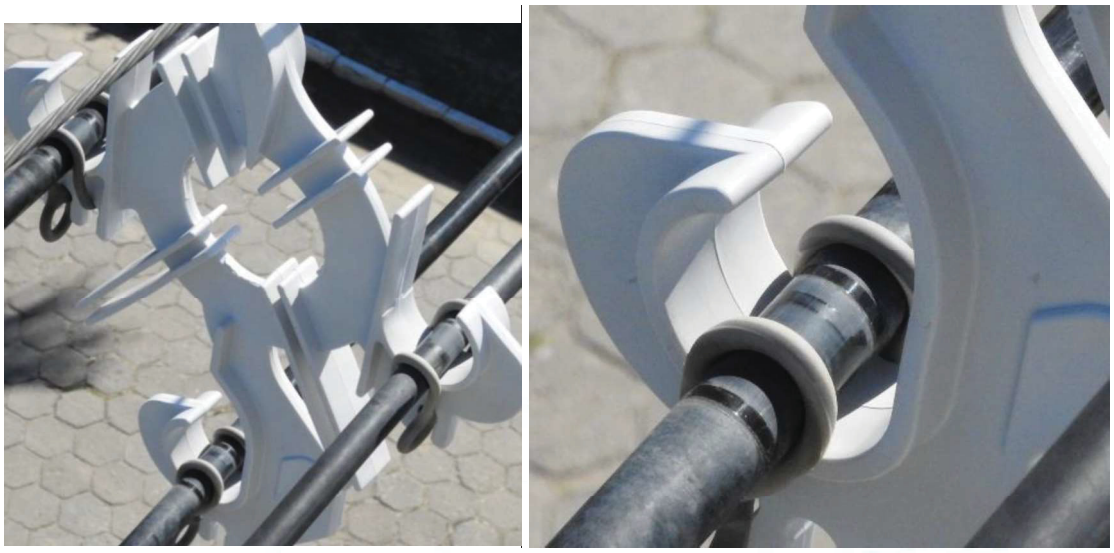


Figura 92 – Imagens do espaçador substituído na rede piloto

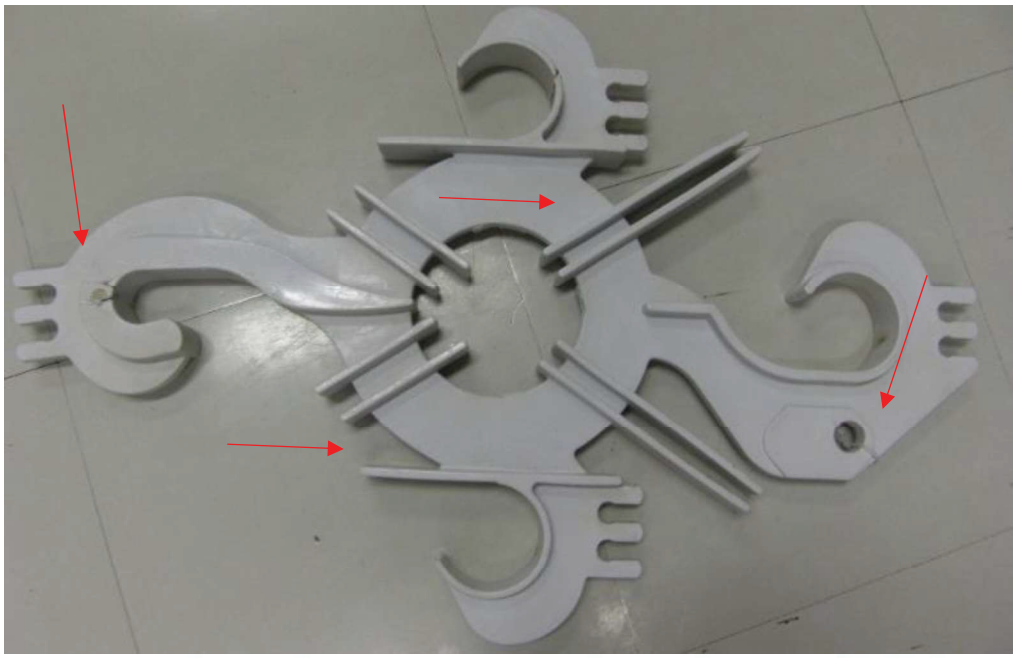
Foram retirados dois espaçadores de cada rede para avaliação em laboratório, um espaçador com o polímero da formulação AM e outro com o polímero da formulação AZ. Da Figura 93 à Figura 95 estão apresentadas imagens obtidas dos espaçadores retirados da rede mais próxima ao mar.



Figura 93 – Detalhes do espaçador, confeccionado com o polímero AM, retirado da rede piloto mais próximo da orla marítima



Figura 94 – Detalhes do espaçador, confeccionado com o polímero AZ, retirado da rede piloto mais próximo da orla marítima



a)



b) c)

Figura 95 – a) Imagem do espaçador com indicação das regiões onde foi observado erosão; b e c) Imagens das regiões com erosão nos espaçadores retirados de campo.

A Figura 95 apresenta regiões onde foram observadas erosões leves nos dois espaçadores da REDE 02, em regiões onde ainda ocorreu acumulo de salinidade e umidade. Essas erosões também foram observadas para os espaçadores instalados na rede piloto mais afastado do mar, mas com menor intensidade. Na Figura 93 estão apresentados detalhes do espaçador confeccionado com polímero da formulação AM. Não foram observados trilhamento nos berços, apenas sujidades. Observou-se um pequeno ponto de trilhamento no corpo do espaçador na região inferior e também na região próxima ao cabo mensageiro, sendo que essa última, provavelmente, deve-se ao fato de

ter sido aderido uma etiqueta para identificação do espaçador o que causou maior acumulo de sal e umidade. O espaçador confeccionado com polímero da formulação AZ (Figura 94) apresentou indícios de trilhamento em um dos berços do espaçador, o da fase mais afastada do mar.

5.3.1 Análise dos Resultados

Os resultados da avaliação em campo nos protótipos do espaçador desenvolvido indicaram que os mesmos apresentaram bom desempenho, com poucos sinais de trilhamento elétrico e erosão. Nos berços do espaçador não foram observados sinais de trilhamento elétrico ou erosão.

Atualmente as redes protegidas piloto com os protótipos de espaçadores encontram-se há mais de 24 meses em operação. Segundo a concessionária de energia detentora das redes não houve ocorrência de interrupção do fornecimento de energia nestas redes em função dos equipamentos instalados.

Quanto ao desempenho entre os protótipos com as composições de materiais AZ e AM, assim como nos ensaios em laboratório verificou-se que aqueles com a composição AM apresentaram melhores resultados quanto à resistência ao trilhamento elétrico. Este resultado deve-se ao polietileno (HDPE) base da composição ser de fornecedores diferentes e no caso do contido na composição AM ser do tipo bimodal e possuir índice de fluidez superior (maior facilidade de processamento) ao da composição AZ.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho pôde contribuir para o aprofundamento do conhecimento dos mecanismos de degradação em materiais poliméricos utilizados no setor elétrico, em especial, o espaçador de polietileno de redes protegidas. Tais estudos foram relevantes, principalmente no que tange mecanismo de degradação por trilhamento elétrico, em função da ocorrência do fenômeno de descargas parciais superficiais, e a correlação deste com a intensidade de campo elétrico e com as características do material dielétrico.

Através da simulação computacional de campo elétrico foi possível identificar que as regiões mais susceptíveis à ocorrência de trilhamento elétrico são os berços dos espaçadores, uma vez que o ar atmosférico nestas regiões apresenta a maior intensidade de campo elétrico da geometria, localizado na interface ar + cabo + espaçador. Verificou-se também que a presença de contaminantes, representados por bandas condutivas, na superfície dos espaçadores e cabos de redes protegidas intensifica o campo elétrico nestas regiões, chegando a valores próximos do valor de campo elétrico disruptivo estimado para o ar atmosférico. Assim, pode-se dizer que a presença de contaminantes nas superfícies do espaçador e do cabo protegido propiciam a ocorrência de descargas parciais superficiais, justificando a ocorrência de trilhamento elétrico nos espaçadores convencionais de 15 kV quando estes são instalados em redes protegidas de regiões com elevada agressividade ambiental.

Em relação às alternativas estudadas para minimizar os efeitos do trilhamento elétrico nos espaçadores das redes aéreas protegidas com o intuito de adquirir subsídios técnico-científicos para desenvolvimento do protótipo de espaçador para rede protegida em regiões de elevada agressividade ambiental conclui-se, através das simulações computacionais de campo elétrico e dos ensaios de compatibilidade dielétrica, que o aumento nas dimensões do espaçador em relação ao espaçador convencional contribui significativamente para a redução da ocorrência de descargas parciais e consequentemente trilhamento elétrico nestes equipamentos. A porcentagem de aumento de 60% foi definida com base em três aspectos: acima de 60% é menor a variação

percentual de decaimento da intensidade máxima de campo elétrico no ar para a região da interface no berço do espaçador; a intensidade máxima de campo elétrico é inferior àquela calculada para o espaçador com dimensões convencionais e sem poluição, que apresenta bons desempenho e resistência ao trilhamento elétrico em regiões de baixa elevada agressividade ambiental; e a intensidade de campo elétrico máximo é inferior ao valor estimado para o campo elétrico disruptivo no ar atmosférico.

Os protótipos, considerando o projeto proposto e duas formulações de polietileno aditivado, foram aprovados nos ensaios normalizados e apresentaram bom desempenho quanto à resistência ao trilhamento elétrico frente a condições de ensaio bastante severas. Em campo, com quase 24 meses em operação em redes protegidas de região com elevada agressividade ambiental, os resultados de inspeção visual indicaram poucos indícios da ocorrência de trilhamento elétrico.

Quanto às formulações avaliadas, verificou-se que conferem maior resistência ao trilhamento elétrico para equipamentos em operação em redes elétricas. Ainda, a formulação denominada AM apresentou melhor desempenho quando comparada com a AZ, tanto nos ensaios de compatibilidade dielétrica simulando as condições de elevada agressividade ambiental como na operação em campo em condições reais de elevada agressividade ambiental.

Por fim, no trabalho foi desenvolvido espaçador, que conta desenho e dimensões, além de material, próprios para a sua operação em regiões com elevada agressividade ambiental.

6.1 Trabalhos Futuros

A realização de simulações computacionais que possam reproduzir o depósito de partículas poluentes sobre a superfície dos espaçadores considerando: a diversidade de poluentes envolvidos; a forma estocástica como são depositados; a dependência de diversos fatores ambientais (chuvas, direção e velocidade do vento, ocorrência de tempestades, localização geográfica, temperatura, umidade, altitude, etc.).

Realizar a avaliação através de simulações, em laboratório e em campo de protótipos do espaçador considerando o projeto otimizado, com as alterações propostas e outras que possam ser identificadas através de simulações que representem o depósito de partículas poluentes.

REFERÊNCIAS

[1] NISHIMURA, F.; CICARELLI, L. D.; MARTINS, J. P. Rede aérea isolada e protegida de média tensão. **Eletricidade Moderna**, n. 241, p. 68-73, 1994.

[2] 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.

[3] SILVA, G. C.; PIAZZA, F.; Munaro, M. Field behavior on polymer-covered overhead conductors submitted to natural aging on diverse weather and geographic conditions in Brazil. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 24, n. 3, p. 1651-1656, 2009.

[4] MELLO, D.R.de. et al. Avaliação de redes aéreas compactas em ambientes agressivos. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 15., Salvador. Anais. SENDI. Salvador: COELBA, 2002.

[5] ESPINO-CORTÉS, F. P.; RAMIREZ-VASQUEZ, I.; GÓMEZ, P.; HEREDIA, V. A. Performance of a spacer cable system under polluted conditions. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 30, n. 6, Novembro-Dezembro, 2014.

[6] KAO, K. C. “Dielectric Phenomena in Solids”. Elsevier Academic Press, Waltham, 2004.

[7] REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. "Fundamentos da Teoria Eletromagnética". Rio de Janeiro: Editora Campus, 1988.

[8] MACHADO, K. D. "Teoria do Eletromagnetismo, Volume I", 2ª edição. Ponta Grossa: Editora da UEPG, 2004.

[9] HILSDORF, E. R. Utilização de Isoladores Cerâmicos Tipo Pilar Núcleo Sólido em Redes de Distribuição de Energia Elétricas Tipo Compacta. Dissertação. Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, Brasil. 2015.

[10] RAJU, G. G. “Dielectrics in Electric Fields”. CRC Press, 2003.

[11] PINHEIRO, W. A Corrente de Fuga como Parâmetro Indicativo do Estado de Degradação de Materiais Poliméricos de Rede Compacta de Média Tensão, Instalados em Ambientes Agressivos. Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

[12] COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; MARIA, L. C. D. S. "Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações". Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2003.

[13] MUNARO, M. Desenvolvimento de blendas de polietileno com desempenho aperfeiçoado para utilização no setor elétrico. Tese. Programa Interdisciplinar de Pós-graduação em Engenharia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 66p, 2007.

[14] MANRICH, S. "Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes". 1ª. ed. São Paulo: Artliber, 2005.

[15] HALL, C. "Polymer Materials". London: Macmillan Education, 1989.

[16] AKCELRUD, L. "Fundamentos da Ciência dos Polímeros". 1ª. ed. Barueri, SP: Manole, 2007.

[17] DA SILVA, R. F. Trilhamento Elétrico Sobre Materiais Poliméricos pela Análise da Energia Absorvida Devido as Descargas Elétricas Superficiais. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil, 2014.

[18] YAMANE, M. M. Modificação das propriedades mecânicas do polietileno de alta densidade através de mistura com polietileno linear de baixa densidade. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 84. 2010.

[19] PAOLI, M. A. D. Degradação e Estabilização de Polímeros. 2ª versão on-line (revisada). ed. [S.l.]: Chemkeys, 2008.

[20] DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J. C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. London: Peter Peregrinus Ltd., 1992

[21] GJAERDE, A. C. Multifactor Aging Models – Origin and Similarities. IEEE EIM, V. 13, n. 1, p. 6-13, Jan./Feb. 1997.

[22] RABELLO, M. S. Aditivação de Polímeros. 2ª. ed. São Paulo: Artliber, 2000.

[23] MUNARO, M. et al. Fatores de Influência na Compatibilidade de Cabos Protegidos, Isoladores e Acessórios Utilizados em Redes Aéreas Compactas de Distribuição de Energia Elétrica, sob Condições de Multi-estressamento. Anais do II Citenel, 2003. 555-560.

[24] YOSHIMURA, N.; KUMAGAI, S.; DU, B. Research in Japan on the tracking phenomenon of electrical insulating materials. **IEEE El. Ins. Magazine**, v. 13, n. 5, p. 8-19, 2009.

[25] LI, J. Y.; SUN, C. X.; SEBO S. A. Humidity and contamination severity impact on the leakage currents of porcelain insulators, **IET Gen. Transm. Distribution**, v. 5, n. 1, p. 19-28, 2011.

[26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1868-73. Standard Test Method for Detection and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems, 2013.

[27] KREUGER, F. H., "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment". Butterworths, 1989.

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60270:2017, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. 2017.

[29] BARTINIKAS, R.; McMAHON, E. J. "Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation", vol. 1. 1. Ed. Baltimore: ASTM (American Society for testing and Materials), 1979.

[30] KIND. D. "An Introduction to High Voltage Experimental Technique. Vieweg, 1978.

[31] 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.

[32] FAGUNDES, R. C. Avaliação de acessórios poliméricos de redes compactas protegidas por meio de ensaio de multiestressamento e simulação computacional. Curitiba, 2008.

[33] WALKER, J., RESNICK, R., HALLIDAY, D. “Halliday & Resnick fundamentals of physics” 10th Ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014.

[34] GULSKI, E. Digital Analysis of Partial Discharges. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 2, n. 5, p. 822-837, Oct. 1995(a).

[35] FILHO, V. S. Imagens de Defeitos por Descarga Parcial Estimulada por Raio X Pulsado em Materiais Dielétricos Poliméricos. Tese. Programa Interdisciplinar de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2000.

[36] NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. “High Voltage Engineering”. 2. Ed. McGraw-Hill, 1995.

[37] BARTINIKAS, R. Partial Discharges Their Mechanism, Detection and Measurement. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 9, no.5 (out.), p.763-808, 2002.

[38] ABDEL-SALAM, M.; STANEK, E. K. On the calculation of breakdown voltages for uniform electric fields in compressed air and SF6. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol.24, no.6 (nov. – dec.), p.1025-1030, 1988

[39] LUCAS, J.R.; “High Voltage Engineering”. Sri Lanka, 2001.

[40] MEEK J. M.; CRAGGS J.D. “Electrical breakdown of gases”. Oxford (Clarendon Press), 1953.

[41] MALIK, N. H. “Electrical Insulation in Power Systems”. Power engineering. Marcel Dekker, 1998.

[42] KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S.; KUFFEL, J. “High Voltage Engineering Fundamentals”. 2. ed. Oxford: Oxford Newnes, 2002.

[43] ABDEL-SALAM, M.; HUSSEIN, A., EL_MORSHEDY, A.; RADWAN, R. “High-Voltage Engineering: Theory and Practice”. New York: CRC Press., 2000.

[44] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT IEC/TS 60815-1:2014. Seleção e dimensionamento de isoladores para alta-tensão para uso sob condições de poluição. Parte 1: Definições, informações e princípios gerais, 2014.

[45] WYPYCH, G. “Handbook of material weathering”. 4th. ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2008.

[46] GONG, J. et al. Combination of fumed silica with carbon black for simultaneously improving the thermal stability, flame retardancy and mechanical properties of polyethylene. **Polymer**, v. 55, p. 2998-3007, 2014.

[47] PAVLIDOU, S.; PAPASPYRIDES, C. D. A review on polymer–layered silicate nanocomposites. **Progress in Polymer Science**, vol. 33, p. 1119–1198, 2008.

[48] HOWELL, B. A. Development os additives possessing both solid-phase and gas-phase flame retardant activities. **Polymer Degradation and Stability**, n. 93, p. 2052-2057, 2008.

[49] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. D 2303: Standard test Methods for Liquid-Contaminant Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials. West Conshohocken, p. 11, 2013.

[50] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 10296: 2014. Material isolante elétrico - Avaliação da resistência ao trilhamento e erosão sob condições ambientais severas. Rio de Janeiro, p. 12. 2014.

[51] SILVA, F. I. de C. Desenvolvimento e avaliação de formulações de polietileno para aplicação em equipamentos utilizados em redes de distribuição de energia elétrica em regiões de elevada agressividade ambiental. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Paraná, 2015.

[52] VAS, J. V.; VENKATESULU, B; THOMAS, M. J. Tracking and erosion of silicone rubber nanocomposites under DC voltages of both polarities. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, Vol. 19, p 91-98; 2012.

[53] AUBERT, M.; TIRRI, T.; WILÉN, C.; HEUDE, A. F.; PFAENDNER, R.; HOPPE, H.; ROTH, M. Versatile bis(1-alkoxy-2,2,6,6-tetramethylpiperidin-4-yl)-diazenes (AZONORs) and related structures and their utilization as flame retardants in polypropylene, low density polyethylene and high-impact polystyrene. **Polymer Degradation and Stability**, vol.97 p.1438-1446, 2012.

[54] RAIKOS, G. Development of the Hendrix polyethylene pin type insulator. ECNE T&D Committee Meeting, n. 67.

[55] CARDOSO, A.; CARDOSO, J.; FIGUEIREDO, J.; MENDES, N. New solutions in EDP distribution medium voltage overhead lines. 20th Int. Conf. on Electricity Distribution - CIRED, paper 0312, 2009.

[56] SOARES, M. R. Rede protegida: Novo padrão da Cemig eleva níveis de confiabilidade. **Eletricidade Moderna**, vol. 291, p. 50-63, 1998.

[57] ROCHA, R. C. C; BERRÊDO, R. C.; BERNIS, R. A. O. et aL. New technologies, standards, and maintenance methods in spacer cable systems. **IEEE Trans. on Power Delivery**, v. 17, n. 2, p. 562-568, 2002.

[58] 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 de mestrado do Programa Interdisciplinar de Pós-graduação em Engenharia, Setor de Tecnologia da UFPR, Curitiba, 88p, 2000.

[59] SOARES, M. R. et al. Integração de cabos óticos a redes aéreas compactas com espaçadores. **Eletricidade Moderna**, vol. 255, p. 148-157, 1995.

[60] DOI, H.; MIYUACHI, H.; MATSUMOTO, M. T. Cabos cobertos com XLPE para linhas aéreas de distribuição. **Mundo Elétrico**, p. 90-93, 1987.

[61] PIAZZA, F.et al. Avaliação da geometria dos acessórios de redes protegidas de distribuição considerando solicitações devido ao campo elétrico e ambientais. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 15., Salvador. Anais. SENDI. Salvador: COELBA, 2002.

[62] COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Especificação de espaçador e amarrações para rede compacta de 13,8 kV e 34,5 kV. Rio de Janeiro: ABRADEE, s.d. (CODI-3-2-18-24.1).

[63] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16094: Acessórios poliméricos para redes aéreas de distribuição de energia elétrica – Especificação, 2017.

[64] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16095: Acessórios poliméricos para redes aéreas de distribuição de energia elétrica – Padronização, 2014.

[65] OLIVEIRA, J.J.S.; PINHEIRO, W.; TATIZAWA, H. Diagnóstico de utilização de cabos cobertos e pré-reunidos. São Paulo: Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, 1992.60p.

[66] FIERRO-CHAVEZ, J. L.; RAMIREZ-VAZQUEZ, I.; MONTOYA-TENA, G. On-line leakage current monitoring of 400 kV insulator strings in polluted areas. **IEEE Proceedings of the Generation Transmission and Distribution Conference**, Vol. 143, Nº 6, pp 560-564, November 1996.

[67] SATOTO, R. et al. Weathering of high-density polyethylene in different latitudes. **Polymer Degradation and Stability**. Elsevier Science Limited, v. 56, p. 275-279, 1997.

[68] SAMPER, J. Importance of weathering factors other than UV radiation and temperature in outdoor exposure. **Polymer degradation and stability**, v. 76 p. 455-465, 2002.

[69] SILVA, G.C.; PIAZZA, F.; MUNARO, M. Avaliação do desempenho em campo de cabos protegidos submetidos a envelhecimento natural em distintas regiões do brasil. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 17., Belo Horizonte. Anais. SENDI. Belo Horizonte: CEMIG, 2006.

[70] BLALCHER, H. E.; CORCORAN, R. P.; MAUSER, S. F. Evaluating 15 kV spacer/cable systems for operation at 34,5 kV. s.l. s.d.

[71] RAIKOS, G. Development of the Hendrix polyethylene pin type insulator. ECNE T&D Committee Meeting, n. 67.

[72] ESCELSA. Padrão Técnico PT.RD. 06.002 - Estruturas para redes de distribuição aéreas primárias compactas protegidas, 2004.

[73] SMITH, N. A. Design considerations of spacer for aerial spacer cable. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v.4, n.1, p12-17, Mar. 1969.

74 KING, J. H. Performance of spacer cable in saline atmosphere. Transmission on Distribution, v. 22, n. 11, p. 46-49, Nov. 1970.

[75] SUMITAMI, I. et al. Development of composite line spacers for distribution lines. In: 15th International conference & Exhibition on Electricity Distribution, 2005. Kitakyushu. Proceedings. ISEIM 2005. Piscataway: IEEE, 2005, p.v.2 / 348-351.

[76] MELLO, D. R.; GONZALEZ, E. G. C. Desenvolvimento de Espaçador Polimérico para Redes Aéreas Compactas Instaladas em Ambientes com Elevado Índice de Poluição e Temperatura. XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte-MG, 2006.

[77] OLIVEIRA, G. M. Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), 2003.

[78] NAYLOR, T. H. Computer simulation experiments with models of economic systems. New York: John Wiley & Sons, 1971.

[79] EHRLICH, P. J. “Pesquisa operacional”. Rio de Janeiro: Almeida Neves Editores Ltda, 1971.

[80] CARDOSO, J. R. Introdução ao método dos elementos finitos. Publicação independente.

[81] SABONNADIERE, J. C. COULOMB, J. L. “Elementos finitos e CAE, aplicações em Engenharia Elétrica”. São Paulo: Editora Aleph, 1993.

[82] TURNER, M. R.; CLOUGH, R.; MARTIN, H.; TOOP, L., Stiffness and deflection analysis of complex structures, J. Aero. Sci., 23, n.9, p. 805-823, 1956.

[83] ARGYRIS, J. H.; KELSEY, S. Energy theorems and structural analysis: Butterworth Scientific Publications. London, 1960.

[84] ZIENKIEWICS, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. “The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals”. 7 ed. Butterworth-Heinemann, 2013.

[85] SADIKU, M. N. O. “Elements of Electromagnetics”. 3. ed. New York: Oxford University Press, 2001.

[86] REDDY, J. N. “An Introduction to the Finite Element Method”. 2. ed. New York: McGraw-Hill Inc, 1993.

[87] MOUSSAVI, S. Z.; SHEIKHDORAGH, B.; SHAYEGANI-AKMAL, A. A. Investigation on Pollution Factors on Electric Field and Potential Distribution of Polymeric Insulator. Journal of Basic and Applied Scientific Research, 2(12)12482-12491, 2012.