



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

*ALAN MELO NÓBREGA*

*ESTUDO DAS REDES AÉREAS COMPACTAS POR MEIO DE ENSAIOS E  
MODELAGENS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS*

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**

**Área de Concentração:** Sistemas Elétricos de Potência

**Orientador:** Prof. Manuel Luis B. Martinez, Dr.

**Co-orientador:** Prof. Estácio T. W. Neto, Dr.

**Itajubá, Setembro de 2011.**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Cristiane Carpinteiro- CRB\_6/1702

N754e

Nóbrega, Alan Melo

Estudos das redes aéreas compactas por meio de ensaios e modelagens utilizando o método dos elementos finitos. / por Alan Melo Nóbrega. – Itajubá (MG) : [s.n.], 2011.

123 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez.

Coorientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Redes compactas. 2. Cabos cobertos. 3. Trilhamento elétrico. I. Martinez, Manuel Luis Barreira, orient. II. Wanderley Neto, Estácio Tavares, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte inesgotável de amor e sabedoria, a quem sempre recorri nos momentos de vacilações e dificuldades, sempre recebendo a luz e a força necessárias para a superação de todos os obstáculos.

Aos meus pais pelo eterno apoio; pelos ensinamentos tão dignos e nobres.

Aos meus irmãos que sempre me apoiaram nas decisões difíceis.

Ao Prof. Edson Guedes pelo apoio prestado para que eu estivesse aqui.

Ao Prof. Manuel Martinez pela imprescindível e contínua contribuição para que este trabalho pudesse vir a ser desenvolvido.

Ao Prof. Estácio Wanderley pela compreensão, confiança e apoio que me foram dispensados.

Ao Prof. Credson de Salles pelo apoio técnico.

Aos professores que, durante esta etapa, transmitiram-me os conhecimentos úteis e necessários.

Aos funcionários da UNIFEI, que, sempre solícitos e respeitosos, tornaram menos árdua esta etapa.

À empresa AES Sul pelo suporte financeiro.

Finalmente, agradeço também a todos aqueles que, embora não citados aqui, contribuíram, direta ou indiretamente, para a concretização de mais esta etapa em minha vida.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o sistema de redes compactas, com base em ensaios de alta tensão e de modelagens que utilizam o método dos elementos finitos. Este estudo foi encorajado pelos resultados insatisfatórios, geralmente, obtidos durante a realização de ensaios de compatibilidade dielétrica com os componentes utilizados para a montagem deste tipo de rede. Este é recomendado pela ABRADDEE e pelo projeto de norma da ABNT. Devido ao alto índice de falhas, levando a perfuração e queima dos cabos e espaçadores antes de completar o tempo de ensaio necessário, uma avaliação das possíveis causas destas falhas foi feita.

As principais ferramentas utilizadas para a realização desse estudo foram ensaios de compatibilidade dielétrica, radiografias digitais, avaliação geométrica, medições de isolamento e de corrente de fuga e análise do teor de cargas minerais e de negro de fumo. Além disso, o método de elementos finitos foi usado para realizar modelagens e identificar as principais causas de problemas que afetam as redes compactas.

Cerca de 40 conjuntos de cabo/espaçador foram testados em laboratório, considerando diferentes situações, como a presença de camada de semicondutora no cabo, condições de chuva e distâncias diferentes para o plano de terra. Estas situações diversas também foram analisadas por meio de modelagens computacionais, que indicaram os impactos dessas diferentes condições nas linhas de campo elétrico, equipotenciais e gradientes de campo elétrico.

Finalmente uma análise da geometria dos cabos foi realizada, avaliando o nível de concentricidade entre o condutor e uma camada isolante e uma investigação sobre a qualidade do isolamento. Deste modo a qualidade de manufatura dos produtos pôde ser avaliada, e não apenas a compatibilidade entre o cabo e os demais acessórios da rede.

O resultado indica as principais causas (possíveis) de falhas, e sinaliza algumas soluções possíveis para evitá-las. Este fato é extremamente importante quando é considerado o grande número de sistemas de redes compactas existentes no Brasil, já que, com o envelhecimento destas redes recentemente instaladas, um número considerável de falhas é esperado.

## ABSTRACT

This work presents a study on spacer cable networks, based on high voltage tests and finite elements modeling. This study was encouraged by the poor results usually obtained during the realization of compatibility tests, required by manufacturers and electricity companies with the components used to assembly this kind of network. As most of these tests have lead to puncturing and burning of the cables and spacers before completing the required test time, an evaluation of the possible causes of these failures is made.

The main tools used to conduct this study were dielectric compatibility tests, digital radiography, insulation's leakage current measurements, geometry measurements and analysis of mineral charging and carbon black. Although, the finite elements method was used to achieve models to identify the main causes of problems that affect the spacer system network.

About 40 sets of cable/spacer were tested in laboratory, considering different situations, as the presence of a semi-conductive layer in the cable, wet conditions and different distances for the grounding plane. These diverse situations were also analyzed by means of simulations, which indicated the impacts of these different conditions of the electric field lines, field gradients and equipotentials.

Finally some analysis in the geometry of the cables were conducted, evaluating the level of concentricity between conductor and insulating layer and also an investigation about the quality of the covering insulation, so that the manufacturing quality could be appraised, and not only the compatibility among cable and further network accessories.

The result indicates the main possible causes of failures as though as contributes signaling some possible solutions to avoid the observed failures. This is extremely important when the large number of existing spacer system networks in Brazil is taken into account, as though as the ageing of the first installed networks of this kind, for which a considerable number of failures is expected.

## Sumário

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. HISTÓRIA DAS REDES COMPACTAS NO MUNDO .....	1
1.2. HISTÓRIA DAS REDES COMPACTAS NO BRASIL .....	4
1.3. CONCEITOS INTRODUTÓRIOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM REDES COMPACTAS .....	5
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>9</b>
2.1. DIELÉTRICOS.....	9
2.1.1. Polarização dos Dielétricos.....	9
2.1.2. Constante Dielétrica ou Permissividade Relativa.....	10
2.1.3. Rigidez Dielétrica.....	10
2.1.4. Resistência de Isolamento .....	11
2.1.5. Resistividade Superficial [12].....	11
2.1.6. Perdas Dielétricas .....	12
2.1.7. O Comportamento Higroscópico e a Absorção de Água [12].....	12
2.1.8. Capacidade de Dispersão da Umidade .....	14
2.2. REDE COMPACTA .....	14
2.2.1. Cabo Coberto.....	15
2.2.1.1. Camada semicondutora .....	16
2.2.1.2. Camada intermediária .....	18
2.2.1.3. Camada superficial .....	18
2.2.2. Extrusão .....	19
2.2.3. Trilhamento Elétrico .....	20
2.2.4. Arborescência .....	20
2.2.4.1. Arborescência elétrica .....	21
2.2.4.2. Arborescência em água .....	22
2.2.4.3. Combinação de arborescência em água com elétrica .....	22
<b>CAPÍTULO 3 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>25</b>
3.1. ENSAIOS REALIZADOS DURANTE O TRABALHO.....	25
3.1.1. Ensaios de Compatibilidade Dielétrica.....	26
3.1.2. Medições de Corrente de Fuga.....	27
3.1.3. Medição dos Diâmetros dos Cabos.....	27
3.1.4. Radiografias Digitais .....	28
3.1.5. Análise do Teor de Cargas Minerais e Negro de Fumo .....	28

3.1.6. Medição do Isolamento dos Cabos .....	28
3.1.7. Ensaio de Tensão Aplicada .....	29
3.2. MODELAGENS .....	29
3.2.1. COMSOL Multiphysics.....	30
<b>CAPÍTULO 4 - COMPATIBILIDADE DIELÉTRICA .....</b>	<b>31</b>
4.1. ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE POR MEIO DE MODELAGENS.....	32
4.1.1. Compatibilidade Cabo/Espaçador .....	32
4.1.2. Compatibilidade Cabo/Isolador .....	34
4.1.3. Compatibilidade Cabo/Gota de Água.....	36
4.2. ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE DIELÉTRICA POR MEIO DE ENSAIOS.....	38
4.3. OUTROS FATORES DE FALHA QUE NÃO TEM RELAÇÃO COM A COMPATIBILIDADE DIELÉTRICA.....	39
<b>CAPÍTULO 5 - IMPACTOS DA PRESENÇA DE UMA CAMADA SEMICONDUTORA EM CABOS COBERTOS UTILIZADOS NAS REDES COMPACTAS.....</b>	<b>41</b>
5.1. Análise pela Corrente de Fuga .....	41
5.2. Análise pelo Gradiente de Campo Elétrico.....	46
<b>CAPÍTULO 6 - EFEITOS DA PROXIMIDADE DE UM PLANO TERRA SOBRE O CAMPO ELÉTRICO NA COBERTURA DO CABO.....</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 7 - O PROBLEMA DA EXCENTRICIDADE NOS CABOS.....</b>	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>67</b>
8.1. CONCLUSÕES.....	67
8.2. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>69</b>
BIBLIOGRAFIA PRODUZIDA .....	69
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	69
<b>ANEXO I.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO III.....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>91</b>
AA.1. MATERIAIS ISOLANTES ELÉTRICOS .....	93
AA.1.1. Fundamentos de Polímeros Extrudados Empregados em Isolamento Elétrico.....	94
AA.1.1.1. Polietileno (PE).....	94
AA.1.1.2. Ramificações .....	96
AA.1.1.3. Cristalinidade e Movimento da Cadeia .....	98
AA.1.1.4. Copolímeros.....	101
AA.1.2. Manufatura do Polietileno .....	102

AA.1.2.1. Métodos Convencionais de Manufatura .....	102
AA.1.2.2. Tecnologia de Controle da Distribuição de Peso Molecular.....	102
AA.1.3. Polietileno Reticulado (XLPE) .....	105
AA.1.4. Polietileno Reticulado com Retardo de Arborescências (TR-XLPE).....	107
AA.2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	109
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>111</b>
AB.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	113
AB.1.1. Discretização no Método dos Elementos Finitos .....	113
AB.1.2. Equações que Regem os Elementos.....	114
AB.1.3. Conexão de Todos os Elementos.....	117
AB.1.4. Resolução das Equações Resultantes .....	120
AB.1.4.1. Método Iterativo.....	121
AB.1.4.2. Método da Matriz de Banda .....	122
AB.2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	123

**LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

Símbolo	Unidade	Significado
PE		Polietileno
LDPE		Polietileno de baixa densidade.
LLDPE		Polietileno linear de baixa densidade.
HDPE		Polietileno de alta densidade.
XLPE		Polietileno reticulado.
TR-XLPE		Polietileno reticulado com tratamento anti arborescência.
$U_0$	kV	Tensão da fase para terra.
$E$	kV/mm	Campo elétrico.
$\rho_s$		Resistividade superficial.
$\epsilon$		Constante dielétrica.
$\mu_p$		Umidade de Equilíbrio

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Cargas distribuídas em um dielétrico polarizado. ....	9
Figura 2.2 - Variação, em função do tempo, do conteúdo de umidade $\mu$ de um corpo de prova nas fases de absorção de umidade (a) e secagem (b). ....	13
Figura 2.3 - a) Ilustração da poda de uma árvore atravessada por uma rede convencional. b) Ilustração da poda de uma árvore atravessada por uma rede compacta. ....	15
Figura 2.4 - Desenho de cabo coberto. ....	16
Figura 2.5 - Ilustração de uma extrusora (fonte: <a href="http://pt.wikipedia.org/wiki/Extrusão">http://pt.wikipedia.org/wiki/Extrusão</a> ). ....	19
Figura 2.6 - Arborescência elétrica, em forma de gravata borboleta, crescendo de um contaminante. Fonte: [10]. ....	21
Figura 2.7 - Arborescência em água em camada de polietileno reticulado de um cabo isolado. Fonte: [10]. ....	22
Figura 2.8 - Combinação de arborescência elétrica e por água. Fonte: [10]. ....	23
Figura 3.1 - Desenho de um espaçador típico com a sequência de fases adotada. ....	25
Figura 3.2 - Modelo do sistema utilizado nos ensaios de multiestressamento. ....	26
Figura 3.3 - Fotografia de ensaio de compatibilidade dielétrica em dois conjuntos. ....	26
Figura 3.4 - Ilustração de como foram realizadas as medições dos diâmetros nos cabos. ....	27
Figura 3.5 - Ilustração de como foram realizadas as medições de isolamento. ....	28
Figura 3.6 - Ilustração de como foram realizados os ensaios de tensão aplicada. ....	29
Figura 4.1 - Dielétrico no sistema cabo/acessório. ....	31
Figura 4.2 - Modelagem de um sistema trifásico cabo/espaçador. ....	33
Figura 4.3 - Detalhe do berço do espaçador ( $\epsilon_{\text{ESPAÇADOR}}=2,3$ ) na fase "b". ....	33
Figura 4.4 - Detalhe do berço do espaçador ( $\epsilon_{\text{ESPAÇADOR}}=3$ ) na fase "b". ....	33
Figura 4.5 - Modelagem de um isolador polimérico utilizado pino polimérico. ....	34
Figura 4.6 - Detalhe do berço de um isolador polimérico com pino polimérico. ....	34
Figura 4.7 - Detalhe do berço de um isolador polimérico com pino metálico. ....	35
Figura 4.8 - Detalhe do berço de um isolador de porcelana com pino metálico. ....	36
Figura 4.9 - Modelagem de um cabo coberto sem a influência de agentes externos. ....	37
Figura 4.10 - Modelagem de um cabo coberto com a influência de uma gota de água. ....	37
Figura 4.11 - Detalhe da modelagem de um cabo coberto com a influência de uma gota de água. ....	37
Figura 4.12 - Fotografia de espaçador incendiado. ....	38
Figura 4.13 - Fotografia de espaçador incendiado. ....	39

Figura 4.14 - Fotografia do berço de um espaçador queimado.....	39
Figura 5.1 -Fotografia que ilustra como foi realizada a medição das correntes de fuga. ....	42
Figura 5.2 - Fotografia que ilustra como foi realizada a medição de corrente de fuga curto-circuitando o espaçador. ....	43
Figura 5.3a – Desenho ilustrando a espessura da cobertura de um cabo sem a presença de semicondutora. Figura 5.3b – Desenho ilustrando a espessura da cobertura de um cabo com a presença de semicondutora.....	44
Figura 5.4 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo sem semicondutora.....	47
Figura 5.5 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo com semicondutora.....	47
Figura 5.6 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo sem semicondutora, com o plano terra a 30 cm da face interior do mesmo. ....	48
Figura 5.7 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo com semicondutora, com o plano terra a 30 cm da face interior do mesmo. ....	48
Figura 5.8 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo com semicondutora e espessura de isolamento de 4 mm.....	49
Figura 6.1 – Modelagem de um cabo coberto com influência de um plano a 200 cm de distância. ....	51
Figura 6.2 – Modelagem de um cabo coberto com influência de um plano terra a 10 cm de distância. ....	52
Figura 6.3 – Modelagem de um cabo coberto com influência de um plano terra a 1 cm de distância.....	52
Figura 6.4 - Gráfico dos impactos do plano de terra na cobertura do cabo.....	53
Figura 6.5 - Impactos do plano de terra nas linhas de campo elétrico. Fonte:[10]. ....	53
Figura 6.6 - Linhas de campo elétrico em um cabo equidistante de 2 metros de qualquer plano de terra. ....	54
Figura 6.7 - Linhas de campo elétrico em um cabo a uma distância de 1 centímetro de um plano aterrado. ....	55
Figura 6.8 - Linhas equipotenciais em um cabo a uma distância de 1 centímetro de um plano aterrado. ....	55
Figura 6.9 - Fotografia da vegetação encostada em uma rede compacta. Fonte:[20]. ....	56
Figura 6.10 - Fotografia de galhos de uma árvore encostados em cabos cobertos. Fonte:[20]. ....	56
Figura 6.11 - Fotografia de um galho encostado na rede compacta. Fonte:[20]. ....	57
Figura 7.1 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo sem semicondutora e concêntrico. ....	59

---

Figura 7.2 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo sem semicondutora e não concêntrico. ....	60
Figura 7.3 - Modelagem apresentando as linhas equipotenciais em um cabo com excentricidade. ....	61
Figura 7.4 - Peça 01 - 15 kV – 50 mm <sup>2</sup> .....	61
Figura 7.5 - Raio-X – Peça 01 .....	61
Figura 7.6 - Peça 02 - 15 kV – 50 mm <sup>2</sup> .....	62
Figura 7.7 - Raio-X – Peça 02 .....	62
Figura 7.8 - Peça 03 - 15 kV - 95 mm <sup>2</sup> .....	62
Figura 7.9 - Raio-X – Peça 03 .....	62
Figura 7.10 - Peça 09 - 15 kV – 50 mm <sup>2</sup> .....	62
Figura 7.11 - Raio-X – Peça 09 .....	62
Figura 7.12 - Peça 26 - 15 kV - 50 mm <sup>2</sup> .....	62
Figura 7.13 - Raio-X – Peça 26 .....	62
Figura 7.14 - Peça 35 - 15 kV - 50 mm <sup>2</sup> .....	63
Figura 7.15 - Raio-X – Peça 35 .....	63
Figura 7.16 - Peça 58 - 25 kV - 95 mm <sup>2</sup> .....	63
Figura 7.17 - Raio-X – Peça 58 .....	63
Figura 7.18 - Peça 60 - 25 kV - 50 mm <sup>2</sup> .....	63
Figura 7.19 - Raio-X – Peça 60 .....	63
Figura 7.20 - Peça 65 - 25 kV - 50 mm <sup>2</sup> .....	64
Figura 7.21 - Raio-X – Peça 65 .....	64
Figura 7.22 - Peça 67 - 25 kV - 50 mm <sup>2</sup> .....	64
Figura 7.23 - Raio-X – Peça 67 .....	64
Figura 7.24 - Peça 68 - 25 kV - 50 mm <sup>2</sup> .....	64
Figura 7.25 - Raio-X – Peça 68 .....	64
Figura 7.26 - Peça 74 - 25 kV - 50 mm <sup>2</sup> .....	64
Figura 7.27 - Raio-X – Peça 74 .....	64
Figura AI.1 - Fotografias de braço tipo L utilizado nas redes compactas. ....	75
Figura AI.2 - Fotografias de braço tipo C utilizado nas redes compactas.....	75
Figura AI.3 - Fotografias de suporte horizontal utilizado nas redes compactas.....	75
Figura AI.4 - Fotografias de estribo para braço tipo L utilizado nas redes compactas. ....	76
Figura AI.5 - Fotografias de suporte Z utilizado nas redes compactas. ....	76
Figura AI.6 - Fotografias de espaçador losangular utilizado nas redes compactas. ....	76

Figura AI.7 - Fotografias de braço anti-balanço utilizado nas redes compactas. ....	77
Figura AI.8 - Fotografias de grampo de ancoragem polimérico utilizado nas redes compactas. ....	77
Figura AI.9 - Fotografias de separador vertical utilizado nas redes compactas.....	77
Figura AI.10 - Fotografias de isolador polimérico tipo pino utilizado nas redes compactas...	78
Figura AI.11 - Fotografias de anel de amarração utilizado nas redes compactas.....	78
Figura AI.12 - Fotografias de isolador de ancoragem polimérico utilizado nas redes compactas.....	78
Figura AI.13 - Fotografias de laço pré-formado para mensageiro utilizado nas redes compactas.....	79
Figura AI.14 - Fotografias de perfil U utilizado nas redes compactas. ....	79
Figura AI.15 - Fotografias de cantoneira auxiliar utilizada nas redes compactas.....	79
Figura AI.16 - Fotografias de cantoneira reta utilizada nas redes compactas. ....	80
Figura AI.17 - Fotografias de conector tipo cunha utilizado nas redes compactas. ....	80
Figura AI.18 - Fotografias luva de emenda e cobertura para emenda utilizadas nas redes compactas.....	80
Figura AA.1 - Representação da estrutura química do polietileno. ....	95
Figura AA.2 - Representação das ramificações na estrutura do polietileno. ....	96
Figura AA.3 – Representação simplificada da configuração enrolada/aleatória. ....	97
Figura AA.4 – Configurações das cadeias. ....	99
Figura AA.5 - Descrição simples de cadeia reticulada. ....	105
Figura AA.6 - Efeitos da reticulação no comprimento da cadeia de polietileno.....	106
Figura AB.1 - Uma subdivisão em elementos finitos típica para um domínio irregular. ....	114
Figura AB.2 - Elemento triangular típico. A numeração dos nós locais 1-2-3 deve ser feito no sentido ant-horário, como indica a seta.....	116
Figura AB.3 - Funções de forma $\alpha_1$ e $\alpha_2$ para um elemento triangular. ....	116
Figura AB.4 - Conexão de três elementos: i-j-k correspondentes à numeração local 1-2-3 do elemento na figura 2.....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Valores dos gradientes de campo elétrico para os três casos de isoladores....	35
Tabela 5.1 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador A, sem chuva.....	44
Tabela 5.2 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador B, sem chuva.....	44
Tabela 5.3 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador C, sem chuva.....	45
Tabela 5.4 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador A, com chuva (750 $\mu$ S).....	45
Tabela 5.5 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador B, com chuva (750 $\mu$ S).....	45
Tabela 5.6 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador C, com chuva (750 $\mu$ S).....	45
Tabela 5.7 - Valores de corrente de fuga encontrados para os cabos com o espaçador curto-circuitado.....	46
Tabela AII.1 - Planilha com os valores lidos dos diâmetros internos e externos.....	85
Tabela AIII.1 - Medição do isolamento de cabos 15 kV.....	89
Tabela AIII.2 - Medição do isolamento de cabos 25 kV.....	89
Tabela AA.1 - Característica de materiais isolantes. Fonte:[10].....	93

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1. HISTÓRIA DAS REDES COMPACTAS NO MUNDO

No ano de 1950, nos Estados Unidos, Bill Hendrix desenvolveu um cabo trifásico não isolado para aplicações aéreas. Hoje ele é normalmente chamado de *Spacer Cable*.

O conceito aplicado no sistema *Spacer Cable* é que o uso de um espaçador de isolamento e um cabo coberto resultaria em uma "partilha" da queda de tensão ao longo dos componentes. Mantendo a proteção mínima, toda a camada de isolamento nos condutores, que não seja necessária, redundava em uma economia de material. O *Spacer Cable* possibilitou a instalação em áreas estreitas tornando o sistema atraente sob o ponto de vista de custo.

A idéia do primeiro sistema *Spacer Cable* foi utilizada em circuitos de distribuição de 5 kV. Os condutores tinham paredes de isolamento finas e eram separados e suportados por espaçadores. Também eram empregados isoladores de porcelana, tipo pino, com topo plano, no sistema. O histórico de operação do sistema, 5 kV (fase a fase), em nível de distribuição, foi excelente.

Com a migração dos circuitos de distribuição, nos EUA, para tensões mais elevadas, tornou-se necessário o desenvolvimento de um sistema para uma classe de tensão maior. Por volta de 1954, o conceito utilizado para as redes compactas de 5 kV foi transferido para o sistema de 15 kV. A única mudança significativa, feita no sistema, foram os componentes. O tamanho dos espaçadores de acrílico e a parede de isolamento dos condutores foram incrementados.

O sistema de 15 kV funcionou. No entanto, a experiência em campo mostrou que os componentes, que trabalhavam bem em 5 kV, já não obtinham o mesmo desempenho no nível de tensão de 15 kV. O aumento dos estresses elétricos, através da cobertura dos condutores e as altas correntes de carregamento associadas a eles, causaram trilhamento na cobertura dos condutores e a erosão dos espaçadores. Isto reduziu a confiabilidade do sistema.

Tornava-se evidente a necessidade do desenvolvimento de novos materiais para melhorar a confiabilidade do sistema de 15 kV. A primeira estratégia voltou-se para melhorar o desempenho dos cabos cobertos. O Polietileno de baixa densidade e de alto peso molecular começou a ser pesquisado para utilização na cobertura, por causa de sua alta rigidez dielétrica e baixa constante dielétrica. Os ensaios revelaram melhoria elétrica e mecânica significativa no sistema e conseqüentemente na sua confiabilidade com o uso de polietileno extrudado na cobertura dos condutores.

Entre 1955 e 1959, outras mudanças foram efetuadas para melhorar a confiabilidade do sistema. Diversos materiais foram investigados e testados para determinar a melhor compatibilidade de espaçadores e isolamento dos cabos. Os espaçadores de acrílico (plexiglass) foram substituídos pelos de polipropileno, por causa da melhoria nas propriedades físicas e elétricas. Eles também foram projetados com uma distância de escoamento maior para controle de descargas. Durante este período, o sistema *spacer* funcionou bem, mesmo sendo suportado por isoladores de porcelana de topo plano.

Em 1960, os sistemas de distribuição expandiram-se e a operação em 25 kV e 35 kV se tornaram mais comuns. A operação nestes níveis de tensão causava problemas de RIV (Radio Interference Voltage). Para contornar este problema, começou-se a utilizar isoladores RF (Radio-Free) para cabos nus. A mudança para isoladores RF no sistema foi lenta, e portanto não ocorreram problemas imediatos com os sistemas suportados pelo novo tipo de isoladores.

Com a aplicação para redes compactas em tensões mais altas, o conceito de projeto de 5 kV e 15 kV e a experiência das operações em campo foram utilizados para produzir o sistema *spacer* 25 kV e 35 kV. A mudança significativa neste projeto foi a mudança da espessura da parede de cobertura do condutor. O espaçador do sistema *spacer* de 35 kV manteve o mesmo espaçamento do requerido no sistema 15 kV.

A boa experiência vivenciada nos sistema 15 kV foi baseada em resultados experimentais que limitavam a máxima corrente de carregamento do condutor. Limitar a corrente de carregamento, para evitar o trilhamento do cabo coberto, funcionou bem com tensões de até 15 kV e em condições atmosféricas medianas.

Porém, em atmosferas contendo poluentes, os componentes do sistema de 15, 25 e 35 kV tiveram problemas. Os espaçadores de polipropileno tornaram-se frágeis e começaram a quebrar, também foi evidente que a distância de escoamento do sistema spacer de 15 kV foi insuficiente para a classe de tensão de 35 kV. À época não existiam espaçadores de polietileno no mercado. A atenção, por conseguinte, foi focada para encontrar um material melhor e a correta distância de escoamento para espaçadores de 35 kV.

Do início para o meio da década de 60, tornaram-se disponíveis comercialmente o polietileno moldável, polietileno resistente a trilhamento e polietileno de alta densidade resistente a trilhamento. Estes materiais têm excelentes propriedades (moldabilidade, resistência a trilhamento, baixa constante dielétrica e melhores características térmicas) e foram aproveitados para facilitar a engenharia dos sistemas spacer cable de 35 kV, melhorando a confiabilidade dos sistemas existentes.

Medições trifásicas das correntes de carregamento no sistema, sob condições de serviço simuladas (névoa salina), mostraram que polietileno resistente a trilhamento, devido às características de espalhamento (gotejamento, derramamento) da água, foi o material com melhor desempenho para espaçadores e cabos.

Os isoladores ainda não estavam envolvidos no estudo. Durante o programa de testes, também foi descoberto que o sistema, quando seco, comporta-se como se não existissem espaçadores, ou seja, eles possuem alta impedância. As correntes de teste agora estavam sendo completamente determinadas pelo espaçamento dos condutores. Assim, no conceito de um sistema *spacer cable*, a distribuição da queda de tensão varia, estando toda no espaçador, quando seco; e, quando molhado, passando a ser quase toda no isolamento do condutor.

Durante este período, os isoladores mais comuns em uso para distribuição de energia em 35 kV eram de porcelana tipo pilar sólido. Em retrospecto, agora é sabido que o isolador tipo pilar foi mais compatível com o sistema spacer que o isolador de porcelana tipo pino, devido a sua baixa capacitância. Esta é a razão pela qual não ocorreram problemas imediatos com os novos materiais resistentes a trilhamento.

No final da década de 60, começaram a surgir problemas nos sistemas de 15 e 35 kV, tais como, erosões devido ao alto RIV, rachaduras e falhas dielétricas (furos) na cobertura dos condutores próximos aos isoladores. À medida que novos materiais, compatíveis e com baixa constante dielétrica, eram utilizados, a confiabilidade do sistema spacer cable foi consistentemente melhorada.

Foi percebido que a maioria das falhas envolvia os isoladores. As falhas em isoladores levaram um longo período de tempo para aparecer. A experiência de muitos circuitos levou a reconhecer que se tratava de uma falha comum. O que acelerou a tendência de falha do sistema 15 kV, foi a mudança de isoladores tipo pino com topo plano para isoladores tipo pino RF, e no caso dos sistemas 35 kV, a mudança do isolador de porcelana tipo pilar sólido para o isolador mono-corpo tipo pino classe 55-6.

Existia uma necessidade técnica de desenvolver um isolador compatível para melhorar a confiabilidade do sistema spacer cable. A experiência do polietileno para cabos e espaçadores foi tão bem sucedida, que se tornou óbvio recorrer ao uso do mesmo material para o desenvolvimento de um isolador adequado. Num primeiro momento, um isolador pilar foi tentado, mas surgiram problemas de manufatura. A engenharia focou sua atenção para desenvolver um isolador tipo pino. No final dos anos 60, um isolador de polietileno foi desenvolvido. Dos estudos de fuga nos cabos cobertos com os mais diversos isoladores de suporte, concluiu-se que o isolador mais capacitado para obtenção da confiabilidade do sistema foi o isolador de polietileno.

## 1.2. HISTÓRIA DAS REDES COMPACTAS NO BRASIL

No Brasil, as primeiras experiências com cabos cobertos em redes aéreas, foram efetuadas, no final da década de 80, pelas concessionárias CEMIG, COPEL e Eletropaulo na tensão 13,8 kV [20].

À época foram apenas substituídos os cabos de alumínio nus por outro cabos do mesmo material, porém recobertos com polietileno, mantendo-se a topologia convencional de cruzetas e de isoladores de porcelana tipo pino. O objetivo era

testar em campo a eficiência do cabo coberto frente a contatos ocasionais de galhos de árvores durante chuva e vento [20].

Hoje, as redes são largamente utilizadas pelas distribuidoras de energia elétrica, com vistas à obtenção de maior confiabilidade do sistema. Entretanto, existem registros de falhas nas redes compactas, atingindo inclusive algumas das redes que estão com pouco tempo de instalação. Em muitas das falhas da rede compacta, há um longo período para o restabelecimento do serviço, pois é necessária a troca dos lances de cabos e acessórios danificados.

### 1.3. CONCEITOS INTRODUTÓRIOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM REDES COMPACTAS

**Cabo Coberto [4]:** Cabo dotado de cobertura protetora extrudada de material polimérico, visando à redução da corrente de fuga em caso de contato acidental do cabo com objetos aterrados e a diminuição do espaçamento entre fases.

**Cobertura de emenda para cabo coberto [8]:** Acessório de material polimérico utilizado sobre emendas para a reconstituição das características do cabo coberto.

**Espaçador [5]:** Acessório, de material polimérico, de formato losangular, cuja função é a sustentação e a separação dos cabos cobertos na rede compacta ao longo do vão, mantendo o nível de isolamento elétrica da mesma.

**Separador [5]:** Acessório, de material polimérico, de formato vertical, cuja função é a sustentação e a separação dos cabos cobertos na rede compacta, em situações de conexão entre fases (flying-tap), mantendo o nível de isolamento elétrica da rede.

**Berço [5]:** Nome dado às partes dos espaçadores e dos separadores cuja função é a acomodação e sustentação dos condutores fase e mensageiro.

**Anel de amarração para espaçador e separador [5]:** Acessório utilizado para fixação do condutor, fase e mensageiro, no espaçador ou no separador.

**Isolador tipo pino polimérico [6]:** Isolador convencional, dotado de orifício roscado ou provido de pino, constituído por um único corpo isolante, que, para a fixação dos cabos cobertos, requer o uso de amarrações externas.

**Isolador composto polimérico [7]:** Isolador constituído de, pelo menos, dois materiais isolantes, quais sejam, um núcleo e um revestimento polimérico e equipado com engates metálicos.

**Saia do isolador [6]:** Parte externa em projeção do isolador destinada a aumentar a distância de escoamento.

**Anel de amarração para isolador tipo pino [8]:** Acessório de material polimérico utilizado para a fixação do condutor fase no isolador tipo pino.

**Braço antibalanço [8]:** Acessório de material polimérico cuja função é a redução da vibração mecânica das redes compactas.

**Laço plástico pré-formado para amarração [5]:** Acessório utilizado para fixação do condutor fase no espaçador ou no separador.

**Laço pré-formado para mensageiro [5]:** Acessório utilizado para fixação do mensageiro no espaçador ou no separador.

**Alça pré-formada para cabo coberto [8]:** Acessório metálico para ancoragem do cabo coberto em fim de linha, derivações e ângulos.

**Rigidez dielétrica:** Rigidez dielétrica é definida como o limite de tensão a que um material dielétrico pode suportar mantendo a sua integridade.

**Trilhamento elétrico [5]:** Degradação irreversível dos cabos ou acessórios poliméricos provocada pela formação de caminhos que se iniciam e se desenvolvem na superfície de um material isolante, sendo propício a conduzir corrente elétrica por esses caminhos, mesmo quando secos.

**Erosão [5]:** Degradação irreversível e não condutiva de cabos ou acessórios que ocorre por perda de material. Pode ser uniforme, localizada ou ramificada.

**Arvorejamento [7]:** Degradação irreversível do polímero provocada pela formação de microcanais dentro do material. Podem ser condutivos, ou não, e se estendem progressivamente pelo material, até que ocorra a falha elétrica. Também pode ser encontrado como “Arborescência” ou “Treeing” na literatura.

**Fissura [5]:** Microfratura superficial de profundidade entre 0,001 a 0,1 mm.

**Rachadura (Cracking) [5]:** Fratura superficial de profundidade superior a 0,1 mm.

**Abrasão:** É a perda de material pela passagem de partículas rígidas sobre uma superfície, desgaste por atrito.

**Resistência à abrasão:** Habilidade de resistir ao desgaste da superfície.

**Constante dielétrica:** É a capacitância de um dielétrico em comparação com a do vácuo, onde ambos os capacitores possuem a mesma geometria.

**Extrusão:** É um nome dado ao processo de produção de componentes mecânicos, onde o material é forçado através de uma matriz, passando a ter a forma predeterminada pelo projetista.

No ANEXO I encontram-se diversas fotografias e ilustrações de muitos dos equipamentos citados acima.



## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. DIELÉTRICOS

Os dielétricos ou os materiais isolantes se caracterizam pela expressiva capacidade de resistir à passagem de corrente elétrica, evidenciando-se ainda mais quando se confronta o valor desta resistividade com o que é inerente aos materiais condutores [12].

#### 2.1.1. Polarização dos Dielétricos

Quando um material dielétrico é submetido à influência de um campo elétrico, haverá uma tendência dos átomos e das moléculas polarizarem-se. Uma forma de exemplificar este efeito seria inserindo um dielétrico entre as placas de um capacitor de placas paralelas, consoante demonstrado na Figura 2.1. Os momentos dipolos induzidos apontam no mesmo sentido que o campo elétrico  $E$ . No interior do dielétrico, cada carga positiva de um momento dipolo será anulada pela negativa do anterior, razão pela qual a carga no interior do dielétrico é nula, embora se consigne que, nas faces superiores e inferiores, o dielétrico possui as cargas positiva e negativa respectivamente.

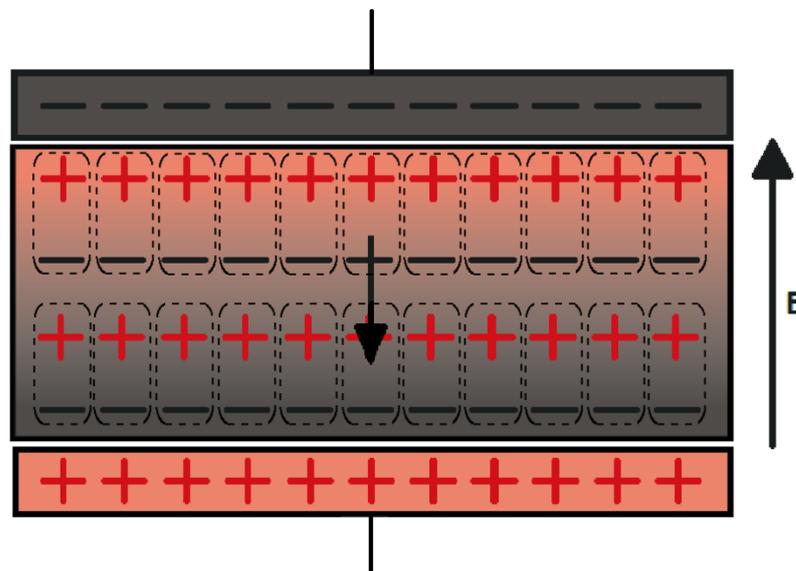


Figura 2.1 - Cargas distribuídas em um dielétrico polarizado.

A polarização pode ser entendida como a densidade superficial de cargas de um dielétrico sob a influência de um campo elétrico. Ela é também conhecida como o momento de dipolo elétrico por unidade de volume.

### 2.1.2. Constante Dielétrica ou Permissividade Relativa

É definida como a razão entre a permissividade do dielétrico e a do espaço livre [11].

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

Para o espaço livre e materiais não dielétricos, tais como, os metais,  $\epsilon_r=1$ .

As menores constantes dielétricas são encontradas em dielétricos sólidos, que se constituem de moléculas não-polares, e apresentam uma polarização eletrônica pura. A temperatura influi sobre o valor de  $\epsilon$ , devido à variação com a temperatura do número de moléculas por unidade de volume [12].

### 2.1.3. Rigidez Dielétrica

A rigidez dielétrica de um isolante pode ser definida como o limite de gradiente de tensão ao qual um material pode suportar por um longo período de tempo sem que ocorram descargas disruptivas que provoquem uma erosão irreversível nos dielétricos sólidos.

A rigidez dielétrica, no Brasil, é normalmente expressa em quilovolts por milímetro (kV/mm), mas também pode ser encontrada em volts por milésimo de polegada (V/mil). Um dos motivos pelos quais se opta pelo polietileno, como material isolante nos cabos e acessórios das redes compactas, refere-se a sua baixa constante dielétrica e a sua alta rigidez dielétrica.

A rigidez dielétrica nos sólidos, em condições normais, é maior do que nos líquidos. Isto ocorre devido à pequena distância interatômica que implica em um

campo elétrico maior a fim de que os elétrons livres venham a ter energia suficiente e produzam a ionização por colisão.

A ruptura da rigidez dielétrica em um material dielétrico sólido ocorre em virtude da combinação de três processos, quais sejam, a ruptura elétrica (ionização por colisão ocasionando a quebra das ligações do dielétrico), a ruptura térmica (quando o calor produzido pelo dielétrico não é totalmente absorvido pelo ambiente) e a ruptura por ionização induzida (produzida por descargas parciais no dielétrico).

#### 2.1.4. Resistência de Isolamento

Quando dois condutores são separados por um material isolante, em virtude da aplicação de uma diferença de potencial entre ambos, eles correspondem a circulação de uma corrente de fuga. A resistência elétrica oferecida à circulação da corrente é a resistência do isolamento [10].

A depender do caminho por onde circulará a corrente, a resistência de isolamento pode ser dividida em dois tipos: a volumétrica, para o caso em que a corrente de fuga flui através do isolamento; e a superficial, na hipótese em que a corrente de fuga circula sobre a superfície do dielétrico.

A resistência superficial é medida em Megohms entre dois lados opostos de um quadrado de um centímetro de lado, situado na superfície do isolante, enquanto que a volumétrica será medida entre as duas faces de um cubo de um centímetro de aresta.

O coeficiente de temperatura para os isolantes é negativo, pois geralmente a resistividade diminui com o aumento de temperatura.

#### 2.1.5. Resistividade Superficial [12]

A condutividade superficial é acentuadamente uma função das condições do ambiente em que o isolante se encontra. Entre tais condições, aparece, com destaque, a influência da água, quando decorre da chuva, do orvalho ou da

condensação, e que reduz a resistividade do isolante e, por conseguinte, a chamada resistência superficial de descarga. Como consequência, os corpos isolantes são frequentemente projetados com perfis que assegurem certa proteção contra deposições dessa natureza, bem como os ensaios, para a determinação da capacidade isolante de certos elementos, é feita a seco e sob chuva. A umidade relativa começa a ter uma influência sensível, quando seu valor ultrapassa os 50%.

#### 2.1.6. Perdas Dielétricas

Os dielétricos (especialmente sólidos) sujeitos às diferenças de potencial alternativas apresentam perdas internas que têm por consequências o seu aquecimento. Estas perdas, muito maiores que as correspondentes ao efeito Joule ( $I^2R$ , para a resistência de isolamento  $R$ ), denominam-se perdas dielétricas. Aumentam com a diferença de potencial, a temperatura, a frequência, o teor de umidade e as impurezas do isolante [10].

#### 2.1.7. O Comportamento Higroscópico e a Absorção de Água [12]

Apesar de numerosos dielétricos sofrerem pouco, ou aparentemente quase nada, com a presença de água ou da umidade, não é exagero dizer que todos os isolantes apresentam um certo grau de higroscopia. O conhecimento exato do grau de absorção de água é de extrema importância, uma vez que daí resultará uma sensível perda das propriedades isolantes do material, a menos que sejam tomadas certas precauções visando a sua eliminação e à proteção posterior do dielétrico através de impregnação ou de coberturas apropriadas.

O grau de absorção de umidade é variável em função do material e do tempo de exposição do isolamento à mesma, saturando-se após um certo intervalo de tempo, como se pode notar na Figura 2.2. O processo inverso, ou seja, a secagem do corpo, tem um comportamento semelhante. Tanto a umidificação, quanto a secagem, são referidas a 20 °C. Essa umidade pode estar presente no ar ou no ambiente em que o dielétrico é usado.

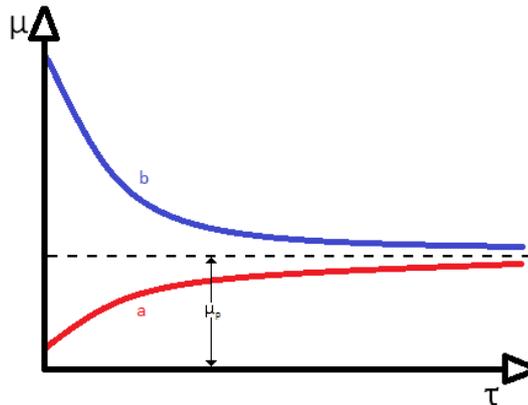


Figura 2.2 - Variação, em função do tempo, do conteúdo de umidade  $\mu$  de um corpo de prova nas fases de absorção de umidade (a) e secagem (b).

A umidade presente em um corpo é acentuadamente dependente da temperatura. Elevando-se a temperatura, diminui-se o valor de  $\mu_p$  de equilíbrio da umidade, se mantida constante a umidade. Daí resulta que o processo de secagem é influenciado pela umidade presente, pela ventilação ou troca de ar, e pela temperatura.

Define-se a higroscopia de um material como a umidade de equilíbrio do mesmo em contato com o ar a 20 °C e 100% de umidade relativa. Praticamente, a higroscopia é determinada, partindo-se de um corpo seco e o expondo, até o seu equilíbrio, a 20 °C e 100% de umidade relativa. Em termos práticos, essa exposição não ultrapassa 24 horas.

Ao lado da constituição química da molécula do isolante, a estrutura do material também tem ponderável influência sobre a higroscopia e a capacidade de absorção da água. A existência de capilaridade do material e suas dimensões geométricas têm interferência preponderante sobre a penetração de água.

Os materiais com grande porosidade, sobretudo os do tipo fibroso, são bem mais higroscópicos do que os outros mais compactos. Por exemplo, aqueles que são praticamente compactos, como os vidros, apresentam porosidade apenas superficial, devido a uma decomposição parcial de sua superfície externa, não influenciando assim, na rigidez dielétrica, mas apenas na resistência ou na resistividade superficial  $\rho_s$ .

Na comparação da higroscopia e da capacidade de absorção de água, deve-se observar que os números que expressam a capacidade dos materiais, quanto à

capacidade de absorver umidade, não indicam, porém, claramente, o grau de alteração que o material sofreu devido à presença de água ou de umidade. Desta forma, se parte dessa água, mesmo que pequena, puder penetrar profundamente no material, deve ser observado que pequenas quantidades de água levam a grandes alterações de características.

Para exemplificar tal situação, é citado o caso em que se utilizam de duas quantidades iguais, sendo uma de papel e a outra de borracha.. O papel, quando seco, apresenta valores de resistividade da ordem de  $10^{17} \Omega\text{cm}$ . Uma absorção de 3% de umidade faz cair o valor de resistividade a  $10^{11} \Omega\text{cm}$ . Já a borracha, com um valor de  $\rho=14 \times 10^{14} \Omega\text{cm}$ , perante 4,3% de umidade, passa a ter  $13 \times 10^{14} \Omega\text{cm}$ . No caso da borracha, portanto, a umidade não penetra profundamente, ficando retida superficialmente.

#### 2.1.8. Capacidade de Dispersão da Umidade

É de grande significância a capacidade de um certo volume de água se dispersar num material. Ela é praticamente igual a zero em vidros e cerâmicas queimadas, ocorrendo o contrário em materiais porosos e fibrosos de elevada capilaridade. Além de uma dispersão em termos moleculares, devido às características próprias da estrutura, devem ser observadas eventuais fissuras ou buracos apresentados pelo material, durante o seu uso, que também podem levar a uma dispersão de umidade [12].

As características de dispersão de água devem ser consideradas no momento da escolha de um material, a depender de seu uso ser interno ou externo. A escolha do material, considerando tais características, irá impactar diretamente no seu desempenho em aplicações práticas.

## 2.2. REDE COMPACTA

A rede compacta é composta de três cabos cobertos (protegidos). A camada isolante, dos cabos, é constituída de materiais poliméricos. Os cabos são apoiados

em isoladores, espaçadores losangulares ou separadores poliméricos, por meio de um cabo mensageiro (cabo de aço), com boa condutividade e boa resistência mecânica. O mensageiro tem a função de apoiar o sistema, conferindo-lhe sustentação mecânica e também atua como o neutro e blindagem estática do sistema.

As redes compactas têm sido muito incentivadas no Brasil, supondo-se o aumento do índice de confiabilidade, levando-se em conta a grande redução das interrupções no fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias. Entre outras vantagens, ressalta-se também a diminuição dos impactos ambientais, se confrontadas com as redes convencionais, citando-se, por exemplo, a necessidade de uma menor área de poda de árvore para a passagem dos cabos, conforme a Figura 2.3. Outro ponto interessante é que a utilização da rede protegida possibilita a passagem de um número maior de circuitos em uma mesma posteação aproveitando o mesmo corredor de passagem.

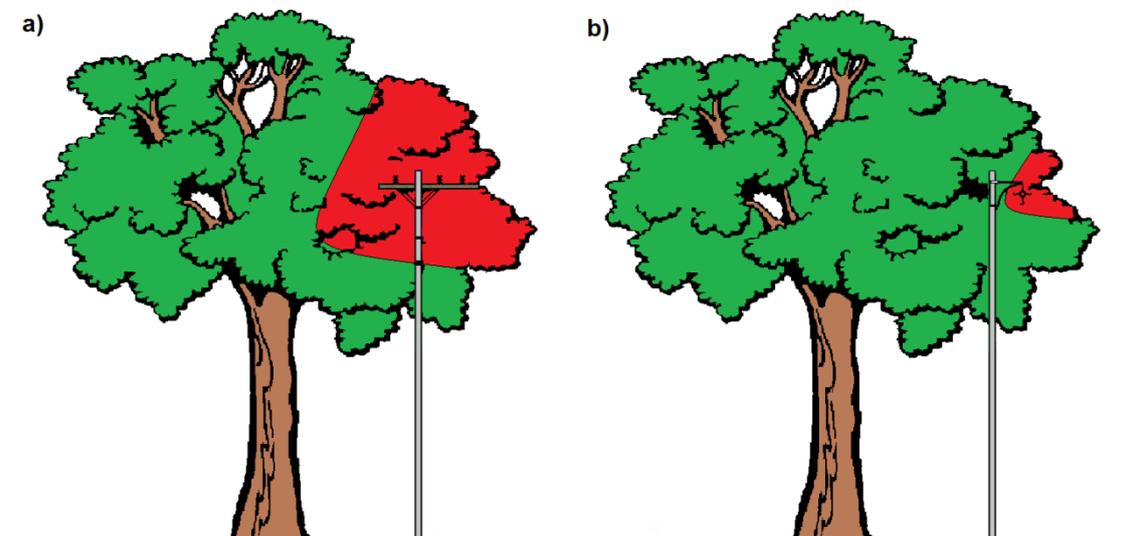


Figura 2.3 - a) Ilustração da poda de uma árvore atravessada por uma rede convencional. b) Ilustração da poda de uma árvore atravessada por uma rede compacta.

### 2.2.1. Cabo Coberto

O cabo coberto é um termo atribuído ao condutor coberto por camada isolante, mas que não pode ser considerado como cabo isolado, visto que ele não possui uma blindagem metálica e conseqüentemente o campo elétrico não fica

confinado no interior da sua cobertura, tendo valor não nulo na sua superfície. Assim, os cabos cobertos são reputados como protegidos, e não isolados.

Em resumo, esta proteção adicional dos condutores possibilita que os cabos operem mais próximos de objetos aterrados (galhos de árvores, construções, etc.), bem como reduz a distância entre as fases do sistema, exigindo menor faixa de passagem, sendo, por isto, muito aceito para sistemas de distribuição urbanos.

Devido ao fato dos cabos não serem isolados, eles podem operar próximos, mas não encostados a tais objetos aterrados, pois o seu isolamento reduz as correntes de falta, impedindo que a proteção atue. Este fato melhora os índices das distribuidoras de energia. No entanto a falta existe e comporta-se como uma falta de alta impedância. Em outra análise, considerando os gradientes de campo elétrico, também se evidencia que o contato com objetos aterrados pode vir a danificar o material devido a os altos níveis de estresse elétrico impostos.

No mercado, ele pode ser encontrado com 1, 2 ou 3 camadas poliméricas sobre o condutor. A Figura 2.4 a seguir ilustra como estão posicionadas as camadas sobre o condutor. Todas elas são adicionadas ao condutor por processo de extrusão, e devem ser extrusadas simultaneamente para que sejam evitadas as falhas entre as camadas. O processo de extrusão será detalhado em um item específico a seguir.



Figura 2.4 - Desenho de cabo coberto.

#### 2.2.1.1. Camada semicondutora

Quando um condutor desencapado no ar é energizado, o campo elétrico emana linhas a partir da superfície do condutor que terminam no chão. Se o condutor é redondo e liso e a distância para o plano de apoio é proporcionalmente

grande, as tensões elétricas em sua superfície são uniformemente distribuídas. No entanto, se há uma rebarba cortante ou defeito na superfície do condutor, o campo elétrico será concentrado na rebarba, e o ar isolante será altamente estressado nesta área. Quando a tensão sobre o condutor aumenta, chega a um nível em que o ar não mais suporta o estresse elétrico e ocorre uma ruptura, fazendo com que o ar ionize-se nas imediações do condutor, gerando um brilho de luz em torno dele. Esta condição é chamada corona. [31]

Os condutores flexíveis automaticamente apresentam uma superfície irregular, com pontos altos e baixos, que vão concentrar os gradientes de campo elétrico. Embora essas concentrações de tensão, geralmente, não sejam tão ruins quanto uma rebarba afiada, são certamente mais críticas do que em uma superfície lisa de um condutor de seção circular [31].

Quando o ar de isolamento em torno do condutor é substituído por um material isolante melhor, tal como, o polietileno, a concentração de tensões elétricas e corona se tornam muito mais importantes. Ao contrário do ar, materiais sólidos, como o polietileno, não são livres para se moverem e se regenerarem. Assim, qualquer descarga nos materiais da superfície do condutor pode danificá-los, alastrando-se através de toda a parede, chegando a causar uma falta para a terra e queimar o isolante do condutor [31].

A camada semicondutora uniformiza os gradientes de campo elétrico nas proximidades dos tentos do condutor. Ela é concebida de um polímero ao que se adiciona uma quantidade suficiente de negro de carbono, transformando-o de isolante para semi-condutor. Na normatização brasileira vigente, ela é item obrigatório, apenas, para classes de tensão de 34,5 kV ou superiores. O cliente pode solicitar ao fabricante que acrescente esta camada aos cabos de 15 ou 25 kV, caso seja de seu interesse. Maiores detalhes sobre esta camada podem ser vistos no Capítulo 5.

Para a verificação dos benefícios de uma blindagem semicondutora, a Hendrix produziu 100 amostras idênticas, sendo 50 com blindagens e as outras 50 desprovidas delas. Foi aplicada uma tensão alternada, onde foi aumentado o valor da tensão até ocorrer a ruptura do isolamento. Após calcular a média dos valores de

tensão de ruptura, foi verificado que os cabos com blindagem romperam com a tensão aproximadamente 41% superior [31].

#### 2.2.1.2. Camada intermediária

Para o caso de cabos com três camadas, a intermediária é a que geralmente tem suas propriedades de isolamento elétrico maximizadas. Na sua composição, não existe a presença de aditivos para proteção à abrasão e aos raios ultravioletas.

#### 2.2.1.3. Camada superficial

A camada mais superficial, por estar em contato com elementos abrasivos e deteriorantes, necessita de aditivos a fim de maximizar a resistência à abrasão, aos raios ultravioletas, aos cortes e aos impactos. O polietileno puro tem a perda de suas propriedades na presença de raios ultravioleta, bem como, não é resistente à abrasão e a cortes. A inserção de tais aditivos demanda extrema atenção, pois à medida que eles são adicionados o polietileno tem perdas na sua resistência a trilhamento elétrico. Há portanto, a necessidade de se ter um balanço entre as propriedades de resistência ao trilhamento elétrico e as de proteção aos raios ultravioleta ou aos elementos abrasivos. O negro de fumo é um dos aditivos utilizados para tal função, existindo também outras cargas minerais que são igualmente empregadas.

Na hipótese do cabo dispor de uma camada única, devem ser reunidas, na cobertura, as propriedades de isolamento e as de abrasão/Raios UV. Logo, o desempenho do cabo deverá ser inferior ao de um que possua dupla camada, visto que, neste último, as propriedades são atribuídas às regiões que são necessárias, não implicando prejuízo para as demais. O conceito é simples, pois a camada interna é utilizada para maximizar as propriedades elétricas desejáveis, enquanto a camada externa, também isolante, é selecionada para maximizar a resistência do cabo a intempéries (luz solar, etc.).

Um dos questionamentos é, se a camada externa tem todas estas propriedades desejáveis e é isolante, por que não fazer toda a cobertura material? Há três razões: Primeiro, a camada interna é selecionada para fornecer o máximo de propriedades elétricas. Segundo, a camada interna selecionada é um pouco mais suave e oferece maior facilidade para desencapar e, em cabos de menores tamanhos, possui mais flexibilidade do que o material da camada externa. Finalmente, os materiais podem ter ocasionais micro-furos que possam comprometer a integridade dielétrica do revestimento dos cabos. Testes rigorosos podem localizar quase todos os micro-furos “pinholes”, e eles podem ser removidos. No entanto, há sempre uma preocupação de que um furo possa passar pelo ensaio sem ser detectado. Com extrusão do revestimento em duas camadas, a possibilidade de dois furos no mesmo local é praticamente inexistente [30].

### 2.2.2. Extrusão

O processo de extrusão se dá pela produção de elementos mecânicos, a partir de um material que é forçado através de uma matriz, adquirindo, por conseguinte, a forma desejada pelo operador da extrusora.

Na extrusão de polímeros em cabos, o processo converte o material isolante, geralmente na forma de grânulo (pellets), em uma camada isolante sobre os condutores. Neste processo é necessária a utilização de um cabeçote próprio. Na Figura 2.5, é mostrado o desenho básico de uma extrusora.

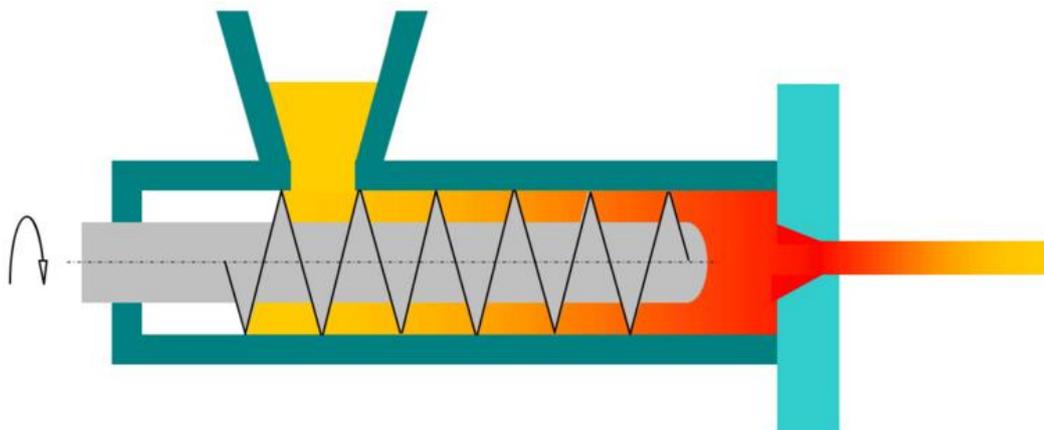


Figura 2.5 - Ilustração de uma extrusora (fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Extrusão>).

A extrusora possui um cilindro aquecido (extrusão a quente) e uma rosca que o circunda. A alimentação da matéria prima ocorre através de um funil alimentador situado em sua parte anterior. A matéria prima é transportada devido ao movimento de rotação da rosca. O material é fundido gradativamente por meio do contato com o cilindro aquecido e pelo calor produzido pelo cisalhamento da massa entre a rosca e o cilindro. A rosca, ao girar, comprime o material através de uma matriz, que, por último, molda o material fundido para que ele adquira sua forma final.

### 2.2.3. Trilhamento Elétrico

Em virtude do cabo possuir campo elétrico não nulo em sua superfície, podem também surgir correntes elétricas que fluem sobre a mesma. Devido à presença de oxidação, de umidade e de poluentes na superfície dos cabos/acessórios, a resistência superficial nos mesmos é reduzida, facilitando a condução de correntes. A corrente leva ao aquecimento do local (caminho) por onde passa, formando as chamadas bandas secas, que são bem propícias à descargas parciais.

Quando o material polimérico é exposto a repetidos ciclos deste fenômeno, o número de arcos no local tende a aumentar, carbonizando e/ou erodindo o material polimérico. A carbonização dos locais por onde passa a corrente, é acompanhada de cintilações, com produções de trilhas, que são condutivas, e geram um caminho facilitador para a circulação da corrente elétrica.

Os materiais poliméricos possuem elevada resistência ao trilhamento elétrico, no entanto não a detêm em relação à abrasão e a intempéries (raios ultravioleta, etc.). Por conseguinte, são adicionados a sua composição os elementos que os fazem mais resistentes aos raios ultravioleta. Porém, a adição de negro de carbono (aditivo tipicamente utilizado para tal função) reduz a resistência ao trilhamento elétrico, exigindo-se que se obtenha um ponto ótimo de balanço entre estas propriedades.

### 2.2.4. Arborescência

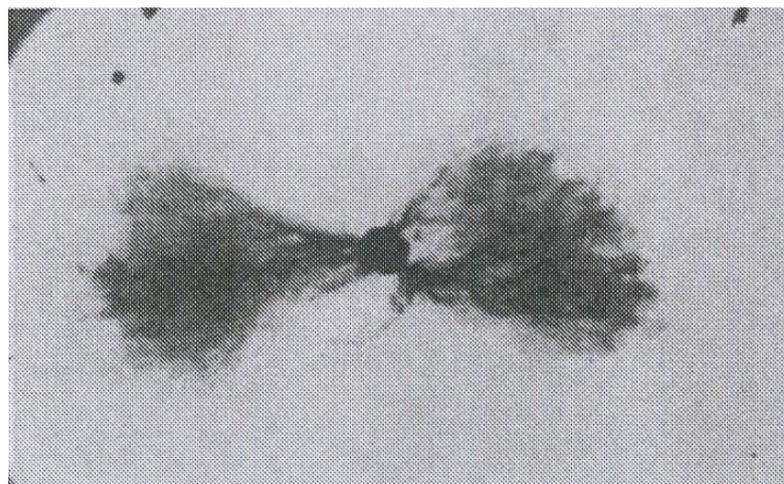
A arborescência, na isolação dielétrica de cabos extrudados, é o termo que tem sido designado para um tipo de deterioração/pré-colapso elétrico que tem em

geral a aparência de galhos de uma árvore formados através da parede do isolamento. Esta formação é radial ao eixo de cabo e, portanto, está em linha com o campo elétrico. Podem ser considerados dois diferentes tipos deste fenômeno nos cabos: a arborescência elétrica e a arborescência em água [10].

#### 2.2.4.1. Arborescência elétrica

Arborescência elétrica, em materiais dielétricos extrudado em cabos, é o resultado de descargas elétricas internas que decompõem os materiais orgânicos. Não há a necessidade de umidade para a ocorrência do processo. São necessárias sobretensões e podem ocorrer devido a imperfeições na estrutura que causam um alto estresse elétrico localizado [10]. Seu processo de desenvolvimento é rápido, podendo durar de minutos a horas o seu crescimento.

Existem muitas explicações para o surgimento de arborescência elétrica, porém todas elas estão associadas a altos níveis de estresse de tensão. Algumas das possibilidades são: zonas quentes e decomposição térmica, dano mecânico devido ao alto estresse elétrico, trinca por fadiga de mudanças de polaridade, pequenos vazios, inclusão de ar em torno de contaminantes, injeção eletrônica, etc. Na Figura 2.6 a seguir é exibido um exemplo de arborescência elétrica.



**Figura 2.6 - Arborescência elétrica, em forma de gravata borboleta, crescendo de um contaminante.**  
Fonte: [10].

#### 2.2.4.2. Arborescência em água

Arborescência em água (também chamada de eletroquímica ou química) é formada lentamente, podendo levar vários anos para se propagar e crescer. Tal fenômeno pode ocorrer em todos os materiais dielétricos sólidos (extrudados). A aparência de árvore pode ser descrita por referência a muitas formas naturais que, às vezes, são óbvias nos cortes de cabos envelhecidos [10].

O fenômeno é geralmente influenciado pelos seguintes fatores: a umidade (essencial para ocorrer), o estresse de tensão, presença de vazios, contaminantes, impurezas iônicas, temperatura, gradiente de temperatura, tempo de envelhecimento e pH.

A visibilidade das arborescências de água provém da coloração do interior da parede isolante por alguns elementos químicos colorantes. Algumas não coloradas desaparecem quando a amostra é seca. Um exemplo de arborescência em água pode ser visualizado na Figura 2.7.

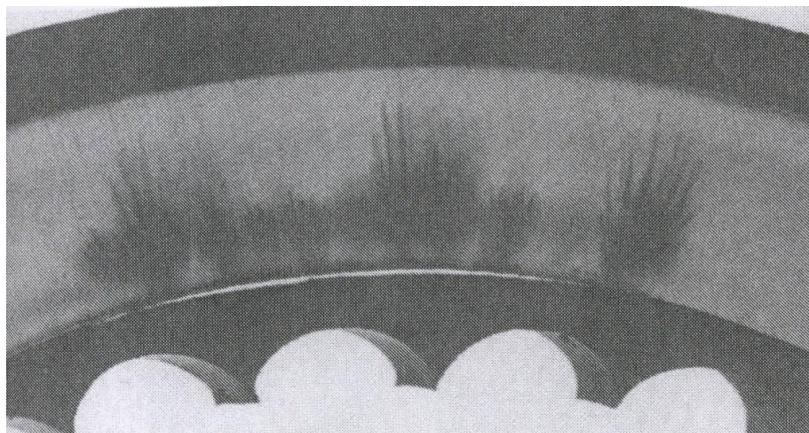
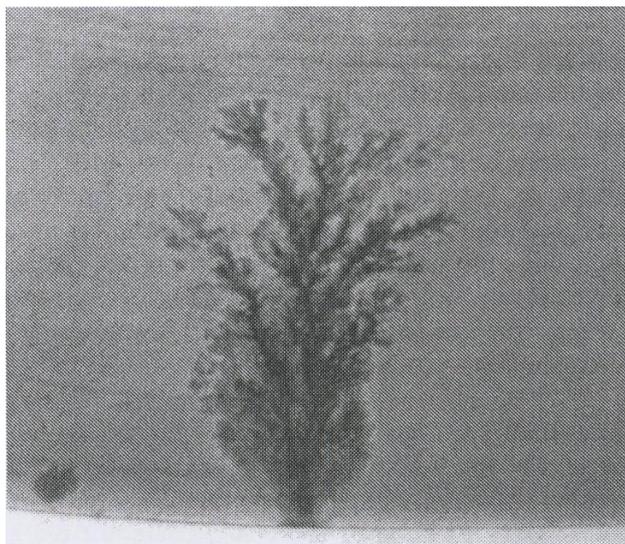


Figura 2.7 - Arborescência em água em camada de polietileno reticulado de um cabo isolado. Fonte: [10].

#### 2.2.4.3. Combinação de arborescência em água com elétrica

Em 1979, John Densley descreveu em um artigo, que, sob certas condições a combinação de arborescência eletroquímica e elétrica pode ocorrer. Estas hipóteses, geralmente surgem como uma arborescência em água com pequenas seções escuras que são arborescências elétricas nos galhos (ramos). A situação combinada de arborescências pode ser vista na Figura 2.8 [10].



**Figura 2.8 - Combinação de arborescência elétrica e por água. Fonte: [10].**



## CAPÍTULO 3 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Com este trabalho, pretende-se discutir e apresentar alguns dos prováveis fatores que vêm provocando o elevado índice de falhas nas redes compactas, bem como levantar as possíveis alternativas (ou soluções) visando a sua eliminação. Nesta direção, foram produzidos ensaios e modelagens, focando prioritariamente tais problemas, com vistas à obtenção de um entendimento mais amplo dos fenômenos que afetam os cabos e acessórios.

Durante todo o trabalho, foi adotada a sequência de fases, conforme exposto na Figura 3.1.

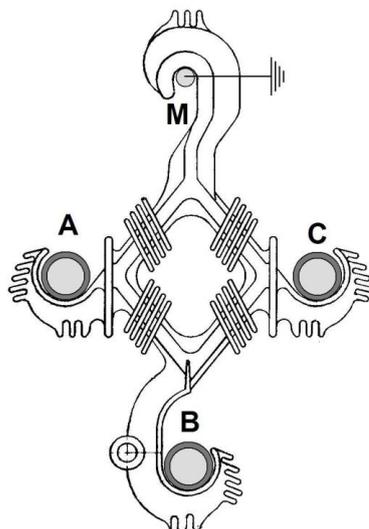


Figura 3.1 - Desenho de um espaçador típico com a sequência de fases adotada.

### 3.1. ENSAIOS REALIZADOS DURANTE O TRABALHO

Ao longo deste trabalho, foram executados ensaios de compatibilidade dielétrica (multiestressamento), medições de corrente de fuga, medições dos diâmetros dos cabos, radiografias digitais, análise qualitativa/quantitativa de negro de fumo e de cargas minerais, medição do isolamento dos cabos e ensaios de tensão aplicada. Todos estes recursos foram imprescindíveis à consecução de uma maior clareza a respeito dos problemas que atingem as redes compactas em campo, bem como em ensaios de laboratório.

### 3.1.1. Ensaios de Compatibilidade Dielétrica

Os ensaios de compatibilidade dielétrica apresentam um resultado conclusivo quando um conjunto (cabo+acessórios) puder operar sem que possam aparecer problemas da incompatibilidade dielétrica. Os ensaios foram realizados de acordo com [5], onde os cabos foram aquecidos a 60 °C por indução de corrente, e foi aplicada uma tensão monofásica de  $2U_0$ . O circuito foi montado de acordo com o esquema mostrado na Figura 3.2 a seguir.

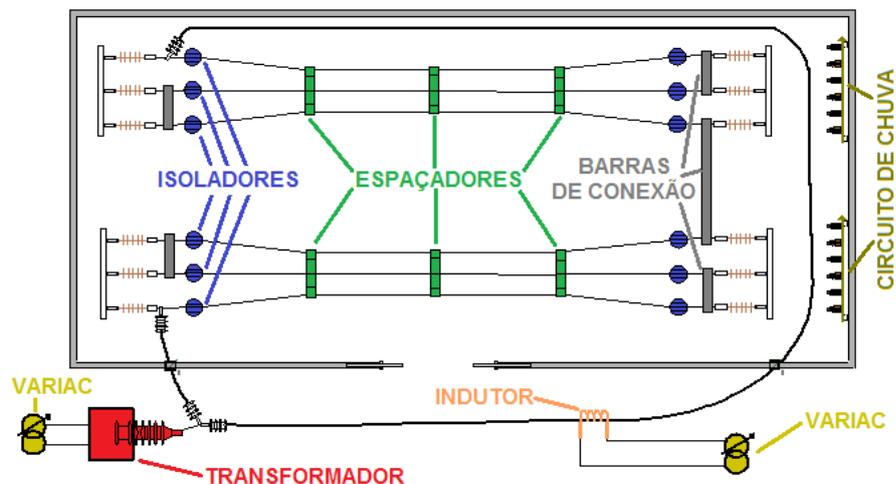


Figura 3.2 - Modelo do sistema utilizado nos ensaios de multiestressamento.

Inicialmente, 40 conjuntos de cabos e espaçadores foram submetidos a ensaio. Nesta fase limiar, os isoladores foram descartados das análises. Na Figura 3.3, é apresentada uma fotografia de um ensaio de compatibilidade dielétrica, produzido no laboratório, em que são testados simultaneamente dois conjuntos cabo/espaçador.



Figura 3.3 - Fotografia de ensaio de compatibilidade dielétrica em dois conjuntos.

### 3.1.2. Medições de Corrente de Fuga

Apesar deste ensaio não ser normalizado no Brasil, realizaram-se as medições de corrente de fuga. Durante os ensaios, foi mantido o cabo guarda como neutro, energizando-se as fases a, b, c, a+b, a+c, b+c, a+b+c, respectivamente. As fases não energizadas foram mantidas flutuando e a corrente foi medida no neutro do espaçador com o auxílio de um alicate microamperímetro.

As medições foram realizadas inicialmente com o sistema a seco e, em seguida, com a aplicação de chuva artificial, sendo que, nestas condições, as mensurações foram efetuadas com a condutividade da água ajustada nos valores de 70, 250, 500 e 750  $\mu\text{S}$ . Ao término, também foram realizadas medições curto-circuitando a isolação do espaçador losangular.

### 3.1.3. Medição dos Diâmetros dos Cabos

Para conferir se a cobertura dos cabos estava dentro dos padrões estabelecidos em [1], foram efetuadas as medições dos diâmetros internos e externos dos cabos. Com a utilização de um paquímetro digital, mediram-se, no total, 54 amostras, sendo duas de cada tipo de cabo.

Para cada amostra, foram medidos os diâmetros externos em 4 pontos e o diâmetro interno nas duas extremidades, conforme ilustrado na Figura 3.4 a seguir. Os valores obtidos durante a medição podem ser visualizados no ANEXO II.

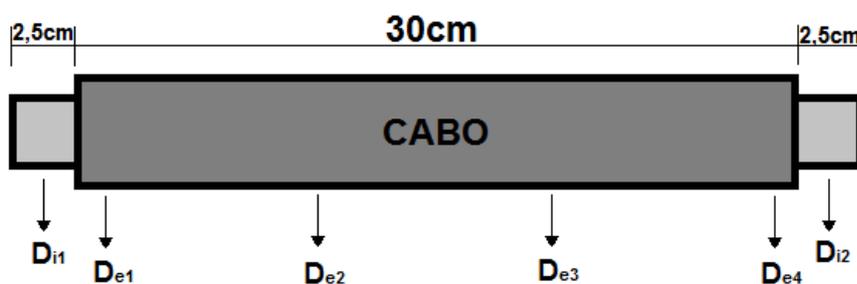


Figura 3.4 - Ilustração de como foram realizadas as medições dos diâmetros nos cabos.

### 3.1.4. Radiografias Digitais

Foram retiradas amostras de cabos virgens e de outros que apresentaram falhas nos ensaios de compatibilidade dielétrica (multiestressamento), que foram submetidas a exame de radiografia digital, com vistas à compreensão do comportamento das falhas e à verificação da existência de excentricidades nos cabos. Alguns destes resultados estão expostos no Capítulo 5.

### 3.1.5. Análise do Teor de Cargas Mineraias e Negro de Fumo

Para fins de determinação do teor de negro de fumo e das cargas mineraias, existentes nas coberturas dos cabos, foram retiradas amostras de todos os tipos de cabos. Os ensaios foram procedidos conforme a norma ABNT NBR 7104.

### 3.1.6. Medição do Isolamento dos Cabos

Com o auxílio de um testador de isolação digital de alta tensão, foram realizadas medições do isolamento de todas as amostras utilizadas nos ensaios de medição de corrente de fuga. A montagem realizada para a medição do isolamento foi feita de acordo com a Figura 3.5.

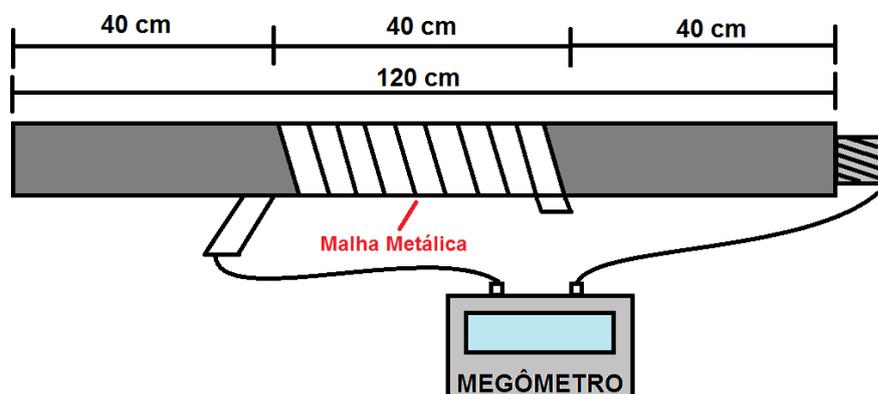


Figura 3.5 - Ilustração de como foram realizadas as medições de isolamento.

Os resultados obtidos nas medições podem ser visualizados no ANEXO III.

### 3.1.7. Ensaio de Tensão Aplicada

Os ensaios de tensão aplicada foram realizados em 22 tipos de cabos diferentes. A metodologia utilizada para o ensaio foi de acordo com [1,3]. E o esquema montado para realização do ensaio está ilustrado na Figura 3.6.

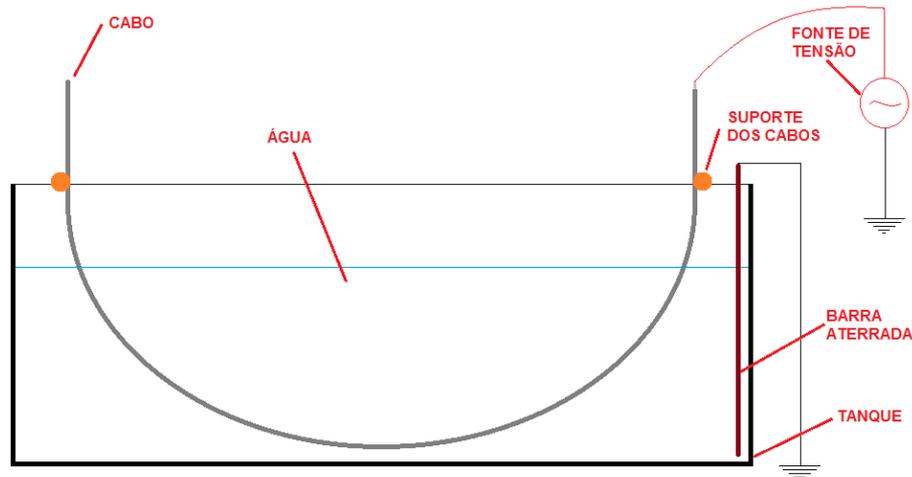


Figura 3.6 - Ilustração de como foram realizados os ensaios de tensão aplicada.

Os resultados obtidos não foram conclusivos, visto que os cabos não apresentaram falhas.

## 3.2. MODELAGENS

As modelagens apresentadas neste trabalho foram executadas no software COMSOL Multiphysics que utiliza o Método dos Elementos finitos na solução das equações diferenciais envolvidas. Este método divide a região em múltiplas sub-regiões e realiza os cálculos para todas, salientando-se que, quanto maior for o número das sub-regiões, mais preciso será o resultado obtido. Um melhor detalhamento do assunto está contido no Apêndice B.

Todas as modelagens do trabalho, salvo as com indicação em contrário, foram executadas com aplicação de uma tensão de  $2U_0$  nos condutores, sendo  $U_0$  a tensão nominal, da fase para a terra, dos cabos. A escolha da tensão decorre do fato de ser a mesma a que é utilizada nos ensaios de compatibilidade dielétrica,

além do que, em casos de falta monofásica para terra, a tensão das outras duas fases sobe para  $1,732U_0$ , chegando próximo do valor empregado nas modelagens.

Em todas as simulações, considerou-se que qualquer plano terra esteja suficientemente distante, a tal ponto que não exerça uma influência significativa nos valores de gradiente de campo encontrados, exceto nas situações em que esteja explicitamente citado que o plano terra esteja próximo. Todos os gradientes de campo elétrico mencionados no trabalho são referentes ao de campo normal.

### 3.2.1. COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics é uma poderosa ferramenta de elementos finitos, que soluciona equações diferenciais parciais. O software COMSOL Multiphysics básico possui oito módulos que podem ser adicionados, expandindo a sua capacidade dentro das seguintes áreas de aplicação: AC/DC, acústica, engenharia química, transferência de calor, RF, MENS, estruturas mecânicas e ciências da terra.

## CAPÍTULO 4 - COMPATIBILIDADE DIELÉTRICA

Um dos grandes problemas que afetam as redes compactas é a compatibilidade dielétrica entre os cabos e acessórios/outros.

Existindo dois dielétricos com constantes dielétricas diferentes, o comportamento do gradiente de campo elétrico normal na região fronteira de ambos é descrito, conforme a Equação 4.1:

$$\frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (4.1)$$

Quando o cabo está sobre o berço de um isolador ou espaçador, tem-se o campo elétrico distribuído por três dielétricos diferentes: o isolamento (cobertura) do cabo, o ar e o isolador ou espaçador. A Figura 4.1 apresenta o desenho de um modelo simplificado dos dielétricos presentes na situação citada acima. Dependendo das constantes dielétricas destes elementos, os gradientes de campo elétrico podem distribuir-se de diferentes formas.

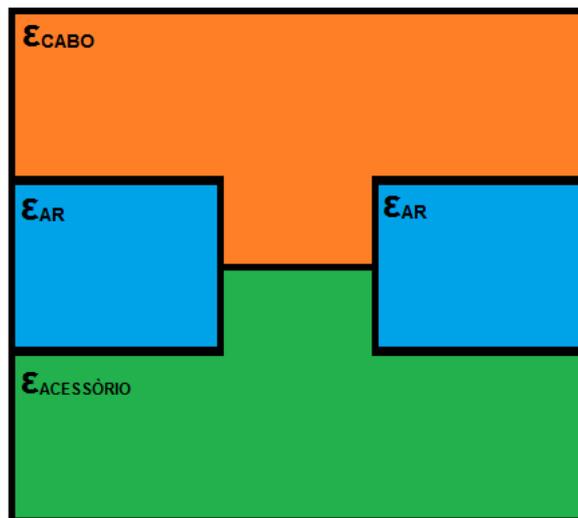


Figura 4.1 - Dielétrico no sistema cabo/acessório.

A permissividade relativa do ar ( $\epsilon_{ar}=1$ ) é um valor fixo e não tem como ser alterada, logo, tem que se buscar a compatibilidade dielétrica entre a cobertura do cabo e o acessório e, de preferência, que os dois materiais possuam um baixo valor da constante dielétrica, a fim de que não resulte em altos valores de gradientes de campo no ar (região encostada à superfície dos materiais), que, por conseguinte,

poderiam promover o efeito corona e até a erosão do material na região crítica. Para que seja alcançada a compatibilidade dielétrica entre dois materiais isolantes, eles devem possuir a mesma constante dielétrica, ou, pelo menos, valores próximos.

#### 4.1. ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE POR MEIO DE MODELAGENS

Como ferramentas de análise dos problemas identificados nas redes compactas, em campo e nos ensaios de laboratório, foram produzidas diversas modelagens, investigando-se o impacto da variação da constante dielétrica, dos materiais isolantes, nos gradientes de campo elétrico. Para tal, foram efetuadas 2 modelagens com cabos e espaçadores, 3 modelagens com cabos e isoladores tipo pino, e 2 modelagens para análise dos efeitos de uma gota de água sobre o cabo.

##### 4.1.1. Compatibilidade Cabo/Espaçador

Nas modelagens que tratam da compatibilidade dielétrica entre a cobertura do cabo e o espaçador, foram desconsideradas quaisquer influências de plano de terra. As fases “a” e “c” foram configuradas para uma tensão de 13,5 kV negativos e a fase “b” foi setada para uma tensão de 27 kV ( $2U_0$ ), tentando simular um sistema trifásico em um único instante de tempo.

Na primeira modelagem, as constantes dielétricas do cabo e do espaçador foram configuradas para o mesmo valor, que foi de 2,3, e o resultado é mostrado na Figura 4.2 e na Figura 4.3.

Para a segunda modelagem, foi alterada a constante dielétrica do material do espaçador para o valor 3, cujos resultados estão expostos na Figura 4.4.

Com a alteração da permissividade do espaçador, pôde ser constatada uma elevação do gradiente de campo elétrico no berço do espaçador, passando de 1,65 para 2,01 kV/mm, o que significa um acréscimo de aproximadamente 22% no campo elétrico. Este incremento pode ser considerado um problema decorrente da incompatibilidade dielétrica.

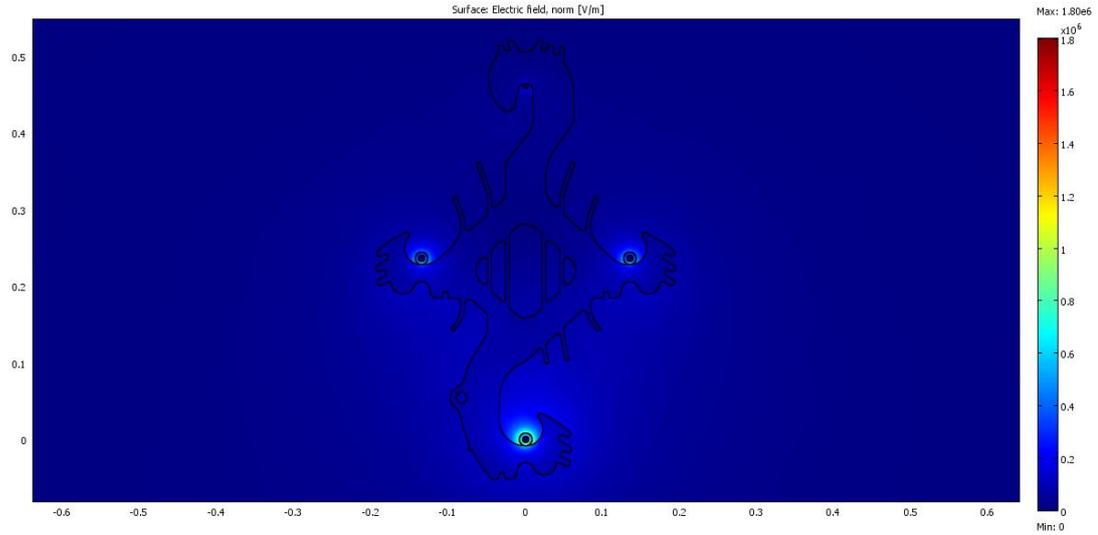


Figura 4.2 - Modelagem de um sistema trifásico cabo/espaçador.

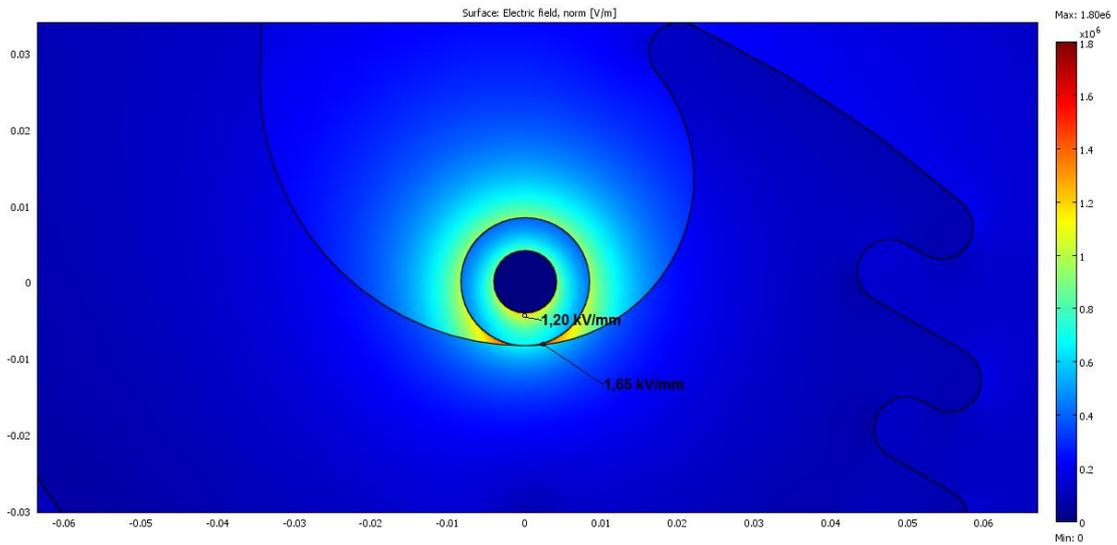


Figura 4.3 - Detalhe do berço do espaçador ( $\epsilon_{\text{ESPAÇADOR}}=2,3$ ) na fase "b".

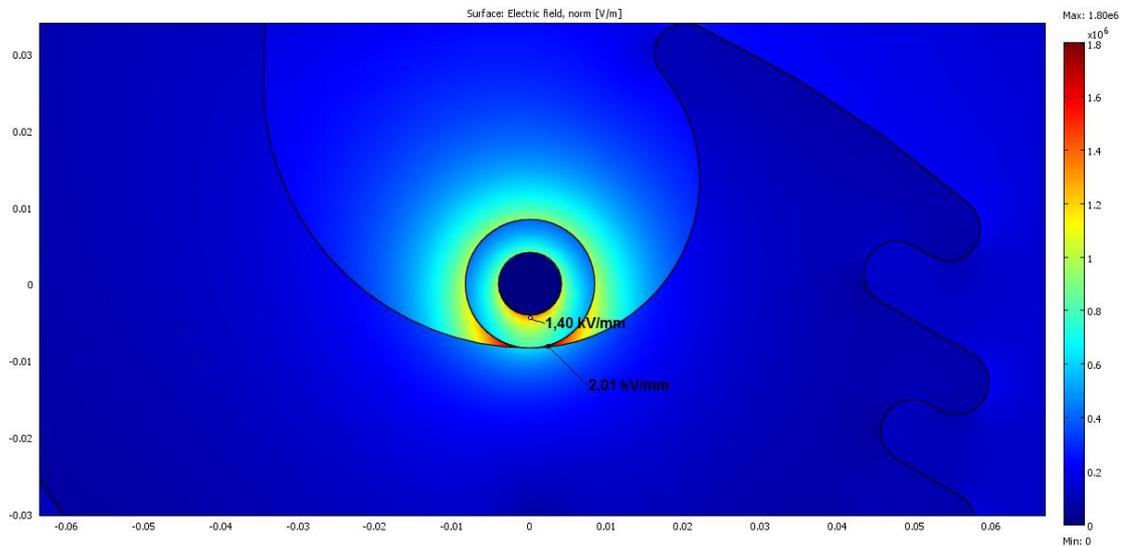


Figura 4.4 - Detalhe do berço do espaçador ( $\epsilon_{\text{ESPAÇADOR}}=3$ ) na fase "b".

Para o caso de estudo de novos materiais ou misturas para espaçadores, deve-se considerar a constante dielétrica do material resultante, pois caso haja muita diferença entre a deste e a do material utilizado na cobertura dos cabos, poderá resultar no problema citado no parágrafo anterior.

#### 4.1.2. Compatibilidade Cabo/Isolador

Para os isoladores tipo pino, foram realizadas modelagens para três casos diferentes.

No primeiro, foi considerado um isolador polimérico tipo pino, utilizando um pino, também polimérico. Os resultados desta etapa podem ser observados na Figura 4.5 e na Figura 4.6 a seguir.

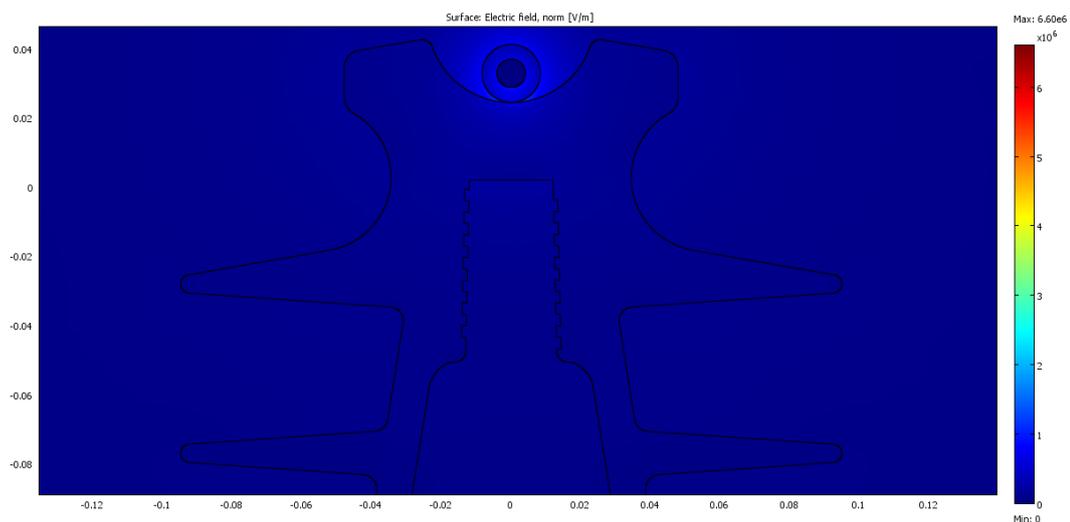


Figura 4.5 - Modelagem de um isolador polimérico utilizado pino polimérico.

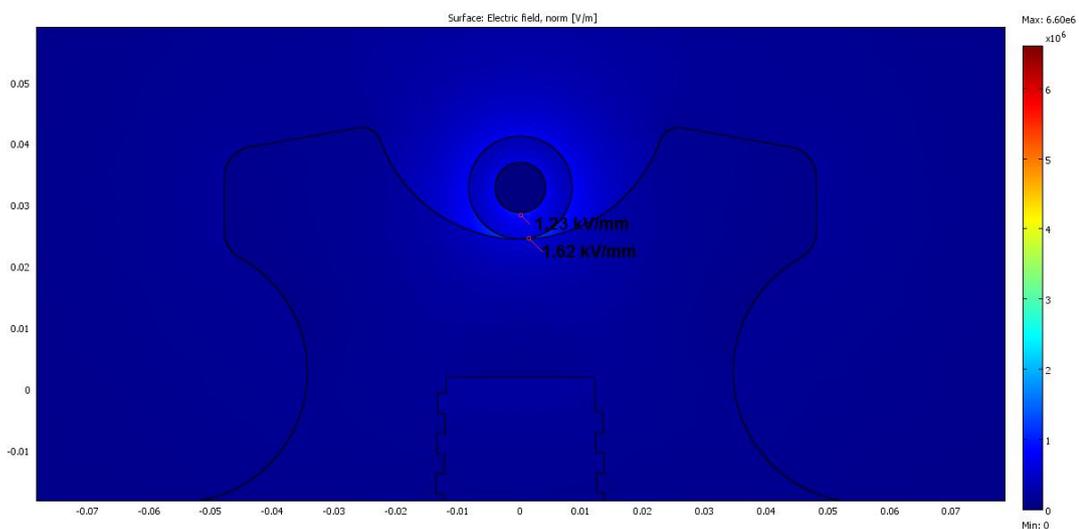


Figura 4.6 - Detalhe do berço de um isolador polimérico com pino polimérico.

No segundo, foi levado em conta que o pino do isolador agora é metálico e está aterrado, trazendo o ponto de terra para mais próximo do condutor, resultando em um acréscimo nos gradientes de campo elétrico normal na região, conforme pode ser verificado na Figura 4.7.

Nos casos 1 e 2 dos isoladores, a modelagem foi configurada para o isolador e a cobertura do cabo com a mesma permissividade, sendo ambas com o valor de 2,3. Desta forma, as alterações resultantes nos gradientes, de um caso para o outro, referem-se apenas à troca do pino polimérico pelo pino metálico.

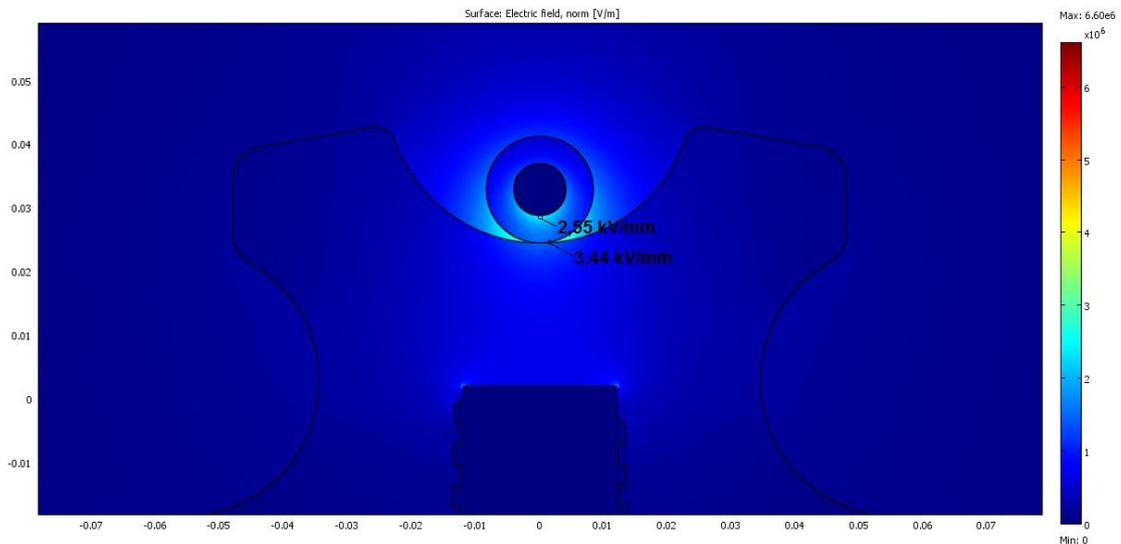


Figura 4.7 - Detalhe do berço de um isolador polimérico com pino metálico.

Para o terceiro, foi elaborada uma nova modelagem utilizando um isolador tipo pino de porcelana e, para sustentação, um pino metálico. A constante dielétrica adotada para o isolador neste caso foi de 6,5 e a da cobertura do cabo foi mantida a mesma. Os resultados obtidos podem ser verificados na Figura 4.8.

Na Tabela 4.1 abaixo estão elencados os resultados aferidos nas três simulações.

Tabela 4.1 - Valores dos gradientes de campo elétrico para os três casos de isoladores.

	CASO I	CASO II	CASO III
Gradiente de campo elétrico dentro da cobertura (kV/mm)	1,23	2,55	4,56
Gradiente de campo elétrico no berço do isolador (kV/mm)	1,62	3,44	6,85

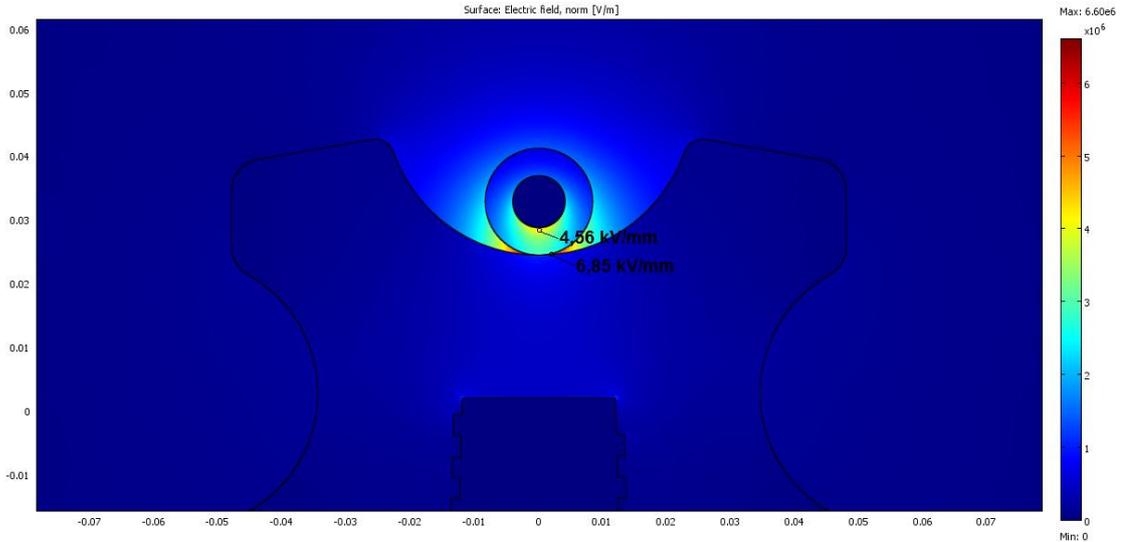


Figura 4.8 - Detalhe do berço de um isolador de porcelana com pino metálico.

Analisados os valores da Tabela 4.1, conclui-se que ocorreu um acréscimo, no berço do isolador, de gradiente de campo da ordem de 322%, em virtude das alterações do caso de 1 para o 3, enquanto que, do caso 1 para o 2, constata-se um incremento de aproximadamente 112%.

#### 4.1.3. Compatibilidade Cabo/Gota de Água

Outro tipo de incompatibilidade dielétrica, que pode ocorrer no sistema *spacer cable* e que também foi objeto de estudo neste trabalho, diz respeito à hipótese da existência de uma gota d'água sobre a superfície da cobertura. Duas modelagens foram produzidas: numa, considerou-se um cabo coberto sem a presença da gota d'água, enquanto que, na outra, adicionou-se a ele uma gota d'água, para fins de verificação dos seus impactos nos gradientes de campo elétrico na região. Na Figura 4.9 a seguir é apresentada a modelagem de um cabo no espaço, distante o suficiente de qualquer plano de terra ou de qualquer outro agente que possa interferir nos gradientes de campo elétrico.

Na Figura 4.10 e na Figura 4.11 consta a modelagem com a presença de uma gota de água na superfície do cabo, sendo que a primeira imagem está completa, enquanto que a segunda é apenas um detalhe da região mais crítica do ponto de vista de gradiente de campo.

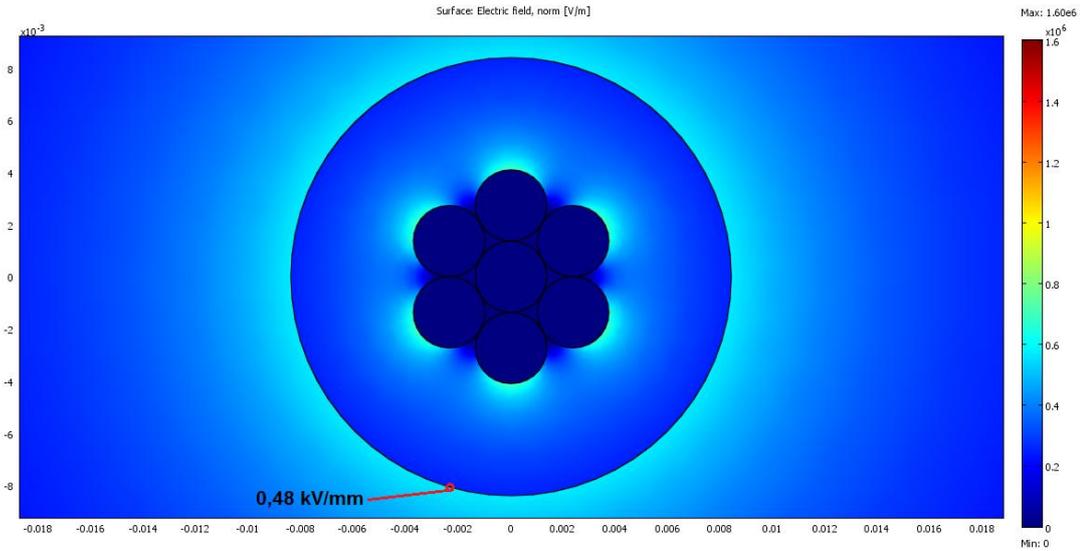


Figura 4.9 - Modelagem de um cabo coberto sem a influência de agentes externos.

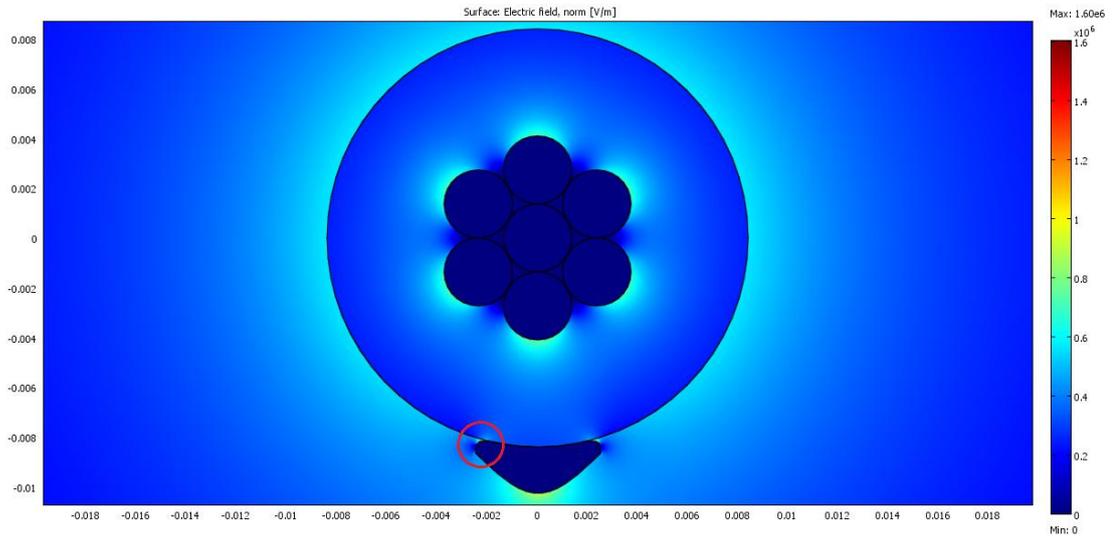


Figura 4.10 - Modelagem de um cabo coberto com a influência de uma gota de água.

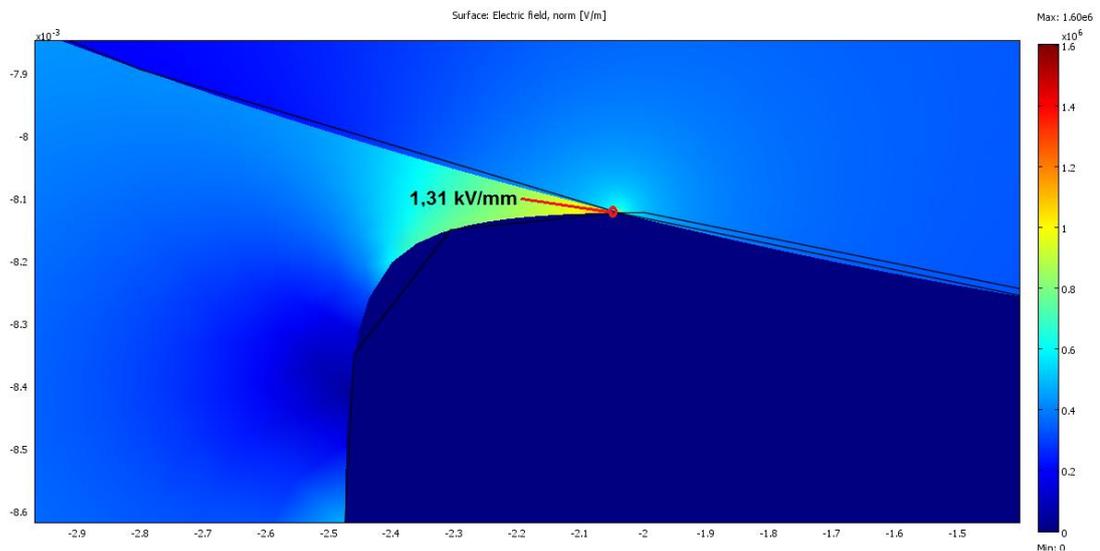


Figura 4.11 - Detalhe da modelagem de um cabo coberto com a influência de uma gota de água.

Observando as modelagens, com e sem a gota de água, ficou perceptível um aumento nos gradientes de campo elétrico normal, na superfície da cobertura, da ordem de 173%. Esta concentração de campo elétrico ocorre exclusivamente em virtude da presença de uma gota de água ( $\epsilon=80$ ), sobre a cobertura do cabo, esclarecido que o fato pode ser agravado, caso existam outros fatores que contribuam, no mesmo momento, para este acréscimo.

#### 4.2. ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE DIELÉTRICA POR MEIO DE ENSAIOS

Os ensaios de compatibilidade dielétrica têm duração de 30 dias e os cabos e acessórios não devem apresentar nenhum tipo de avaria após o seu término. A realização se dá conforme [5]. Com vistas à verificação de quais são os itens impactantes na compatibilidade do sistema, foram realizados ensaios em laboratório, com a utilização de espaçadores de 4 fabricantes diferentes, e de 12 tipos de cabos de 5 fabricantes diferentes. Todos os cabos aqui citados são da classe de tensão de 25 kV e variam, quanto à presença, ou não, de semicondutoras ou, quanto a sua bitola (50 ou 95 mm<sup>2</sup>). Quanto aos espaçadores empregados, foram da classe de tensão de 35 kV que, de acordo com o projeto de norma atual, passarão a ser os utilizados na classe de 25 kV.

Durante os ensaios de compatibilidade dielétrica, ocorreram diversos defeitos nos cabos e acessórios. Nos casos mais graves, registraram-se a erosão e até o incêndio de isoladores, consoante estão expostos na Figura 4.12 e na Figura 4.13.



Figura 4.12 - Fotografia de espaçador incendiado.



**Figura 4.13 - Fotografia de espaçador incendiado.**

Na Figura 4.14 pode ser visualizada a fotografia do detalhe do berço do espaçador após o final do incêndio.



**Figura 4.14 - Fotografia do berço de um espaçador queimado.**

#### 4.3. OUTROS FATORES DE FALHA QUE NÃO TEM RELAÇÃO COM A COMPATIBILIDADE DIELÉTRICA

Nas investigações de outros problemas que podem se tornar meios facilitadores de falhas nos sistemas de redes compactas destaca-se, por sua evidência e importância, o impacto da geometria dos espaçadores. Foram feitas

observações inferidas a partir dos ensaios de compatibilidade elétrica e de medições de corrente de fuga.

Durante as medições de corrente de fuga, ficou perceptível que os espaçadores com aletas verticais obtiveram maiores valores de corrente.

Das análises, conclui-se que os espaçadores com aletas verticais, e que possuem a geometria que facilita a formação de um caminho completamente molhado, nas situações de chuva, tiveram maiores valores de corrente de fuga.

Outro ponto, relacionado à geometria do acessório, e que pode prejudicar o desempenho dos acessórios, é a presença de cantos que possam servir para o acúmulo de poluentes.

## **CAÍTULO 5 - IMPACTOS DA PRESENÇA DE UMA CAMADA SEMICONDUTORA EM CABOS COBERTOS UTILIZADOS NAS REDES COMPACTAS**

Neste capítulo, são apresentados os impactos da presença de uma camada semicondutora em cabos cobertos empregados em redes compactas, demonstrando, por conseguinte, que a sua ausência provoca a concentração de campo elétrico próximo às superfícies mais externas dos condutores que compõem o cabo ou, em prováveis rebarbas afiadas de alumínio, aumentando o esforço elétrico aplicado na camada de polietileno utilizada na cobertura do cabo. No entanto, almeja também esclarecer que a inserção da blindagem semicondutora, sem o aumento do diâmetro total do cabo, reduz a espessura média do revestimento isolante, resultando no aumento dos valores de corrente de fuga através da cobertura do cabo coberto.

Foi verificado que a falta de uma camada semicondutora no cabo implica em um alto incremento no valor do campo elétrico normal em alguns pontos da cobertura. Tal problema é agravado quando existem objetos aterrados (ou um plano de terra) nas proximidades dos cabos de uma rede em operação, acarretando um acréscimo ainda maior no valor do campo elétrico normal. O pior dos casos é quando existe uma rebarba afiada de alumínio sobre o condutor.

Neste estudo, foram consideradas medições de corrente de fuga e modelagens, utilizando-se do método dos elementos finitos para realizar um estudo dos gradientes de campo elétrico envolvidos. As medições de corrente de fuga bem como as modelagens foram efetuadas em cabos especificados para classe de tensão de 25 kV.

### 5.1. Análise pela Corrente de Fuga

Um parâmetro que também pode ser decisivo no sucesso ou na falha de um conjunto *spacer cable*, em operação ou submetido ao ensaio de compatibilidade dielétrica, é a corrente de fuga.

Mesmo não existindo qualquer menção deste ensaio em normas, foram realizadas medições em ensaios, utilizando-se de amostras de cabos de aproximadamente 1,20 metros. Este ensaio foi executado com o cabo guarda aterrado, e energização das fases uma a uma com as demais flutuando. Este procedimento foi tomado para as condições a seco e sob chuva, com a água apresentando valores de condutividade de 70, 250, 500 e 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A leitura de corrente de fuga foi realizada para cabos cobertos da classe de tensão 25 kV, trabalhando com espaçadores, segundo a antiga normatização brasileira, classe 36,2 kV. A Figura 5.1 mostra a configuração de ensaio utilizada para medição das correntes de fuga.



**Figura 5.1 -Fotografia que ilustra como foi realizada a medição das correntes de fuga.**

Em outro procedimento, o cabo foi envolvido por uma fita metálica na largura do berço do espaçador, conforme Figura 5.2, para que fosse verificada a corrente de fuga com as três fases em curto-circuito, uma a uma e também em conjuntos, para a terra. Este ensaio apresenta resultados relacionados apenas com a isolação do cabo, já que, ao ligar a fita metálica diretamente da cobertura do cabo para a terra (cabo guarda), elimina-se a parcela de isolação proveniente do espaçador.

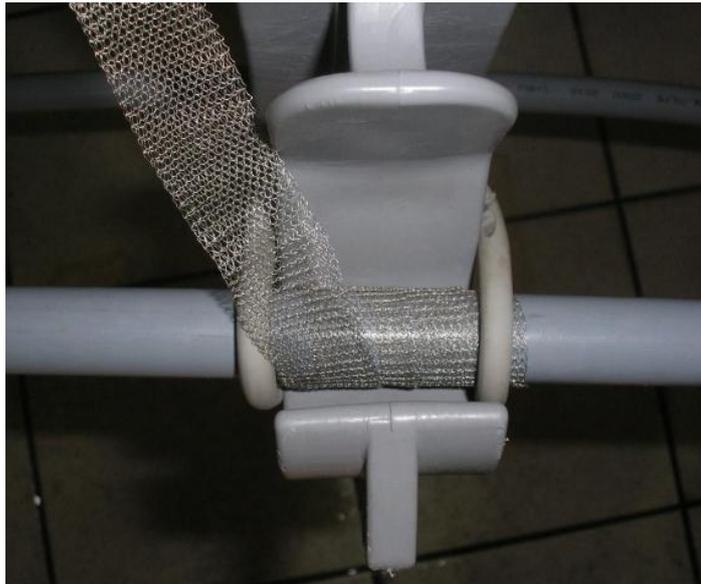


Figura 5.2 - Fotografia que ilustra como foi realizada a medição de corrente de fuga curto-circuitando o espaçador.

A inserção de uma camada semicondutora, sem o aumento do diâmetro externo do cabo, também resulta na redução da espessura média da cobertura do cabo, implicando, por conseguinte, numa redução da isolação do sistema.

Partindo da idéia de que o projeto do cabo tenha sido realizado próximo dos limites admissíveis de corrente de fuga, a inserção da camada semicondutora, sem o suficiente aumento do diâmetro do cabo para manter os mesmos níveis de corrente de fuga, pode resultar na adição de um item causador de falhas nos cabos.

De acordo com a NBR 11873 [1], que regulamenta os cabos cobertos no Brasil, a espessura mínima da cobertura dos cabos classe 25 kV é de 4 mm e, em média, as camadas semicondutoras aplicadas nos mesmos podem possuir espessura em torno de 0,5 mm, logo, caso o diâmetro externo do cabo não seja modificado, este valor representaria uma redução de, no mínimo, 12,5% na espessura da camada isolante. O fato pode ser melhor visualizado nas Figura 5.3a e Figura 5.3b.

O valor percentual mencionado é considerado mínimo, porque a espessura de 4 mm, informada em [1], é utilizada no projeto dos cabos como espessura mínima. Por conseguinte, a Figura 5.3a mostra que, entre um tento e outro, a espessura é maior, o que resulta em uma espessura média maior do que os 4 mm declarados, e que pode ser reduzida a aproximadamente 3,5 mm com a presença da semicondutora.

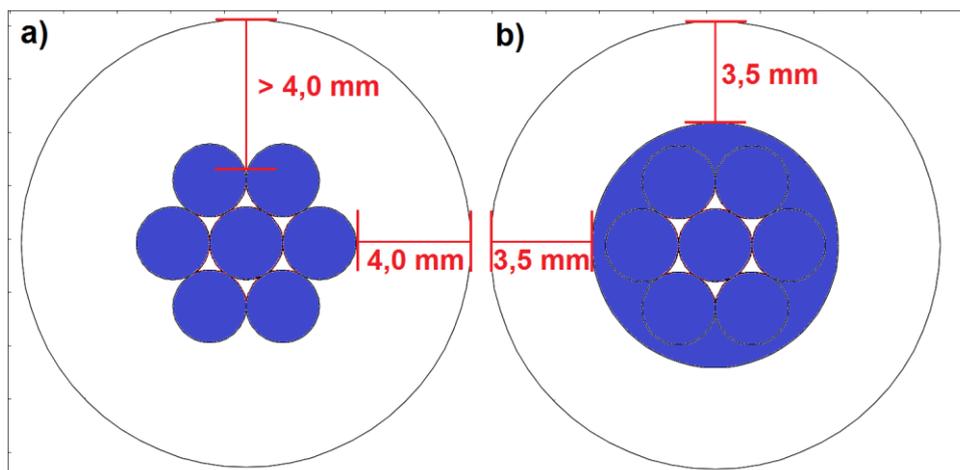


Figura 5.3a – Desenho ilustrando a espessura da cobertura de um cabo sem a presença de semicondutora. Figura 5.3b – Desenho ilustrando a espessura da cobertura de um cabo com a presença de semicondutora.

O impacto proveniente da redução da isolação dos cabos com semicondutora pôde ser verificado nas medições realizadas nos ensaios de corrente de fuga, através dos quais foram medidos valores maiores para os casos em que foram empregados cabos com camada semicondutora, conforme estão mostrados da Tabela 5.1 a Tabela 5.7. O problema pode sofrer um maior agravamento, se o condutor não estiver concêntrico no cabo, resultando em corrente maior na parte menos espessa e concentrações de campo elétrico não uniforme.

Tabela 5.1 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador A, sem chuva.

Cabos	Espaçador A		
	Corrente [ $\mu$ A]		
	Fase a	Fase b	Fase c
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup>	69	46	60
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	74	65	74
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup>	71	51	63
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	78	63	77

Tabela 5.2 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador B, sem chuva.

Cabos	Espaçador B		
	Corrente [ $\mu$ A]		
	Fase a	Fase b	Fase c
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup>	78	49	60
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	75	65	71
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup>	68	63	75
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	75	64	75

Tabela 5.3 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador C, sem chuva.

Cabos	Espaçador C		
	Corrente [ $\mu$ A]		
	Fase a	Fase b	Fase c
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup>	74	64	79
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	74	65	79
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup>	63	58	62
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	77	63	77

Tabela 5.4 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador A, com chuva (750  $\mu$ S).

Cabos	Espaçador A		
	Corrente [ $\mu$ A]		
	Fase a	Fase b	Fase c
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup>	196	442	330
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	350	549	285
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup>	202	558	816
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	200	450	607

Tabela 5.5 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador B, com chuva (750  $\mu$ S).

Cabos	Espaçador B		
	Corrente [ $\mu$ A]		
	Fase a	Fase b	Fase c
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup>	320	600	430
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	526	781	990
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup>	220	690	500
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	323	723	429

Tabela 5.6 - Valores de corrente de fuga encontrados para o espaçador C, com chuva (750  $\mu$ S).

Cabos	Espaçador C		
	Corrente [ $\mu$ A]		
	Fase a	Fase b	Fase c
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup>	381	554	510
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	774	923	880
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup>	280	650	450
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	269	468	304

**Tabela 5.7 - Valores de corrente de fuga encontrados para os cabos com o espaçador curto-circuitado.**

Cabos	Corrente [ $\mu$ A]		
	Fase a	Fase b	Fase c
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup>	352	298	332
Cabo A – 25 kV/50 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	415	401	370
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup>	385	351	381
Cabo A – 25 kV/95 mm <sup>2</sup> Com semicondutora	409	375	383

Conforme citado no parágrafo anterior, em relação aos valores obtidos para o Cabo A – 25 kV/50mm<sup>2</sup>, pode ser observado grande aumento nos valores de corrente lidos. Tal aumento se dá pelo fato da inserção da camada semicondutora sem o aumento do diâmetro total do cabo, reduzindo assim, a espessura da camada de cobertura isolante. Este fato também pode ser comprovado com as medições dos diâmetros dos cabos e as medições de isolamento dos cabos que são encontradas no ANEXO II e ANEXO III respectivamente.

Nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 o acréscimo de corrente é menor, já que, neste caso, por estar seco, a impedância total é a soma da impedância do espaçador com a da cobertura isolante do cabo. A maior parte desta impedância está sobre o espaçador, logo a alteração da isolação no cabo produz um menor impacto.

Nas Tabelas 5.4 a 5.7 é verificado que as correntes de fuga, com o espaçador curto-circuitado, são da mesma ordem que as encontradas no sistema sob chuva, reforçando a idéia que, durante a chuva, os espaçadores se comportam como um curto, restando somente à cobertura do cabo a função de isolar.

Como consequência da não-uniformidade da chuva, os valores lidos de corrente de fuga, durante o processo da chuva possuem maior oscilação.

## 5.2. Análise pelo Gradiente de Campo Elétrico

A adição da semicondutora uniformiza os gradientes de campo elétrico presentes na cobertura do cabo, evitando a concentração de campo elétrico nas superfícies mais externas dos condutores de alumínio.

Para verificar tais fenômenos, foram efetuadas modelagens com o software COMSOL Multiphysics que utiliza o método dos elementos finitos no cálculo dos gradientes de campo elétrico. Na primeira modelagem, foi simulado um único cabo

distante o suficiente de qualquer plano de terra para evitar sua influência nos valores obtidos, e foi aplicada uma tensão de  $2U_0$  que é a mesma usualmente empregada nos cabos durante ensaio de compatibilidade dielétrica regido por [5]. Os resultados alcançados são constatados na Figura 5.4 e na Figura 5.5.

Analisando os valores obtidos, conclui-se que a ausência da camada semicondutora provoca um acréscimo de aproximadamente 60% no valor do campo elétrico normal próximo ao condutor, na face interna da cobertura (próximo aos tentos), pois o gradiente de campo elétrico passa do valor de 0,463 kV/mm (com semicondutora) para 0,752 kV/mm (sem semicondutora). Tal fato pode ser o motivo gerador de uma perfuração da camada de cobertura do cabo, que se desenvolveria a partir das regiões mais internas, próximas ao condutor, para as mais externas do cabo.

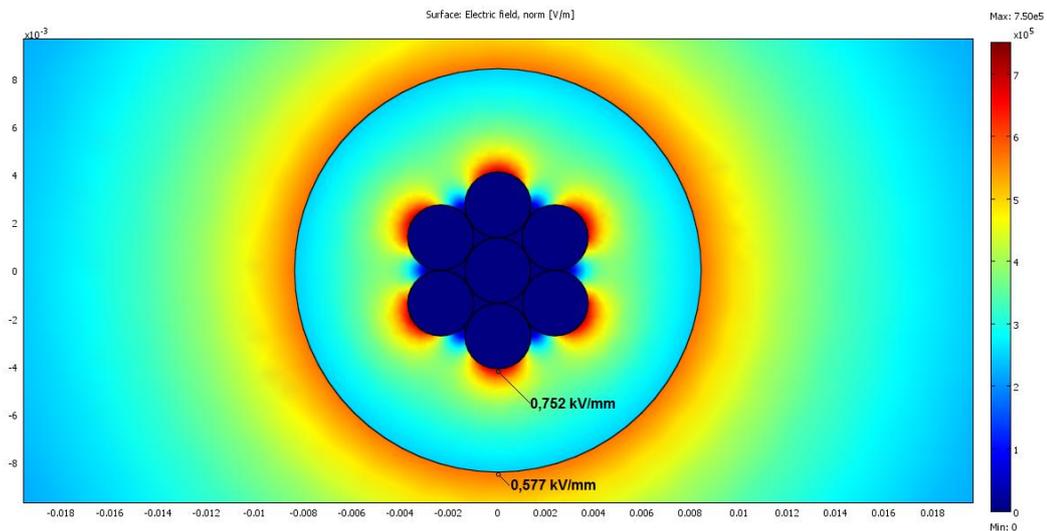


Figura 5.4 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo sem semicondutora.

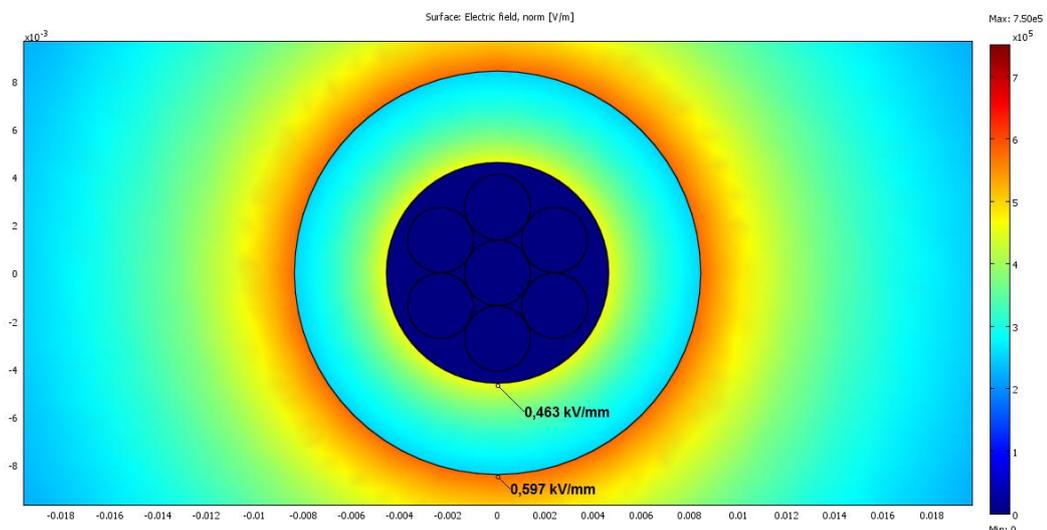


Figura 5.5 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo com semicondutora.

Durante os ensaios de compatibilidade dielétrica, foram verificadas inúmeras perfurações ao longo dos cabos em pontos distantes das ferragens, o que leva a crer que o problema da excentricidade, somado à falta de uma camada semicondutora, seria a causa, ou um fator contribuinte, para a ocorrência de tais acontecimentos.

A situação pode ser agravada se existir a influência de um plano de terra próximo ao cabo. Para visualizar esta condição, foram realizadas simulações com um plano de terra à aproximadamente 30 cm da face inferior do cabo, verificando os impactos gerados sobre os gradientes de campo elétrico. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 5.6 e na Figura 5.7.

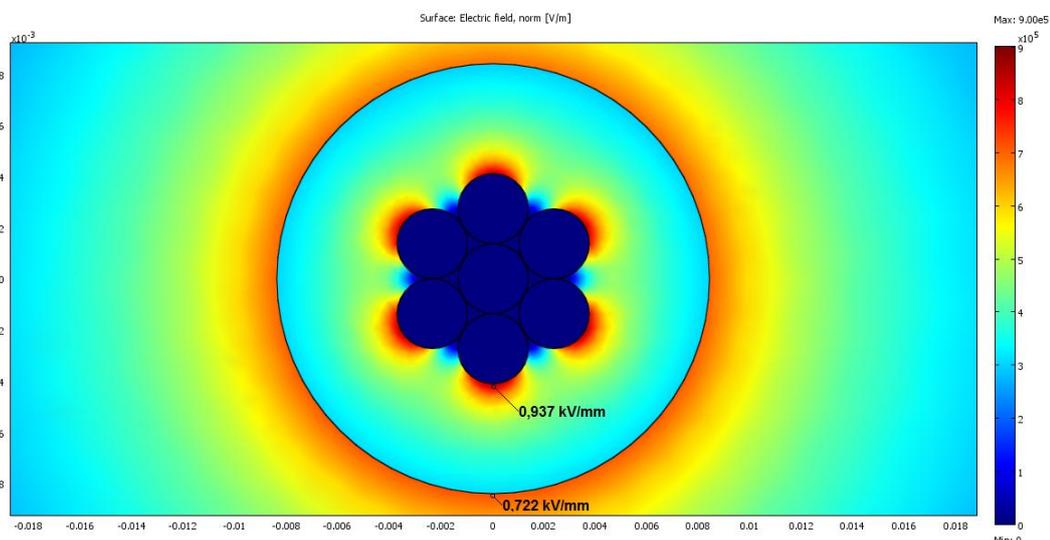


Figura 5.6 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo sem semicondutora, com o plano terra a 30 cm da face interior do mesmo.

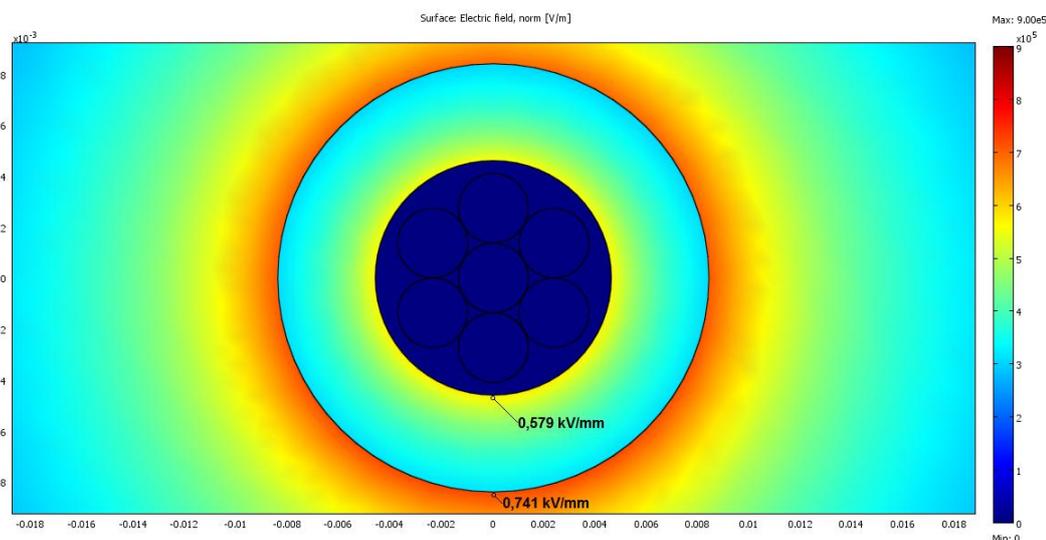


Figura 5.7 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo com semicondutora, com o plano terra a 30 cm da face interior do mesmo.

As novas simulações mostram o incremento do gradiente de campo, da ordem de 25%, proveniente do plano terra próximo ao cabo, bem como que a influência da camada semicondutora manteve o mesmo percentual de redução nos valores de campo elétrico.

Outro ponto analisado foi que, para o caso de ser mantido o diâmetro total (externo) do cabo, há conseqüentemente uma redução da espessura da camada isolante, resultando em um pequeno acréscimo de campo elétrico normal na superfície externa da cobertura do cabo, conforme se pode visualizar na Figura 5.8.

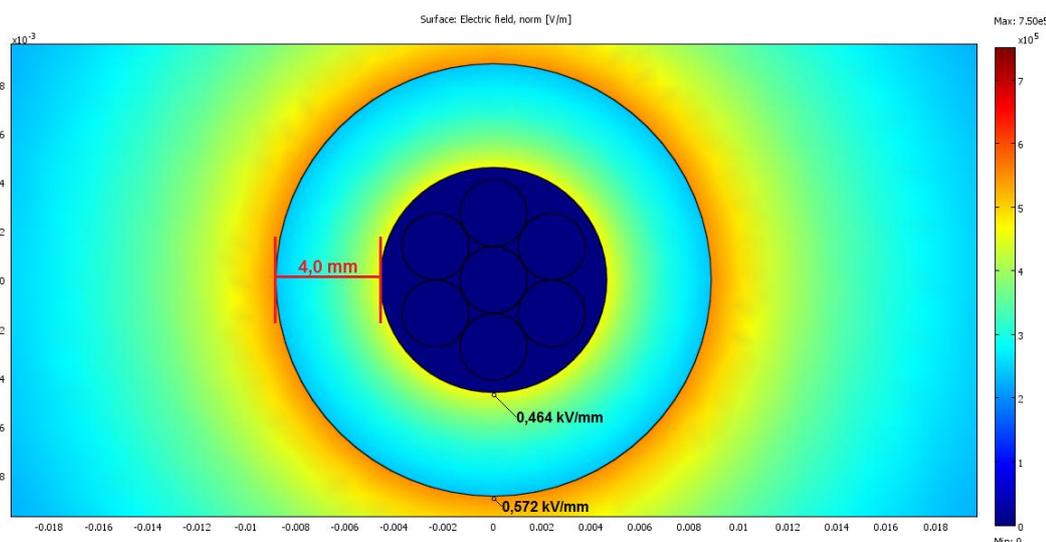


Figura 5.8 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo com semicondutora e espessura de isolamento de 4 mm.

O acréscimo observado foi da ordem de aproximadamente 3% para o caso em estudo. O inconveniente, referente ao gradiente de campo elétrico, foi solucionado nas simulações com o aumento da cobertura do cabo em 0,5 mm, mantendo-a na espessura original de 4 mm, alterando assim o diâmetro total do cabo.



## CAPÍTULO 6 - EFEITOS DA PROXIMIDADE DE UM PLANO TERRA SOBRE O CAMPO ELÉTRICO NA COBERTURA DO CABO

Neste capítulo, discutir-se-ão alguns dos efeitos provenientes da proximidade de um plano terra (ou objeto aterrado) a um cabo coberto.

Contrariando a prática adotada em muitas concessionárias, as redes compactas não podem operar com objetos ou planos aterrados demasiadamente próximos ou tocando os seus cabos, tendo em vista que o conceito de cabos cobertos difere do isolado, visto que ele não possui campo elétrico nulo na sua superfície externa. Assim sendo, se houver objetos aterrados encostados aos cabos, ocorrerá um comportamento semelhante ao de uma falta de alta impedância, em que são somadas as impedâncias do isolamento do cabo com a impedância do objeto para a terra.

Caso o plano terra esteja próximo, mas não o suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar, não existirá, de imediato, o problema do aumento de corrente de fuga, no entanto haverá um acréscimo nos gradientes de campo elétrico, conforme pode ser observado na Figura 6.1 e na Figura 6.2, referentes à modelagem de um cabo de 25 kV com aplicação de tensão de  $2U_0$  e um plano terra a 200 cm de sua cobertura e a outra modelagem nas mesmas condições, mas com um plano terra a 10 cm de sua cobertura.

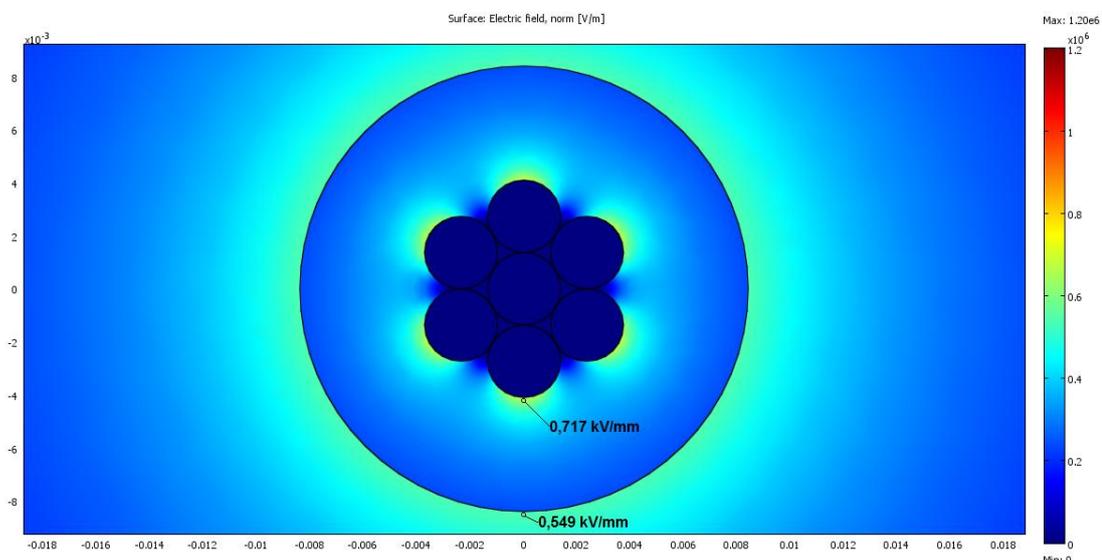


Figura 6.1 – Modelagem de um cabo coberto com influência de um plano a 200 cm de distância.

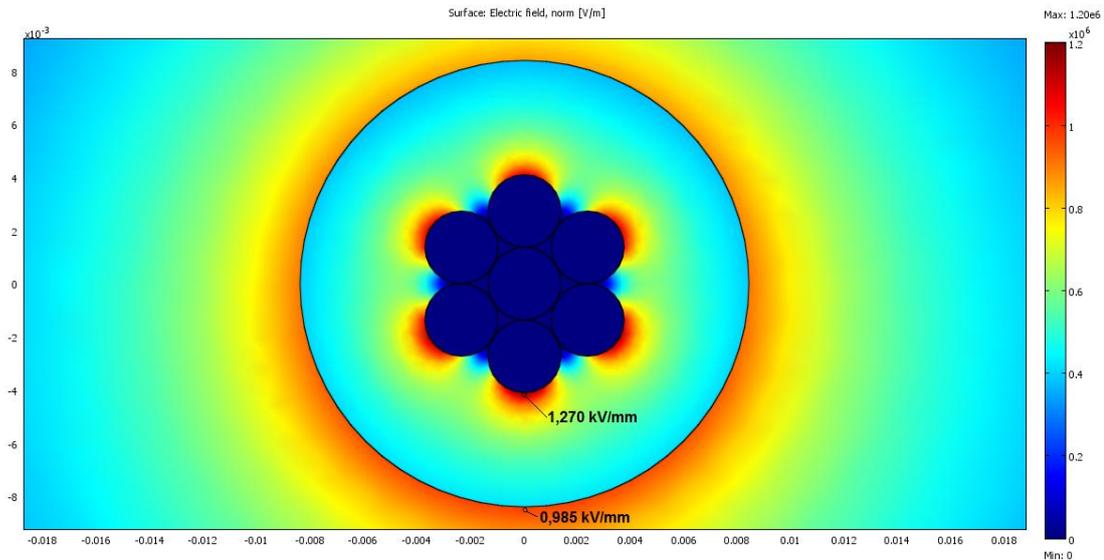


Figura 6.2 – Modelagem de um cabo coberto com influência de um plano terra a 10 cm de distância.

Apesar de não estar exposta nas simulações e no gráfico da Figura 6.4, para o caso da proximidade dos objetos aterrados ser inferior a dez centímetros, os valores de gradiente de campo elétrico normal têm um crescimento de forma semelhante a uma exponencial, até atingir seu patamar máximo. O valor encontrado para objetos com apenas um centímetro de distância da cobertura pode ser visualizado na Figura 6.3 a seguir.

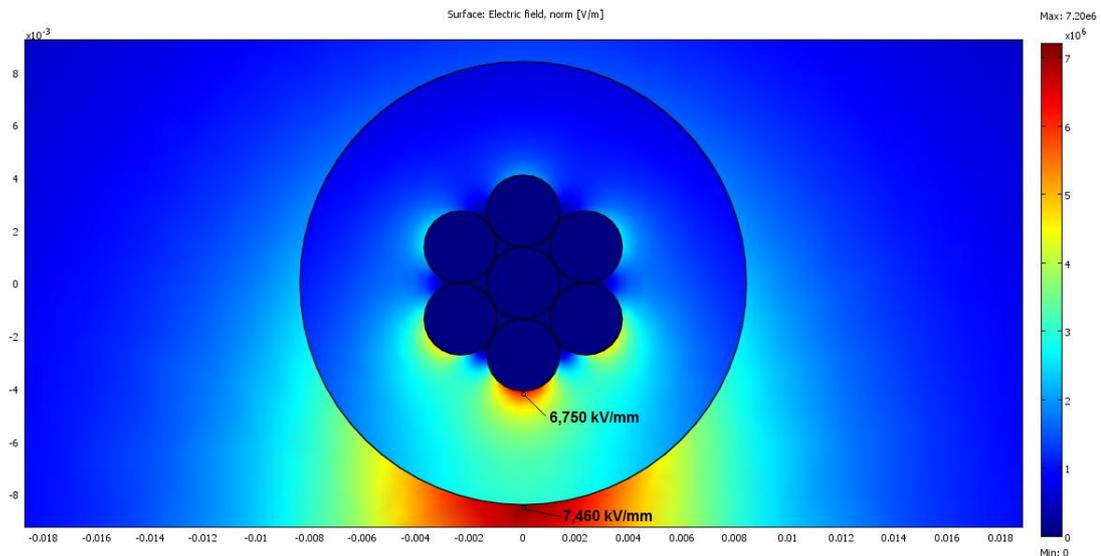


Figura 6.3 – Modelagem de um cabo coberto com influência de um plano terra a 1 cm de distância.

Com o intuito de serem observados os impactos do plano de terra sobre os gradientes de campo elétrico normal, realizaram-se 20 modelagens, por intermédio das quais foram calculados os gradientes de campo, na porção mais interior

(próximo ao condutor) e na mais exterior (em contato com o ar) da camada isolante dos cabos. Os resultados podem ser visualizados no gráfico da Figura 6.4.

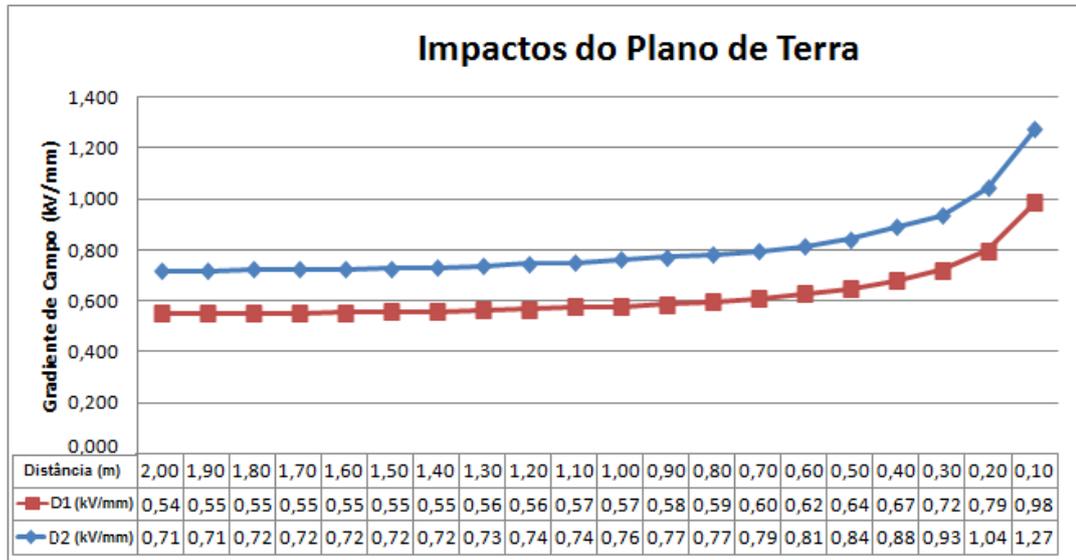


Figura 6.4 - Gráfico dos impactos do plano de terra na cobertura do cabo.

Quando o plano de terra é trazido para muito próximo ou, até mesmo venha a tocar a cobertura do cabo, as linhas do campo elétrico dobram-se de forma mais acentuada, finalizando em ângulos retos com o plano de terra, conforme é mostrado na Figura 6.5 a seguir. Tal efeito resulta em acréscimo do gradiente de campo elétrico tangencial, que contribui para o aumento do trilhamento elétrico na superfície do cabo.

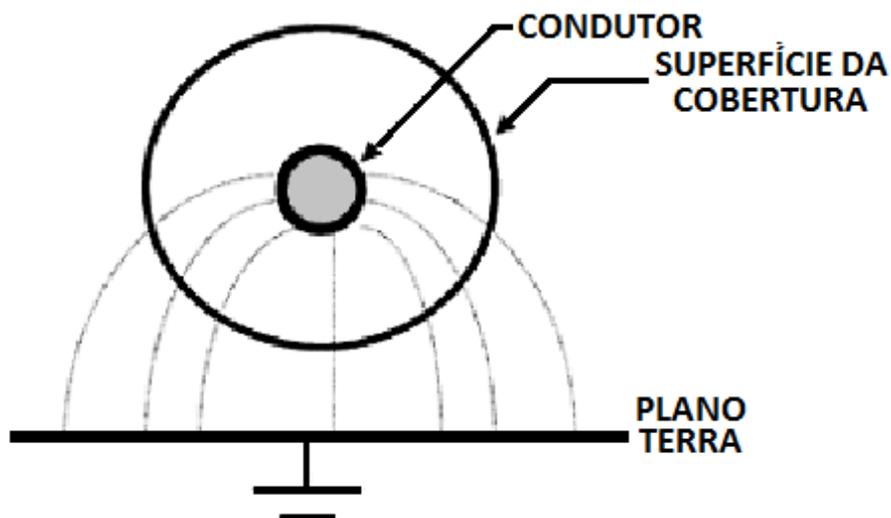


Figura 6.5 - Impactos do plano de terra nas linhas de campo elétrico. Fonte:[10].

A título de verificação dos impactos da proximidade do plano de terra nas linhas de campo elétrico, foram empreendidas duas modelagens, demonstradas na Figura 6.6 e na Figura 6.7. Na primeira modelagem, foi posto o plano terra, suficientemente distante do cabo, de modo que seus efeitos possam ser desprezados. Na segunda, o plano de terra foi trazido para bem próximo do cabo, de maneira que pudessem ser observados os impactos sobre as linhas de campo elétrico no cabo.

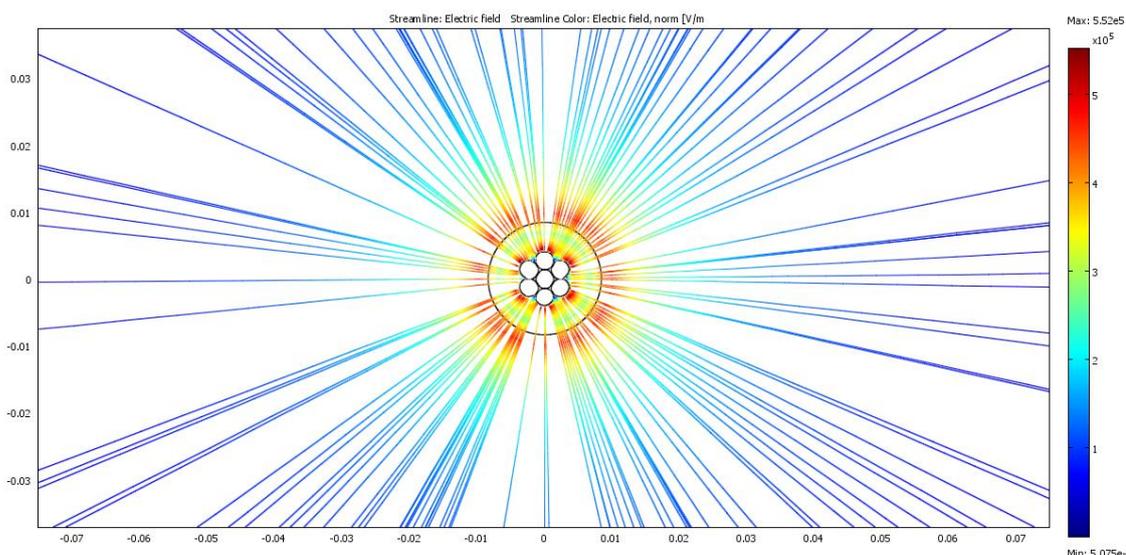


Figura 6.6 - Linhas de campo elétrico em um cabo equidistante de 2 metros de qualquer plano de terra.

Conforme exposta na Figura 6.5 e na modelagem apresentada na Figura 6.7, há uma flexão expressiva nas linhas de campo elétrico devido à proximidade do plano de terra. Deste modo, sabendo-se que as linhas equipotenciais, por regra, são perpendiculares às de campo, a flexão das mesmas resultará em uma diferença de potencial sobre a superfície da cobertura, tal como está demonstrada na Figura 6.8.

Com baixos níveis de tensão, o efeito é desprezível. Todavia, com o aumento da tensão, os gradientes de potencial passam a ser suficientes para causarem um fluxo de corrente na superfície do revestimento. Isto acarreta o fenômeno comumente conhecido como trilhamento elétrico, "tracking".

Mesmo que as correntes sejam pequenas, a elevada resistência superficial provoca o aquecimento, danificando o revestimento. Se esta condição é continuada, a erosão pode evoluir para danos mais significativos na cobertura, assim como se, em contato com a terra, poderá ocasionar uma falha [10].

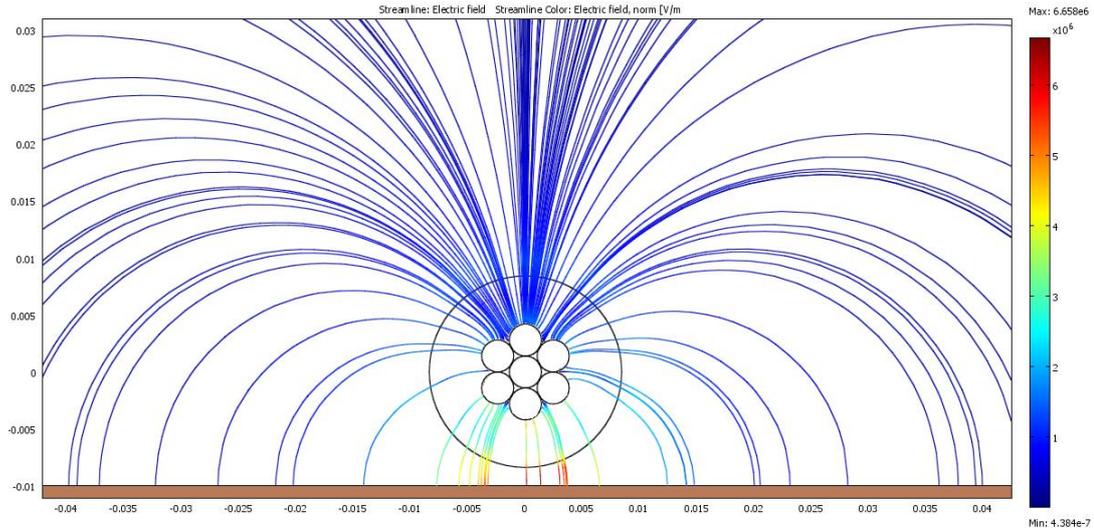


Figura 6.7 - Linhas de campo elétrico em um cabo a uma distância de 1 centímetro de um plano aterrado.

A Figura 6.8 a seguir apresenta o comportamento das linhas equipotenciais na cobertura de um cabo muito próximo ou até mesmo tocando em objetos ou planos aterrados. Conforme comentado no parágrafo anterior, a diferença de potencial sobre a superfície do cabo redundará em corrente que, por conseguinte, originará trilhamentos. Destarte, o cabo não deve permanecer por muito tempo em contato ou próximo de objetos aterrados, sob a pena de provocar a erosão da sua camada isolante, podendo inclusive gerar falhas permanentes nos caso de contato direto com a terra.

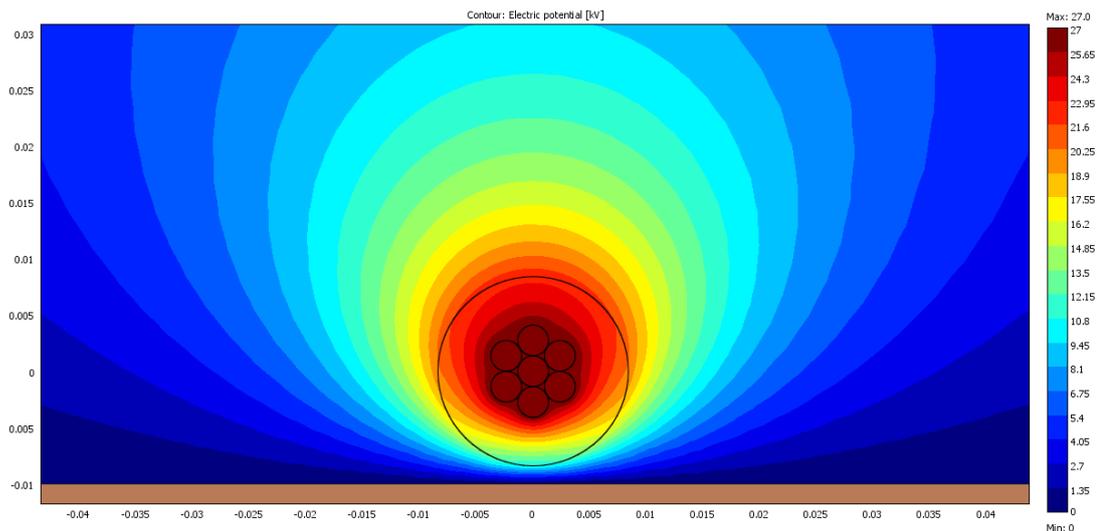


Figura 6.8 - Linhas equipotenciais em um cabo a uma distância de 1 centímetro de um plano aterrado.

Nas aplicações dos cabos nos sistemas “space cable”, é de grande relevância a redução do fluxo de corrente de fuga a um valor mínimo. Em uma análise mais precipitada, pode-se pensar somente em aumentar a espessura de isolamento do

cabo, reduzindo os gradientes de tensão na superfície externa. Contudo, é importante ressaltar que uma opção eventual pelo aumento da espessura vai implicar também na elevação dos custos subsequentes.

Todo o contato permanente das redes compactas quer com galhos de árvores, quer com quaisquer outros objetos aterrados, deve ser evitado. Deste modo é aconselhável a manutenção periódica, visando à detecção e à eliminação, se for o caso, de tais inconvenientes. No entanto, na prática, é verificado que muitas concessionárias estão com suas redes compactas operando muito próximas o até encostadas a galhos de árvores ou outros objetos/planos aterrados, consoante mostrado nas fotografias, a seguir, de situações reais em que foram encontradas redes compactas encostadas a objetos aterrados.



Figura 6.9 - Fotografia da vegetação encostada em uma rede compacta. Fonte:[20].

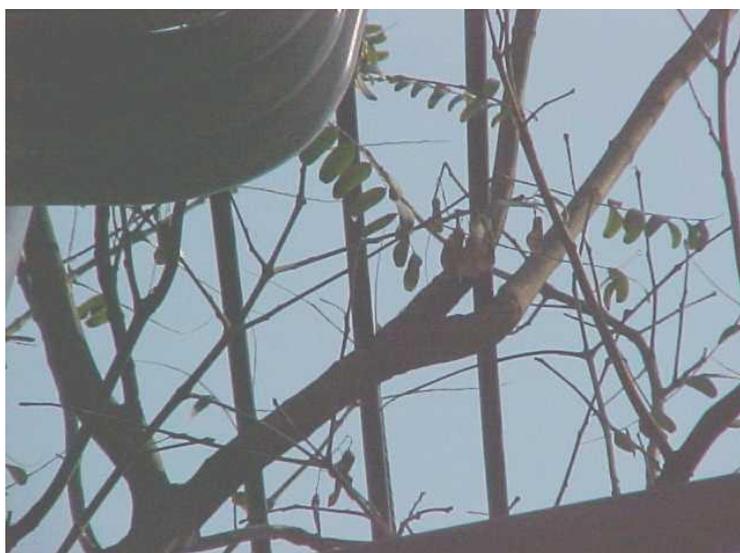


Figura 6.10 - Fotografia de galhos de uma árvore encostados em cabos cobertos. Fonte:[20].



Figura 6.11 - Fotografia de um galho encostado na rede compacta. Fonte:[20].



## CAPÍTULO 7 - O PROBLEMA DA EXCENTRICIDADE NOS CABOS

Neste capítulo são analisadas as possíveis complicações que podem surgir nos cabos cobertos, caso ocorra a presença de excentricidade nos mesmos.

Durante a manufatura dos cabos, uma das precauções a serem observadas é a de manter o condutor o mais concêntrico possível na cobertura isolante. E isto pode vir a ser uma das dificuldades de produção. A presença de excentricidade nos cabos pode provocar uma distribuição não uniforme dos gradientes de campo elétrico, levando à concentrações de campo na porção mais interior da cobertura do lado de maior espessura. Tal fato pode ser um fator gerador de falhas e da redução da vida útil dos cabos, visto que eles trabalharão com um maior nível de estresse elétrico.

A Figura 7.1 e a Figura 7.2 a seguir apresentam modelagens das situações onde o condutor está concêntrico e com a existência de excentricidade, respectivamente.

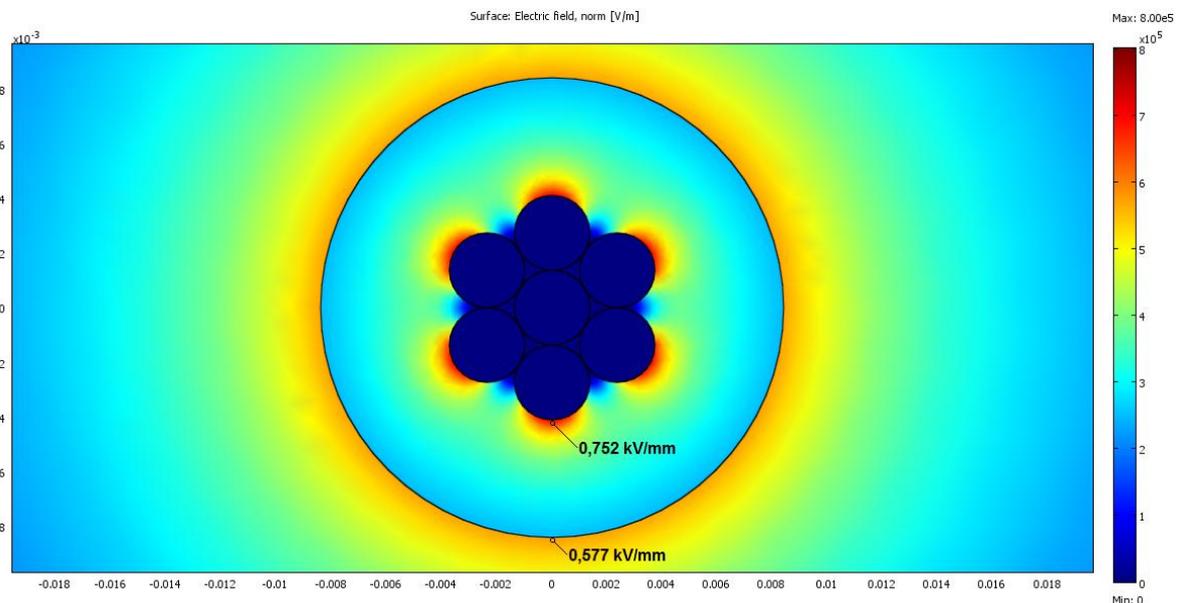
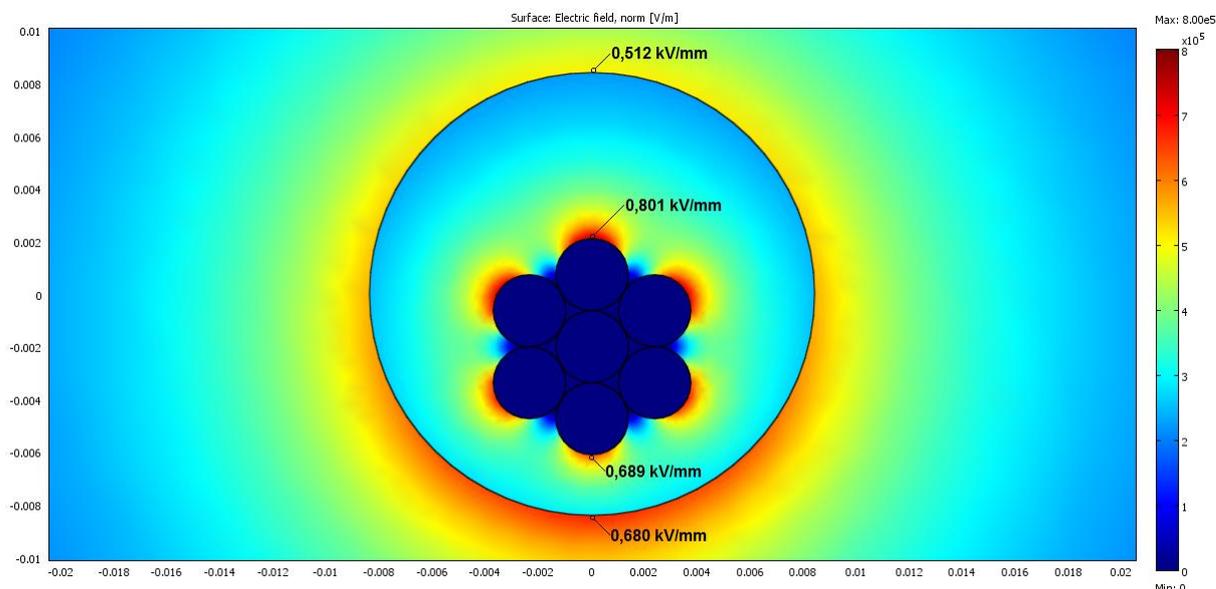


Figura 7.1 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo sem semicondutora e concêntrico.

Analisando, portanto, as modelagens, pode-se constatar a distribuição do campo elétrico não uniforme com a presença de excentricidade nos cabos. O problema pode, ainda, vir a ser agravado na hipótese do cabo encontrar-se próximo a objetos aterrados, bem como pode vir a ser amenizado com a inserção de uma

ALAN MELO NÓBREGA

camada semicondutora. A maior concentração de campo no interior da cobertura, em seu lado mais espesso, pode levar a perfuração do condutor. O aumento de gradiente de campo, na superfície externa do seu lado mais fino, pode facilitar o aparecimento de trilhamento elétrico na cobertura isolante.



**Figura 7.2 - Simulação do gradiente de campo elétrico normal em um cabo sem semicondutora e não concêntrico.**

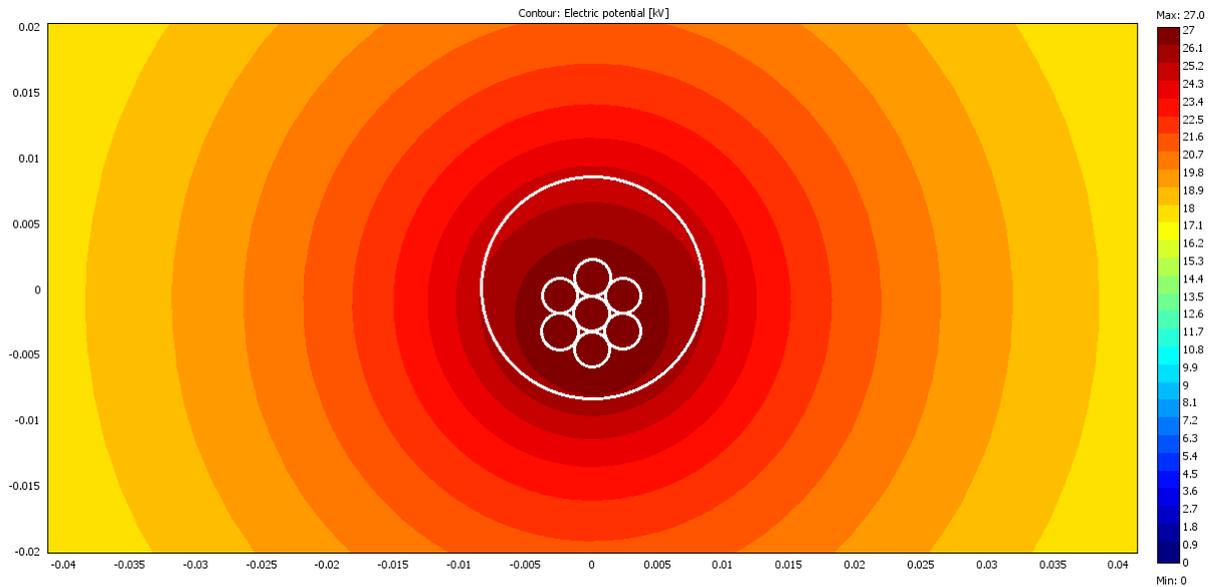
Na modelagem acima foi considerada uma excentricidade em que, a parte inferior teve uma redução de 46,5% da espessura original da cobertura, enquanto a superior foi aumentada neste mesmo valor. Isto representa um caso semelhante ao exposto em algumas das radioscopias digitais expostas no trabalho.

Outro problema gerado, em decorrência da excentricidade, é a diferença de potencial na superfície da cobertura dos cabos, conforme está demonstrado na Figura 7.3, que apresenta as linhas equipotenciais na região da cobertura do cabo com condutor excêntrico.

Observando a Figura 7.3, pode ser constatado que existem diferentes níveis de potencial elétrico na superfície da camada isolante do cabo. Tal problema, para os níveis de tensão mais baixos, pode ser reputado como insignificante, no entanto, à medida em que os níveis de tensão aumentam, o efeito torna-se preocupante.

Conforme discutido no Capítulo 6, esta diferença de potencial pode forçar a passagem de correntes sobre a superfície isolante dos cabos. Por menor que seja o fluxo de corrente, devido à alta resistência superficial dos cabos, há uma tendência a

aquecer a região e, por conseguinte, acarretar a formação de trilhas condutivas ou, até mesmo, à erosão da camada isolante.



**Figura 7.3 - Modelagem apresentando as linhas equipotenciais em um cabo com excentricidade.**

Durante os estudos empreendidos, foram preparadas 38 amostras de cabos virgens com aproximadamente 30 cm de comprimento, sendo duas amostras para cada modelo/fabricante. Foram realizados os ensaios de radiografia digital em todas as amostras, por intermédio dos quais pôde ser diagnosticada a presença de excentricidade em certa quantidade dos cabos. A título de demonstração, foram selecionados alguns dos resultados, tomando, como critério de seleção, o grau de excentricidade. Eles estão apresentados da Figura 7.4 a Figura 7.15, onde, do lado esquerdo, têm-se as fotografias dos cabos e, do lado direito, as radiografias digitais.



**Figura 7.4 - Peça 01 - 15 kV – 50 mm<sup>2</sup>**



**Figura 7.5 - Raio-X – Peça 01**



Figura 7.6 - Peça 02 - 15 kV - 50 mm<sup>2</sup>

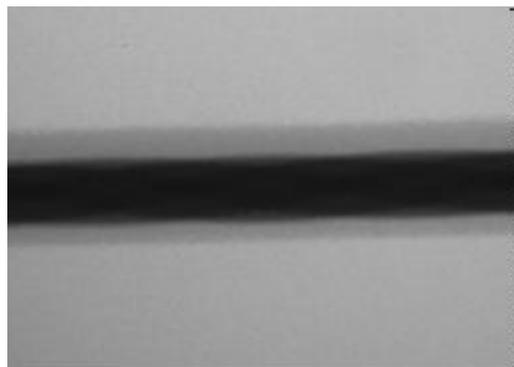


Figura 7.7 - Raio-X - Peça 02



Figura 7.8 - Peça 03 - 15 kV - 95 mm<sup>2</sup>

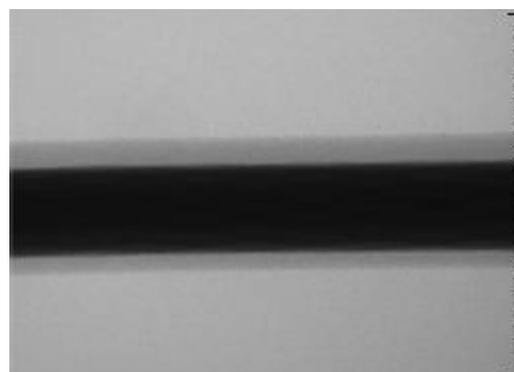


Figura 7.9 - Raio-X - Peça 03



Figura 7.10 - Peça 09 - 15 kV - 50 mm<sup>2</sup>

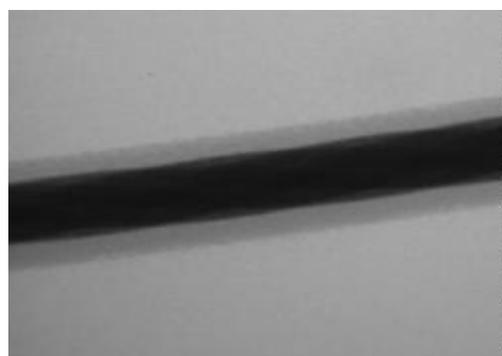


Figura 7.11 - Raio-X - Peça 09



Figura 7.12 - Peça 26 - 15 kV - 50 mm<sup>2</sup>

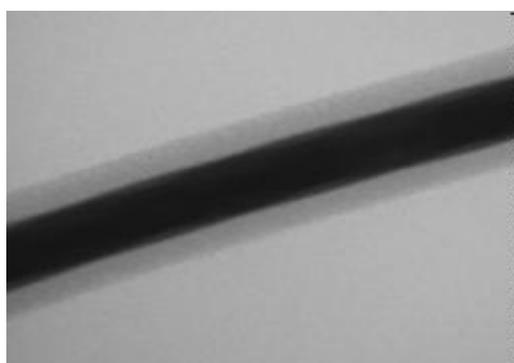


Figura 7.13 - Raio-X - Peça 26



Figura 7.14 - Peça 35 - 15 kV - 50 mm<sup>2</sup>

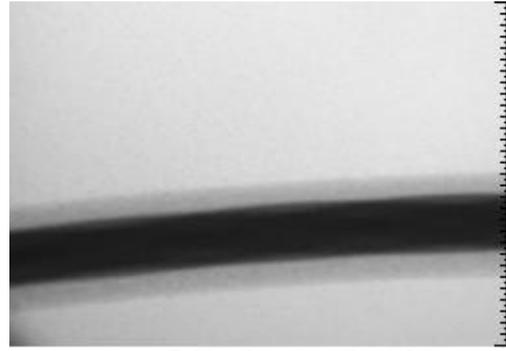


Figura 7.15 - Raio-X – Peça 35

Também foram preparadas 49 amostras de cabos, medindo, cada uma, 30 centímetros de comprimento, que apresentaram falhas durante os ensaios de compatibilidade dielétrica, executados conforme [5]. O critério utilizado para seleção destas amostras foi o aparecimento de falhas (perfurações), nas camadas isolantes, e estas devem acontecer em pontos distantes dos acessórios. Os exames de radioscopia foram realizados nas amostras, e os alguns dos resultados podem ser visualizados da

Figura 7.16 a Figura 7.27.



Figura 7.16 - Peça 58 - 25 kV - 95 mm<sup>2</sup>

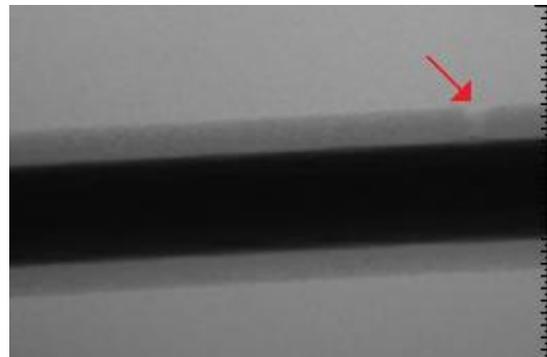


Figura 7.17 - Raio-X – Peça 58



Figura 7.18 - Peça 60 - 25 kV - 50 mm<sup>2</sup>

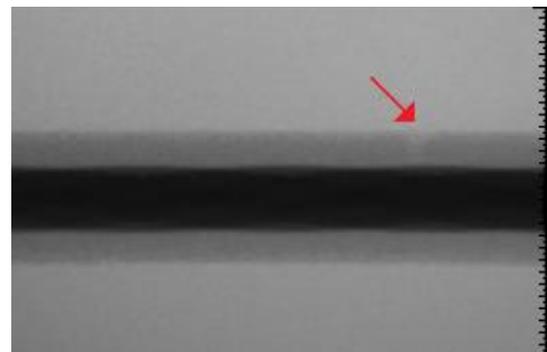


Figura 7.19 - Raio-X – Peça 60



Figura 7.20 - Peça 65 - 25 kV - 50 mm<sup>2</sup>

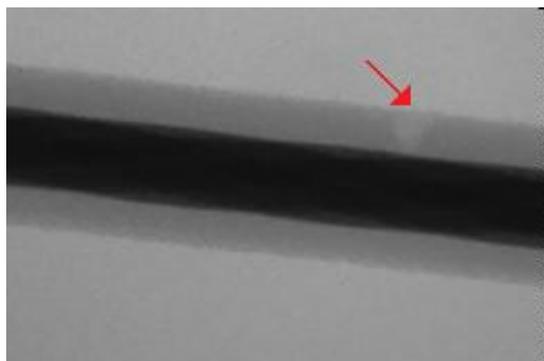


Figura 7.21 - Raio-X - Peça 65



Figura 7.22 - Peça 67 - 25 kV - 50 mm<sup>2</sup>

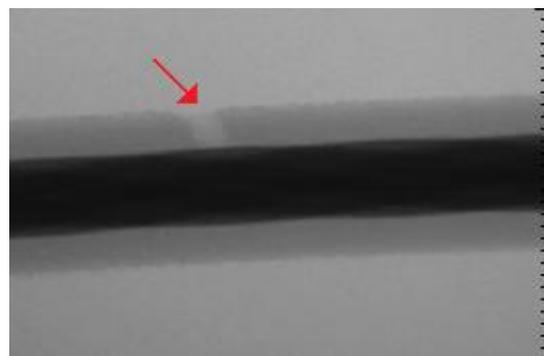


Figura 7.23 - Raio-X - Peça 67



Figura 7.24 - Peça 68 - 25 kV - 50 mm<sup>2</sup>

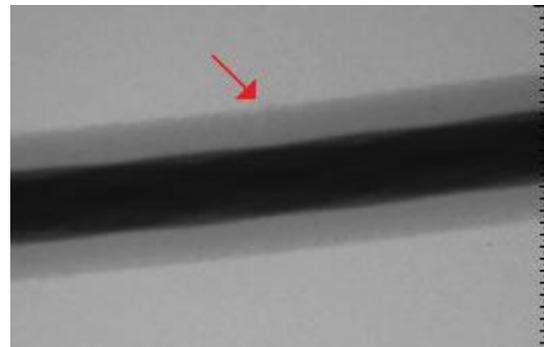


Figura 7.25 - Raio-X - Peça 68



Figura 7.26 - Peça 74 - 25 kV - 50 mm<sup>2</sup>

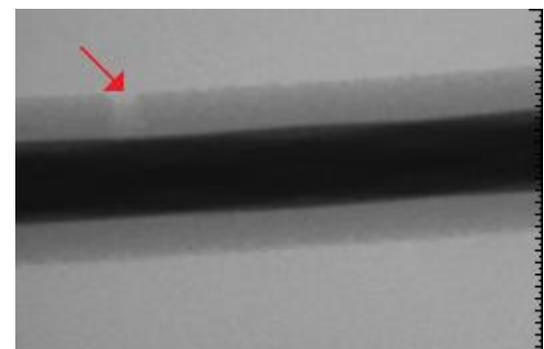


Figura 7.27 - Raio-X - Peça 74

De acordo com [1] as coberturas dos cabos deveriam estar perfeitamente justapostas e concêntricas em relação ao condutor, porém removíveis a frio, bem como não devem existir vazios entre o condutor e cobertura ao longo de todo o seu comprimento. Por conseguinte, os exemplos de cabos apresentados neste capítulo estão em flagrante desarmonia com a normatização vigente.

Analisando as radioscopias, conclui-se que o perfil das perfurações, que ocorreram nos cabos, foi na sua maioria, em pontos distantes dos acessórios, descartando, portanto, a possibilidade de ter sido decorrente de alguma incompatibilidade dielétrica entre a cobertura dos cabos e os seus acessórios. Por conseguinte, julgam-se as gotas de água, sobre a superfície do cabo durante a chuva, como o único elemento capaz de gerar incompatibilidade em tais pontos.

Verificou-se também que as referidas falhas têm a tendência de ocorrerem em cabos não concêntricos e na porção mais espessa do cabo. A partir desta constatação, deduz-se como um dos fatores justificantes das falhas, a ocorrência, nesta região, de uma maior concentração de gradiente de campo, consoante se visualiza na Figura 7.2.

O aumento do estresse de tensão, em virtude da excentricidade, favorece também o surgimento de arborescências elétricas que erodem o cabo. A presença, na região, de outros fatores, que venham a contribuir com a erosão dos cabos, aumentam, a probabilidade do fenômeno arborescente acontecer.

A excentricidade nos cabos concorre, também, para o surgimento de trilhamentos elétricos, embora este fato não tenha sido devidamente verificado nos ensaios realizados. Destarte, caso a falha venha a ocorrer, próxima ao berço de isoladores ou espaçadores, ela poderá ser confundida com problemas de compatibilidade dielétrica, quando, no entanto, a mesma pode decorrer da soma de vários fatores.



## **CAPÍTULO 8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **8.1. CONCLUSÕES**

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou o aprofundamento no estudo de potenciais problemas capazes de gerar muitas das falhas em redes aéreas compactas, levando a um maior conhecimento técnico sobre o funcionamento destas redes em campo ou em ensaios de laboratório.

Dentro deste contexto os problemas de compatibilidade dielétrica devem ser notoriamente levados em consideração, pois são eles os causadores de muitas das falhas nos sistemas de redes compactas. Entretanto, deve-se salientar que este não é o único problema passível de gerar falhas.

Para a utilização de acessórios, com constantes dielétricas muito diferentes das que o polietileno possui, torna-se conveniente realizar um estudo acerca dos gradientes de campo elétrico, verificando se os valores são suportáveis ou não. Também é importante lembrar que um acessório que trabalha bem em uma classe de tensão, pode não ter o mesmo desempenho em tensões mais elevadas.

É conveniente, ainda, durante o projeto de um espaçador, verificar como a água flui sobre sua superfície durante a chuva, pois o seu desenho geométrico pode facilitar o caminho da corrente de fuga quando molhado.

Além disso, foi verificado que a presença de uma camada semicondutora consegue reduzir os gradientes de campo elétrico concentrados no interior do cabo, e esta redução é da ordem de aproximadamente 38,5%. Os resultados estão de acordo com estudos anteriores já publicados na literatura, como no estudo da empresa Hendrix [32] no qual os cabos com semicondutora necessitaram de 41% a mais de tensão elétrica para que ocorresse a ruptura do isolamento. Entretanto, é necessário verificar que, a adição da camada semicondutora tem que ser feita sem a redução da isolação do cabo.

Durante as instalações de redes compactas, deve ser verificada a existência de objetos aterrados demasiadamente próximos, pois estes provocam acréscimo nos valores de campo elétrico, facilitando um aumento dos índices de falhas. Para o

caso de o objeto estar em contato direto com o isolamento do cabo, também haverá um aumento da corrente de fuga que facilitará a formação de trilhamento elétrico.

Com tudo isso, portanto, durante a aquisição dos cabos é conveniente que seja exigida dos fabricantes que o condutor esteja perfeitamente concêntrico com a cobertura isolante, pois, conforme visto no Capítulo 7, a presença de excentricidade nos cabos provoca aumento dos gradientes de campo elétrico na cobertura, facilitando rupturas. Este tipo de problema também implica na diferença de potencial na superfície da cobertura, favorecendo a passagem de correntes sobre a mesma que conseqüentemente originarão trilhamento elétrico ou erosão.

## 8.2. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A título de sugestão para trabalhos futuros são citados os possíveis trabalhos a seguir:

- Análise do desempenho das redes compactas frente ao envelhecimento físico-químico do material polimérico utilizado nos acessórios e na cobertura dos cabos cobertos.
- Análise e avaliação acerca dos impactos da geometria dos acessórios, utilizados na rede compacta, na confiabilidade e rendimento. Verificando possíveis fatores contribuintes de falhas e soluções para os mesmos.

## BIBLIOGRAFIA

### BIBLIOGRAFIA PRODUZIDA

- [1] NOBREGA, A. M.; SALLES, C.; MARTINEZ, M. L. B.; DINIZ, A. M. M.; NUNES, A. A.; BATISTA, E. L.; OLIVEIRA, H. R. P. M.; UCHOA, J. I. L. **Impactos da Presença de Uma Camada Semicondutora em Cabos Cobertos Utilizados na Redes Compactas**. V CITTES - V Congreso Internacional sobre "Trabajos con Tensión y Seguridad en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica y Mantenimiento sin Tensión de Instalaciones de AT", 2011, SALTA. V CITTES, 2011.
- [2] SALLES, C.; NOBREGA, A. M.; MARTINEZ, M. L. B.; BATISTA, E. L.; UCHOA, J. I. L.; OLIVEIRA, H. R. P. M. **Dielectric Compatibility of Distribution Network Spacer System**. CIRED, 2011, FRANKFURT. CIRED, 2011.
- [3] SALLES, C.; NOBREGA, A. M.; MARTINEZ, M. L. B.; BATISTA, E. L.; UCHOA, J. I. L.; OLIVEIRA, H. R. P. M. **Compatibilidade Dielétrica nas Redes de Distribuição Spacer de 25 kV**. VI CITENEL, 2011, Fortaleza. VI CITENEL, 2011.

### BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11873. Cabos Cobertos com Material Polimérico Para Redes Aéreas Compactas de Distribuição em Tensões de 13,8 kV a 34,5 kV. Rio de Janeiro, 2003.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10296. Material Isolante Elétrico: Avaliação de Sua Resistência ao Trilhamento Elétrico e a Erosão Sob Severas Condições Ambientais. Rio de Janeiro, 1988.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8881. Fios e Cabos Elétricos de Potência ou Controle - Ensaio de Tensão Elétrica. Rio de Janeiro, 1981.

- [4] Especificação de Cabos Cobertos para Rede Compacta de 13,8 kV a 34,5 kV. Rio de Janeiro: ABRADDEE, s.d. (CODI-3.2.18.23.x).
- [5] Especificações de Espaçador, Separador e Amarrações para Rede compacta 13,8 kV a 34,5 kV. Rio de Janeiro: ABRADDEE, s.d. (CODI-3.2.18.24.1).
- [6] Especificação de Isoladores Tipo Pino Polimérico para Rede Compacta de 13,8 kV a 34,5 kV. Rio de Janeiro: ABRADDEE, s.d. (CODI-3.2.18.27.1).
- [7] Especificação de Isoladores Poliméricos de Ancoragem para Redes Compactas e Convencionais de 13,8 kV e 34,5 kV. Rio de Janeiro: ABRADDEE, s.d. (CODI-3.2.18.28.1).
- [8] Especificação de Acessórios para Rede Compacta de 13,8 kV e 34,5 kV. Rio de Janeiro: ABRADDEE, s.d. (CODI-3.2.18.xx.0).
- [9] Especificação de Ferragens para Rede Compacta de 13,8 kV e 34,5 kV. Rio de Janeiro: ABRADDEE, s.d. (CODI-3.2.18.26.1)
- [10] THUE, William A. **Electrical Power Cable Engineering**. Second Edition, Revised an Expanded. Marcel Dekker, Inc.
- [11] SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. Trad. Liane Ludwig Loder e Jorge Amoretti Lisboa. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [12] SCHMIDT, W. **Materiais Elétricos. Vol. 2 Isolantes e Magnéticos**. 2.ed. São Paulo: Blucher, 1979.
- [13] REZENDE, E. da Motta. **Materiais Usados em Eletrotécnica**. 1.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.
- [14] 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**. São Paulo. 247p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.
- [15] SILVA, Cuiherme C. **Comportamento Elétrico e Dielétrico de Cabos de Potência Extrudados Utilizados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Paraná. 138p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2000.
- [16] WASILKOSKI, C. M. **Caracterização do Polietileno de Baixa Densidade Através da Técnica de Análise Dinâmico-Mecânica e Comparação com a**

**Análise por Impedância Dielétrica.** Paraná. 116p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2002.

[17] FAGUNDES, R. C. **Avaliação de Acessórios Poliméricos de Redes Compactas Protegidas por Meio de Ensaio de Multiestressamento e Simulação Computacional.** Paraná. 90p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2008.

[18] RAIKOS, G. **Development of the Hendrix Polyethylene Pin Type Insulator.** ECNE T&D Committee Meeting No. 67.

[19] SLADE, H. B. **Three Phase Measurements of Charging Currents on Spacer Cable Systems Under Simulated Service Conditions.** IEEE Winter Power Meeting, New York, January 25-30, 1970.

[20] RONCOLATTO, R. A. **Apresentação “Sistemas Elétricos com Redes Protegidas – Características Técnicas”.** SIPASE – Seminário Internacional de Planejamento Urbano, Arborização e Sistemas Elétricos, Belo Horizonte, agosto de 2010.

[21] DUARTE, J. V. P. **Danos à Camada Isolante de Cabos em Redes não Blindadas devido a Distorções do Campo Elétrico na Proximidade de Objetos Aterrados.** Trabalho da disciplina Teoria Eletromagnética, PPGEE, UFMG.

[22] MUNARO, M.; PIAZZA, F.; de SOUZA, R. G. P.; FERACIN, J.; TOMIOKA, J.; RUVOLO, A.; LINERO, L. E. **Fatores de Influência na Compatibilidade de Cabos Protegidos, Isoladores e Acessórios Utilizados em Redes Aéreas Compactas de Distribuição de Energia Elétrica, sob Condições de Multi-estressamento.** II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2003, p.555-560.

[23] MENDONÇA, P. L.; SHINOHARA, A. H. **A Experiência da Celpe no Uso da Radiografia Digital como Técnica de Diagnóstico de Falhas em Materiais Poliméricos.** SBSE 2010 – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém, PA. 2010.

[24] QUEIROZ, I. B.; NERI, M. G. G.; COSTA, E. G. **Mapeamento do Campo Elétrico em Isoladores Poliméricos com Defeitos.** SBSE 2006 – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, PB. 2006.

- [25] HARTMANN, L. C.; LINERO, L. E.; CUNHA, G.; PIAZZA, F.; MUNARO, M. **Desenvolvimento de Nova Metodologia para Avaliação de Equipamentos e Acessórios de Redes Protegidas sob Condições de Multiestressamento.** Espaço Energia, n. 9, p.13-20. Outubro de 2008.
- [26] PALUDO, R. **Refletometria no Domínio do Tempo: Análise do Efeito das Camadas Semicondutoras de Cabos Isolados.** Paraná. 76p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2009.
- [27] de MELLO, D. R.; GONZALEZ, E. G. C. **Redes Compactas de Distribuição – O Problema da Compatibilidade Dielétrica.** CIDEL 2006 - Congreso Internacional de Distribución Eléctrica, Argentina. 2006.
- [28] SMITH, N. A. **Design Considerations of Spacers for Aerial Spacer Cable.** IEEE Transactions on Electrical Insulation. V. 4, n. 1, p.12-17. Março de 1969.
- [29] SLADE, H. B.; ALTHAUS, R. H.; SMITH, N. A. **Discussions of Design Considerations of Spacers for Aerial Spacer Cable.** IEEE Transactions on Electrical Insulation. Junho de 1969.
- [30] HENDRIX WIRE & CABLE. **Two Layers vs. one Layer of Cable Covering / Insulation for Overhead Cables.** Tip – Technical Information Paper. Outubro de 1999.
- [31] HENDRIX WIRE & CABLE. **Conductor Shields for Overhead Cables.** Tip – Technical Information Paper. Agosto de 1999.
- [32] MKACHER , I.; BRUMENT , Y.; MURIN, V.; SELLIER, I.; COLIN, X. **Methodology for Evaluating the Durability of HDPE Outer Sheaths of Underground Electric Cables.** CIRED 2011 - 21<sup>st</sup> International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 2011.
- [33] MOLINA, F. H.; VOLPONI, J. E.; ANGELINI, J. M. G.; DADAM, A. P.; MEYER, L. H. **Degradation Studies of Polymeric Insulators – Products Performance Requirements.** CIRED 2011 - 21<sup>st</sup> International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 2011.

# **ANEXO I**



## ANEXO I

### ACESSÓRIOS UTILIZADOS NO SISTEMA DAS REDES COMPACTAS

#### Braço Tipo L



Figura Al.1 - Fotografias de braço tipo L utilizado nas redes compactas.

#### Braço Tipo C



Figura Al.2 - Fotografias de braço tipo C utilizado nas redes compactas.

#### Suporte Horizontal

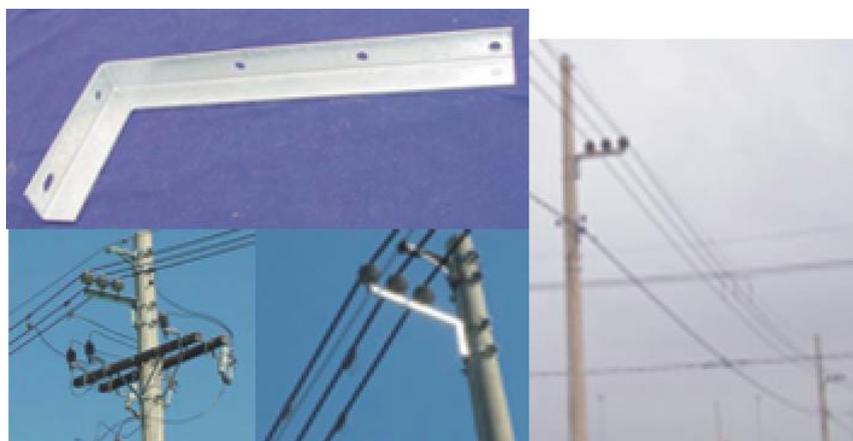


Figura Al.3 - Fotografias de suporte horizontal utilizado nas redes compactas.

Estribo Para Braço Tipo L



Figura A1.4 - Fotografias de estribo para braço tipo L utilizado nas redes compactas.

Suporte Z

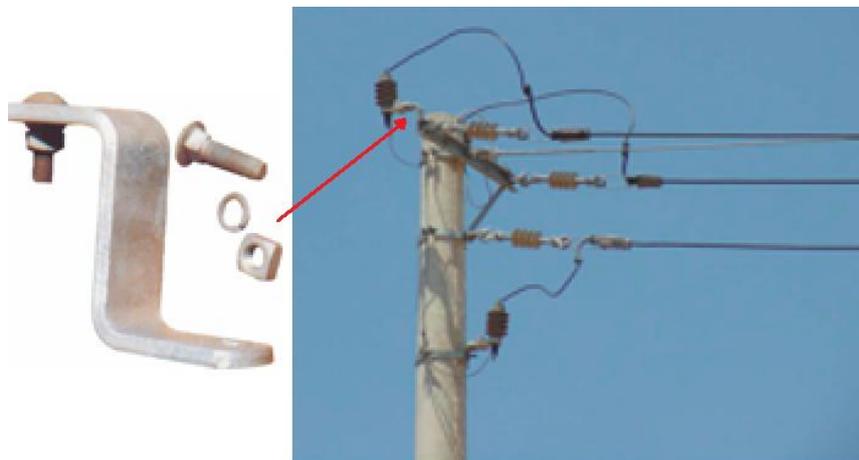


Figura A1.5 - Fotografias de suporte Z utilizado nas redes compactas.

Espaçador Losangular



Figura A1.6 - Fotografias de espaçador losangular utilizado nas redes compactas.

### Braço Anti-balanço



Figura A1.7 - Fotografias de braço anti-balanço utilizado nas redes compactas.

### Grampo de Ancoragem Polimérico



Figura A1.8 - Fotografias de grampo de ancoragem polimérico utilizado nas redes compactas.

### Separador Vertical

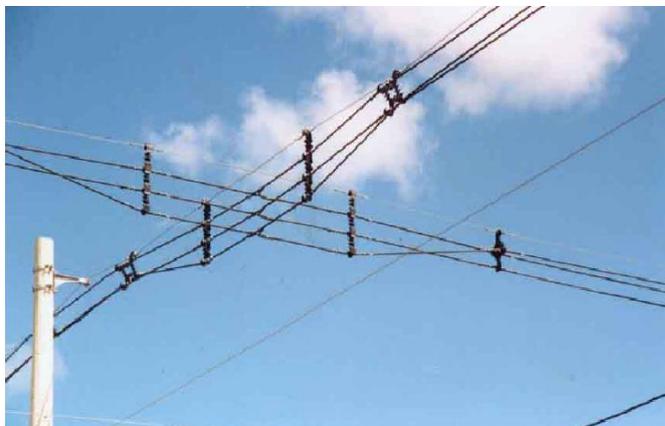


Figura A1.9 - Fotografias de separador vertical utilizado nas redes compactas.

Isolador Polimérico Tipo Pino



Figura AI.10 - Fotografias de isolador polimérico tipo pino utilizado nas redes compactas.

Anel Amarração Isolador Pino e Espaçador



Figura AI.11 - Fotografias de anel de amarração utilizado nas redes compactas.

Isolador de Ancoragem Polimérico



Figura AI.12 - Fotografias de isolador de ancoragem polimérico utilizado nas redes compactas.

### Laço Pré-formado para Mensageiro

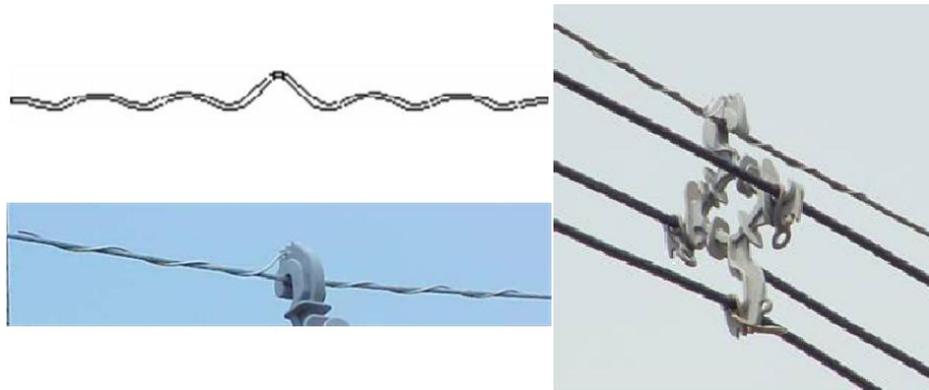


Figura AI.13 - Fotografias de laço pré-formado para mensageiro utilizado nas redes compactas.

### Perfil U

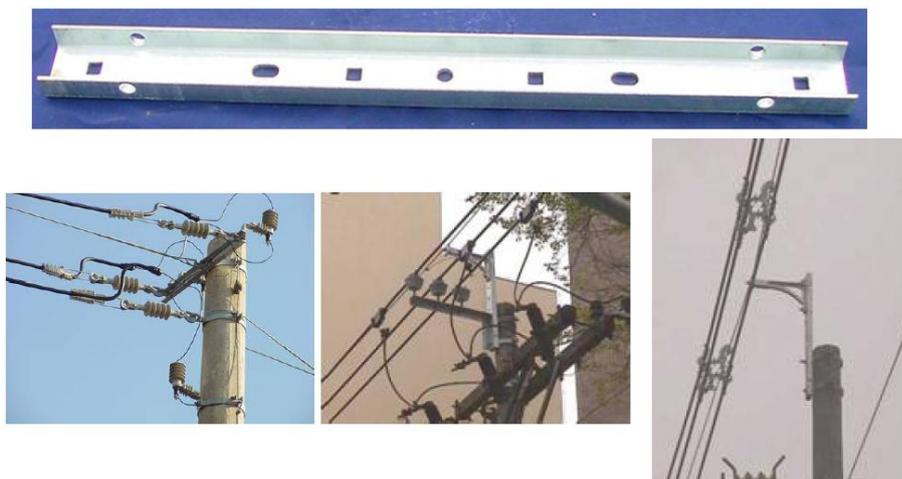


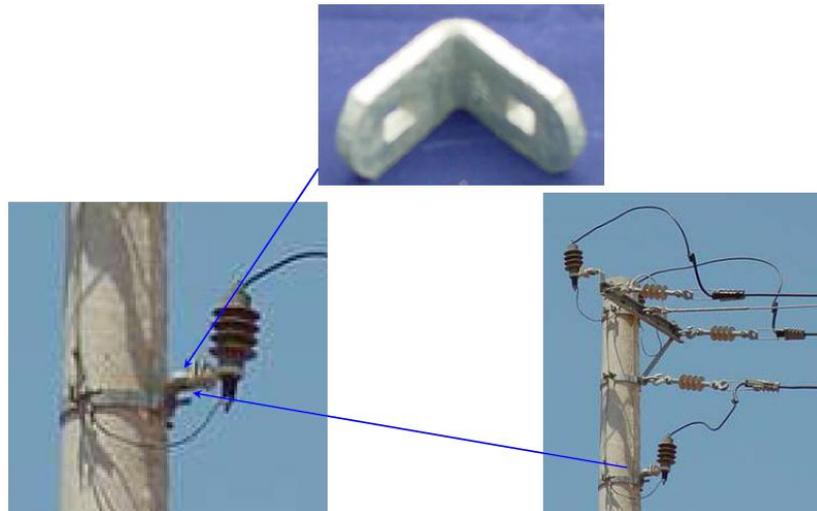
Figura AI.14 - Fotografias de perfil U utilizado nas redes compactas.

### Cantoneira Auxiliar



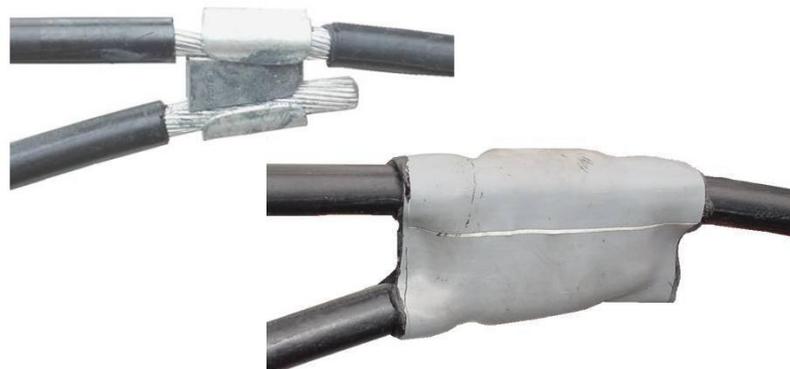
Figura AI.15 - Fotografias de cantoneira auxiliar utilizada nas redes compactas.

### Cantoneira Reta



**Figura Al.16 - Fotografias de cantoneira reta utilizada nas redes compactas.**

### Conector Tipo Cunha Alumínio / Cobertura Para Emenda e Conector Cunha



**Figura Al.17 - Fotografias de conector tipo cunha utilizado nas redes compactas.**

### Luva de Emenda com Tensão a Compreensão / Cobertura Para Emenda e Conector Cunha



**Figura Al.18 - Fotografias luva de emenda e cobertura para emenda utilizadas nas redes compactas.**

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] RONCOLATTO, R. A. **Sistemas Elétricos com Redes Protegidas – Características Técnicas**. Apresentação do SIPASE 2010 – Seminário Internacional de Planejamento Urbano, Arborização e Sistemas Elétricos. 2010.



## **ANEXO II**



## ANEXO II

Na Tabela All.1 a seguir são apresentados os valores dos diâmetros internos e externos, dos cabos cobertos, lidos com um paquímetro digital.

Tabela All.1 - Planilha com os valores lidos dos diâmetros internos e externos

Tipo de Cabo	D <sub>i1</sub> (mm)	D <sub>i2</sub> (mm)	D <sub>i</sub> médio (mm)	D <sub>e1</sub> (mm)	D <sub>e2</sub> (mm)	D <sub>e3</sub> (mm)	D <sub>e4</sub> (mm)	D <sub>e</sub> médio (mm)	$\frac{(D_e - D_i)}{2}$
Cabo A - 15 kV 50 mm <sup>2</sup>	7,96	7,94	7,95	14,43	14,37	14,35	14,35	14,37	3,21
Cabo A - 15 kV 50 mm <sup>2</sup> Semicondutora	7,99	7,96	7,97	15,19	15,19	15,10	15,18	15,16	3,60
Cabo A - 15 kV 95 mm <sup>2</sup>	11,35	11,37	11,36	17,18	17,12	17,14	17,16	17,15	2,90
Cabo A - 15 kV 95 mm <sup>2</sup> Semicondutora	11,43	11,50	11,46	18,21	18,23	18,22	18,23	18,22	3,38
Cabo A - 25 kV 50 mm <sup>2</sup>	8,02	8,16	8,09	17,25	17,36	17,28	17,33	17,30	4,61
Cabo A - 25 kV 50 mm <sup>2</sup> Semicondutora	8,16	8,21	8,18	17,29	17,27	17,30	17,26	17,28	4,55
Cabo A - 25 kV 95 mm <sup>2</sup>	11,35	11,50	11,42	18,88	18,74	18,80	18,89	18,83	3,70
Cabo A - 25 kV 95 mm <sup>2</sup> Semicondutora	11,42	11,43	11,43	20,00	19,99	20,01	20,09	20,02	4,30
Cabo B - 15 kV 50 mm <sup>2</sup>	8,29	8,35	8,32	14,75	14,77	14,71	14,72	14,74	3,21
Cabo B - 15 kV 95 mm <sup>2</sup>	12,09	12,08	12,09	17,84	17,98	17,97	18,06	17,96	2,94
Cabo B - 25 kV 50 mm <sup>2</sup>	8,33	8,34	8,34	15,76	15,66	15,67	15,66	15,69	3,68
Cabo B - 25 kV 95 mm <sup>2</sup>	12,06	12,02	12,04	19,76	19,64	19,62	19,77	19,70	3,83
Cabo C - 15 kV 50 mm <sup>2</sup>	8,23	8,24	8,23	14,44	14,47	14,46	14,46	14,46	3,11
Cabo C - 15 kV 95 mm <sup>2</sup>	11,67	11,65	11,66	17,81	17,78	17,70	17,76	17,76	3,05
Cabo C - 25 kV 50 mm <sup>2</sup>	8,23	8,29	8,26	16,84	16,88	16,91	16,93	16,89	4,31
Cabo C - 25 kV 95 mm <sup>2</sup>	11,71	11,76	11,73	20,16	20,17	20,15	20,19	20,16	4,22
Cabo D - 15 kV 50 mm <sup>2</sup>	8,22	8,12	8,17	14,62	14,55	14,60	14,66	14,61	3,22
Cabo D - 15 kV 95 mm <sup>2</sup>	11,51	11,50	11,50	17,92	17,78	17,82	17,87	17,85	3,17
Cabo D - 25 kV 50 mm <sup>2</sup>	7,85	7,91	7,88	15,85	15,77	15,94	15,97	15,88	4,00
Cabo D - 25 kV 95 mm <sup>2</sup>	11,60	11,50	11,55	19,72	19,72	19,79	19,94	19,79	4,12
Cabo E - 15 kV 50 mm <sup>2</sup>	7,93	7,91	7,92	14,81	14,90	14,98	14,99	14,92	3,50
Cabo E - 15 kV 95 mm <sup>2</sup>	11,47	11,40	11,43	18,00	17,48	18,44	17,59	17,87	3,22
Cabo E - 25 kV 50 mm <sup>2</sup>	7,91	7,93	7,92	15,50	15,53	15,56	15,49	15,52	3,80
Cabo E - 25 kV 95 mm <sup>2</sup>	11,45	11,45	11,45	19,87	19,79	19,80	19,80	19,81	4,18
Cabo F - 15 kV 50 mm <sup>2</sup>	8,05	8,09	8,07	14,55	14,50	14,47	14,55	14,52	3,22
Cabo F - 15 kV 95 mm <sup>2</sup>	11,59	11,61	11,60	18,15	18,29	17,75	17,85	18,01	3,21



## **ANEXO III**



## ANEXO III

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas medições de isolamento realizadas nos cabos cobertos.

Tabela AIII.1 - Medição do isolamento de cabos 15 kV.

<b>CABOS 15 kV</b>				
<b>TIPO DE CABO</b>	<b>Amostras</b>			
	<b>Amostra I (GΩ)</b>	<b>Amostra II (GΩ)</b>	<b>Amostra III (GΩ)</b>	<b>Média (GΩ)</b>
<b>Cabo A - 15 kV 50mm</b>	117,7	116,9	117,8	117,5
<b>Cabo A - 15 kV 50mm Semicondutora</b>	109,5	106,2	102,4	106,0
<b>Cabo A - 15 kV 95mm</b>	84,7	88,8	77,9	83,8
<b>Cabo A - 15 kV 95mm Semicondutora</b>	81,3	77,7	81,6	80,2
<b>Cabo B - 15 kV 50mm</b>	114,1	114,6	110,2	113,0
<b>Cabo B - 15 kV 95mm</b>	76,1	78,6	80,9	78,5
<b>Cabo C - 15 kV 50mm</b>	117,5	116,6	102,9	112,3
<b>Cabo C - 15 kV 95mm</b>	82,8	83,4	85,4	83,9

Tabela AIII.2 - Medição do isolamento de cabos 25 kV.

<b>CABOS 25 kV</b>				
<b>TIPO DE CABO</b>	<b>Amostras</b>			
	<b>Amostra I (GΩ)</b>	<b>Amostra II (GΩ)</b>	<b>Amostra III (GΩ)</b>	<b>Média (GΩ)</b>
<b>Cabo A - 25 kV 50mm</b>	160,0	143,8	155,0	152,9
<b>Cabo A - 25 kV 50mm (semicondutora)</b>	110,0	28,3	90,3	76,2
<b>Cabo A - 25 kV 95mm</b>	113,9	102,8	103,8	106,8
<b>Cabo A - 25 kV 95mm (semicondutora)</b>	15,3	94,7	79,4	63,1
<b>Cabo B - 25 kV 50mm</b>	126,0	136,2	126,0	129,4
<b>Cabo B - 25 kV 95mm</b>	106,0	109,7	102,1	105,9
<b>Cabo C - 25 kV 50mm</b>	138,0	129,5	147,8	138,4
<b>Cabo C - 25 kV 95mm</b>	115,2	105,8	102,9	108,0



# APÊNDICE A



## APÊNDICE A

### AA.1. MATERIAIS ISOLANTES ELÉTRICOS

O texto deste apêndice é uma tradução de partes do livro “Electrical Power Cable Engineering”.

Os materiais isolantes elétricos são utilizados para promoverem a isolação nos condutores metálicos dos cabos. A isolação protege os condutores e propicia uma margem de segurança. Estes isolantes geralmente são compostos por polímeros sintéticos ou naturais. O material isolante utilizado pode variar de acordo com a classe de tensão do cabo. As blindagens de poliméricos compatíveis também podem ser empregadas, estas são compostas de polímeros flexíveis misturados com negro de fumo (carbon black) adquirindo características semicondutivas. As características de alguns dos isolantes, muito utilizados em cabos, contam na Tabela AA.1 a seguir.

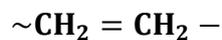
Tabela AA.1 - Característica de materiais isolantes. Fonte:[10].

TIPO DE ISOLANTE	PROPRIEDADES
PE (Polietileno de baixa densidade)	- Baixas perdas dielétricas; - Sensível a umidade sob Estresse de tensão.
XLPE (Polietileno Reticulado)	- Perdas dielétricas ligeiramente menores que as do PE; - Envelhecimento melhor do que o do PE; - Menos sensível a umidade.
EP (EPR/EPDM)	- Perdas dielétricas maiores do que as do XLPE ou TR-XLPE; - Mais flexível; - Menos sensível a umidade do que o XLPE e o PE; - Requer cargas inorgânicas.
TR-XLPE	- Similar ao XLPE, mas com perdas ligeiramente maiores devido aos aditivos; - Perdas menores que as do EPR; - Melhor envelhecimento do que o XLPE; - Menos sensível a umidade.
PILC	- Alta confiabilidade; - Possui revestimento.
PVC	- Contem um plastificante para a flexibilidade; - Altas perdas dielétricas; - Não queima, mas gera gases tóxicos.

## AA.1.1. Fundamentos de Polímeros Extrudados Empregados em Isolação Elétrica

## AA.1.1.1. Polietileno (PE)

Polietileno é um polímero de hidrocarbonetos que é composto exclusivamente de carbono e hidrogênio. Ele é manufaturado a partir de um etileno monômero por sua vez, derivado da quebra do petróleo, conforme pode ser visualizado a seguir. Note que a estrutura química é uma série de repetidas unidades de  $-CH_2-$ .

Gás Etileno
$$->$$
Polietileno Sólido

O polietileno está na classe de polímeros ditos como poliolefinas. As propriedades, que são consideradas chave, são o peso molecular, a distribuição de peso molecular, a ramificação, a reticulação e a cristalinidade.

O método de produção do polietileno controla se ele será de "alta densidade", "densidade média", "baixa densidade" ou "baixa densidade linear", que são termos comumente empregados na indústria de cabos. A densidade é a medida de cristalinidade e é um fator que determina qual o tipo de polietileno específico é aplicável em um determinado isolamento, material semiconductor ou material de blindagem. O método de manufatura controla também a exata estrutura química, que por sua vez, controla as propriedades.

A estrutura carbono-hidrogênio, acima demonstrada, está muito simplificada, visto que a estrutura química do polietileno é, na verdade, mais complexa do que a exposta atrás. Por exemplo, existem ramificações ligadas às cadeias principais. Além disso, haverá sempre uma quantidade muito pequena de oxidação dos produtos (carbono-oxigênio) que se forma durante o processo de extrusão. Estes problemas são considerados de pequena monta e sem nenhuma significação prática, levando-se em conta as excelentes propriedades elétricas obtidas.

Para simplificar, o polímero será descrito como uma linha ondulada, conforme mostrado na Figura AA.1 abaixo.

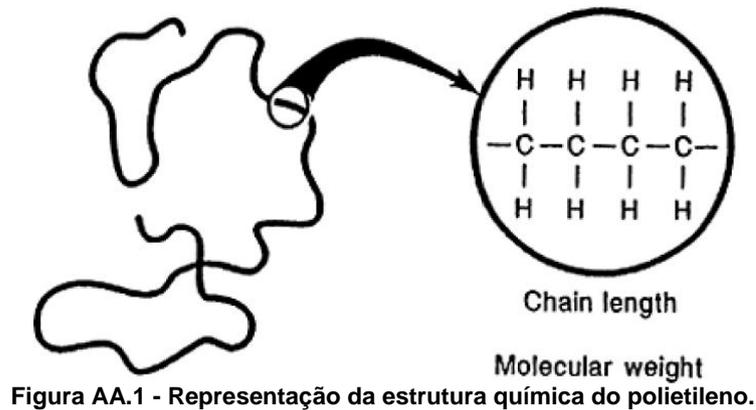


Figura AA.1 - Representação da estrutura química do polietileno.

A linha ondulada é referida como uma "cadeia" e o comprimento desta cadeia será reputado como significativo. O comprimento da cadeia está relacionado ao peso molecular. Uma longa cadeia de polietileno tem um peso molecular maior do que uma mais curta. O peso molecular aumenta à medida que o número de grupos de etileno na molécula se eleva. O polietileno convencional é formado por numerosas cadeias deste tipo, sendo bastante variável o comprimento das cadeias de moléculas individuais. Assim, na realidade, o polietileno é composto de cadeias de polímeros que têm uma distribuição de pesos moleculares (comprimentos de cadeia). De fato, a distribuição do peso molecular é um meio de caracterizar o polietileno. No passado, era empregado o material polimérico, que é descrito como o "polietileno de alto peso molecular" ou HMVPE, para o isolamento, com polietileno, em cabos de média tensão. Com isso, conclui-se que o comprimento médio das cadeias é considerado elevado. Outra generalização deduzida é que, quanto maior for o peso molecular, melhor serão as propriedades em geral. Os polietilenos típicos que têm sido empregados para isolamento elétrico contêm uma variedade de cadeias individuais de diferentes comprimentos, ou seja, de pesos. Portanto, é facilmente percebível, no mercado, a disponibilidade de uma grande variedade de tipos de PE, porém se faz necessário acrescentar que todos eles apresentam variações tanto em relação à média do peso molecular quanto às ramificações.

O peso médio molecular pode ser descrito de várias maneiras. Os termos empregados na maioria das vezes são o peso médio e o número médio do peso molecular. Estes valores são encontrados a partir de diferentes métodos matemáticos da média dos pesos moleculares em amostras de polímero possuindo moléculas de tamanhos diferentes. As definições matemáticas do número e do peso

médio estão relacionadas com os tamanhos menores e maiores das moléculas, respectivamente. Assim, o peso médio molecular é sempre maior que o número médio. Quando o isolante polimérico é reticulado, a determinação do peso molecular torna-se mais complexa, pois a fração reticulada pode ser considerada como tendo um peso molecular infinito. Do ponto de vista da engenharia de cabos, é relevante entender que não há uma única maneira de caracterizar o peso molecular do polímero. No entanto, o maior peso médio molecular proporciona melhores propriedades de aplicação geral.

#### AA.1.1.2. Ramificações

As cadeias poliméricas nem sempre são tão lineares como as apresentadas nas figuras. Quando o polietileno é fabricado, o processo sempre leva a produção de cadeias ramificadas ao longo da cadeia principal. Elas são chamadas de cadeias de ramificação e esses ramos contribuem para o aumento do peso molecular, mas não necessariamente causam um aumento no comprimento da cadeia. Na Figura AA.2 abaixo são exibidas algumas ramificações. Observe-se que o comprimento da cadeia dos ramos também pode variar. O comprimento e a distribuição dos ramos afetam as propriedades físicas, e também influenciam a capacidade de extrusão do polietileno de forma satisfatória. Ramificações também interferem na capacidade de cristalização do polietileno, no entanto, elas não têm uma grande influência sobre as propriedades elétricas, tais como, as perdas dielétricas.

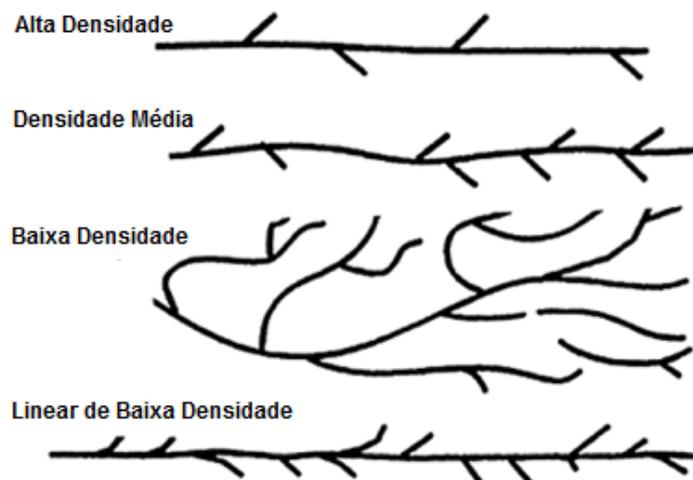


Figura AA.2 - Representação das ramificações na estrutura do polietileno.

É possível visualizar que duas moléculas distintas podem ter o mesmo peso molecular, porém, uma pode ter sua cadeia principal mais longa e com poucos ramos; e a outra, uma cadeia principal mais curta com ramificações mais longas do que as da primeira. Portanto, dois lotes diferentes de polietileno, com muitas moléculas, como as descritas acima, podem ter propriedades diferentes, apesar de terem aproximadamente a mesma distribuição de peso molecular.

Outro ponto a ser analisado sobre as cadeias de polietileno é que elas não são em linhas retas, como o que ficou demonstrado na Figura AA.1. As cadeias poliméricas tendem geralmente a formar bobinas. Em outras palavras, elas têm uma tendência para obter uma configuração aleatória (como um prato de espaguete), consoante mostrada na Figura AA.3. Esta propensão é independente do peso molecular, mas a configuração resultante é influenciada pela ramificação.

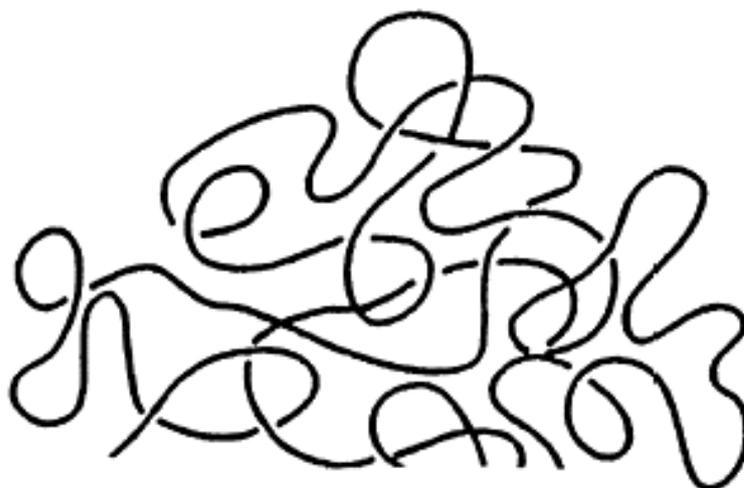


Figura AA.3 – Representação simplificada da configuração enrolada/aleatória.

A propensão para formação de bobina significa que as cadeias poliméricas também têm uma tendência para se emaranhar umas com as outras. Isto indica que quando as cadeias são separadas (como ocorre na execução de uma tensão ou no alongamento para medição), haverá uma resistência ao movimento. Tais envoltórios das cadeias influenciam as propriedades mecânicas do polímero. Estas complicações concorrem para as boas propriedades de PE, salvo quanto àquela que o torna resistente à penetração de vapor de água. Importante esclarecer que os emaranhamentos não têm uma grande influência sobre propriedades elétricas.

### AA.1.1.3. Cristalinidade e Movimento da Cadeia

Embora esta não seja a única alternativa, as medições do peso molecular ou da distribuição do peso molecular representam uma das formas para que seja obtida a descrição das características do polietileno isolante.

Outra característica importante é a cristalinidade. O polietileno e algumas outras poliolefinas (polipropileno, por exemplo) são conhecidos como polímeros semicristalinos. Tal atributo decorre do fato de que as cadeias poliméricas, que se embobinam, por propensão, também tendem a se alinharem umas em relação às outras.

Embora a natureza destes alinhamentos seja bastante complexa, é importante entender que é isto que contribui para a natureza cristalina do polietileno e, portanto, para a densidade e para outras propriedades, tais como, a rigidez.

As porções alinhadas não podem se bobinar, e as que não o estão irão se bobinar. As partes da cadeia que são alinhadas são denominadas como região cristalina e, aquelas que não o estão, são descritas como região amorfa.

A parte inferior da Figura AA.4 demonstra o alinhamento das cadeias, nas quais os comprimentos de cadeia polimérica são diferentes. Algumas partes, das mesmas cadeias, alinham-se com outras cadeias adjacentes, e algumas porções das muitas cadeias não estão alinhadas. A Figura AA.4 mostra que o alinhamento não está necessariamente relacionado com o peso molecular. É teoricamente possível ter polietileno de peso molecular baixo ou alto com o mesmo, ou com diferente, grau de alinhamento.

Assim, em princípio, é possível ter vários tipos de polietilenos:

- Alta densidade, alto peso molecular;
- Alta densidade, baixo peso molecular;
- Baixa densidade, alto peso molecular;
- Baixa densidade, baixo peso molecular.

**Polietileno convencional com muitas cadeias**



**As cadeias têm a tendência de bobinarem-se**



**Para o polietileno, diferentes segmentos de cadeia têm a tendência de alinharem-se com outros**

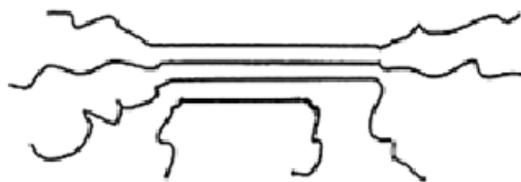


Figura AA.4 – Configurações das cadeias.

Nem todos os tipos de PE são de interesse prático para aplicações em cabo. As regiões cristalinas dão ao polietileno muitas propriedades boas, tais como, a resistência, o módulo elevado e a resistência à penetração de gás e umidade. As regiões que estão alinhadas também têm uma maior densidade devido aos pacotes de cadeia estarem mais apertados. Daí, o aumento da cristalinidade também significa uma maior densidade. O processo de alinhamento indica menos regiões livres (amorfas) do polímero e mais polímero por unidade de volume. As regiões amorfas aumentam a ductilidade, a flexibilidade, e também facilitam o processamento.

O polietileno pode ser entendido como sendo uma mistura de dois materiais, mesmo que a estrutura química seja composta exclusivamente de grupos  $-CH_2-$ . Os dois supostos materiais são as regiões cristalinas e amorfas.

A ramificação influencia a capacidade das cadeias de polietileno de se alinharem. Por conseguinte, esta ramificação interfere no processo de cristalização, devido à natureza volumosa da estrutura química das cadeias poliméricas. Para a cristalinidade ocorrer, as regiões não ramificadas devem ser capazes de se aproximar umas das outras. No entanto, existindo as ramificações, a possibilidade da cadeia principal vir a se aproximar de outra será dificultada.

Os polietilenos têm sido historicamente classificados em quatro categorias principais, devido a esse fenômeno:

- Baixa densidade;
- Densidade média;
- Alta densidade;
- Linear de baixa densidade.

Com o aumento da densidade, são elevados o grau de alinhamento das cadeias e o volume de cadeias alinhadas. Como observado acima, o grau de ramificação está relacionado com o processo de polimerização. A cristalinidade é minimamente afetada, em sua totalidade, pela conversão dos “pellets” do polímero transformando-os em isolamento de cabos.

Algumas informações básicas sobre a natureza das regiões cristalinas e amorfas são de grande valia. Por, isso a natureza da cristalinidade em PE tem sido objeto de inúmeros estudos ao longo dos anos, através dos quais, ficou revelada a existência de uma relação extremamente complexa. Cristalitos, ou regiões cristalinas do PE, podem dobrar-se, tanto quanto, por sua vez, alinharem-se em estruturas maiores que são chamadas de esferulitos, podendo facilmente serem vistos em polietileno de alta densidade sob a polarização da luz. O tamanho dos esferulitos pode variar, assim como as dimensões dos cristais. As regiões dobradas são chamadas de lamelas. Enquanto todas essas estruturas desaparecem em fusão (e reforma de uma forma qualitativamente semelhante ao resfriamento subsequente), ocorrem, por outro lado, mudanças na espessura de lamelas, após o recozimento abaixo da faixa da temperatura de fusão. Sabe-se também que podem existir inúmeros cristalitos em um esferulito.

O movimento das cadeias poliméricas, nas regiões amorfas, também tem sido estudado. O movimento aleatório das cadeias de polietileno, observado nas regiões amorfas, foi dividido em três tipos, tradicionalmente chamados de alfa, beta e gama. Acredita-se que o primeiro é devido à torção da cadeia dos cristalitos entre as fases amorfas, o segundo está relacionado ao movimento de cadeia nos limites da interface cristalina / amorfa, e o terceiro diz respeito ao movimento das cadeias de comprimentos específicos. Esta é uma área de estudos em curso.

Os detalhes da estrutura molecular mostrados aqui são para enfatizar o quão é complexa a natureza das moléculas de polietileno aparentemente simples, sendo XLPE, TR-XLPE e EP ainda mais do que aquelas.

#### AA.1.1.4. Copolímeros

Copolímeros são materiais de isolamento que são fabricados mediante a incorporação de mais de um monômero no processo de polimerização. O monômero de etileno é um gás. Quando o etileno é polimerizado por si só, um polietileno sólido é manufaturado. Se um monômero de propileno gasoso é misturado com o etileno, antes de polimerização, obtém-se o copolímero etileno-propileno, portanto EPR. Deve ser possível fabricar uma grande variedade de copolímeros de etileno-propileno (EPR) para cada razão diferente de etileno para propileno (E / P). E de fato é assim. No entanto, nem todas as razões de etileno propileno são adequadas como materiais de isolamento. Por exemplo, uma relação E/P de 50-70% pode ser típica para isolamentos diferentes. Esta razão também influencia o método usado para extrudar o polímero como isolamento de cabo.

Copolimerização, como descrito aqui, é diferente de mistura de polietileno e polipropileno após a produção dos homopolímeros. Neste último caso, não se tem um copolímero, mas uma mistura, com propriedades inteiramente diferentes. De fato, a mistura de polímeros é muitas vezes incompatível, podendo ocorrer uma separação, em fases, em virtude deles serem diferentes.

Os mesmos princípios empregados aos copolímeros de etileno com propileno também se aplicam a outros monômeros, tais como, acetato de vinila ou acrilato de etila. Estes últimos copolímeros (E-VA ou E-EA) são utilizados em compostos de blindagem. Tais como acontecem com o PE ou EP, os comprimentos das cadeias podem variar, atentando-se para o fato de que estas medidas influenciam as propriedades. A quantidade relativa do segundo monômero (copolimerizado) também deve ser levada em consideração ao se avaliarem as propriedades.

## AA.1.2. Manufatura do Polietileno

### AA.1.2.1. Métodos Convencionais de Manufatura

Historicamente, os polietilenos de baixa e média densidade têm sido sintetizados através de um processo de polimerização de alta pressão. Este processo estimula a polimerização do gás etileno em um reator sob condições extremas de pressão e a temperaturas muito altas, de maneiras a se obterem, ao final, as estruturas de polietileno ramificadas. Ele também utiliza um iniciador de peróxido para estimular a polimerização. O polímero produzido no reator, peletizado e resfriado após a produção, é extrudado através de um molde.

Polietileno de alta densidade é produzido através de um processo de baixa pressão usando um catalisador diferente. O processo de baixa pressão, que foi desenvolvido posteriormente, utiliza catalisadores não peróxidos, um dos quais, é chamado de "Ziegler-Natta" e permite a manufatura de polietilenos com menor número de ramificações e com dimensões mais curtas. Este processo produz um tipo de polietileno mais rígido que e é denominado de "alta densidade". O polietileno linear de baixa densidade (LLDPE), desenvolvido mais recentemente, é fabricado por um processo de baixa pressão, como pode ser visto na Figura AA.2. Ele tem muitas ramificações de cadeia curta, tornando sua estrutura mais parecida com a do polietileno de alta densidade.

Os diversos tipos de polietilenos são, portanto, fabricados por processos diferentes. Em todos eles será fornecido um polímero com uma variedade de graus de cristalinidade, de que resultam várias densidades e também uma diversidade de distribuições de peso molecular.

### AA.1.2.2. Tecnologia de Controle da Distribuição de Peso Molecular

Mudanças recentes na tecnologia dos catalisadores de polimerização têm permitido aos fornecedores de materiais controlarem melhor o peso molecular e a distribuição de peso molecular, o que levou ao desenvolvimento de novas classes de

polietileno com graus de densidade menores e de distribuições de peso moleculares mais definidas, e muitos graus de baixa densidade.

Para melhorar o controle das propriedades dos polímeros, esta área tem recebido, nos últimos anos, muita atenção. Tem sido notado que o polietileno ou EPR (polietileno copolímero), usado para a fabricação de cabos, não tem um peso molecular uniforme (as moléculas têm comprimentos diferentes), entretanto, ele possui uma distribuição de pesos moleculares. Isso ocorre porque a tecnologia de catalisador, utilizada para a fabricação convencional de alta, média ou baixa densidade do polietileno, não pode fornecer um controle exato do processo de polimerização. A distribuição de pesos moleculares (e ramificações) é normalmente atingida pelo uso de catalisadores convencionais, influenciando a cristalinidade e outras propriedades.

O melhor controle do peso molecular, usando uma tecnologia de catalisador diferente, criou muito interesse na indústria de polímeros. O controle da distribuição de peso molecular significa o melhor controle das propriedades do material. Esta nova tecnologia é aplicável à manufatura de homopolímeros de polietileno (para a produção XLPE e TR-XLPE) e copolímeros (EPR). Às vezes um monômero diferente é usado no lugar do propileno no "EPR" (por exemplo, octeno ou buteno) e este abre áreas adicionais para a melhoria das propriedades. A princípio, os materiais mais novos podem ser potencialmente úteis para o isolamento e blindagens.

O que é relevante para aplicações em cabos é que os fornecedores de materiais podem atingir um maior controle sobre o processo de polimerização para produzir polímeros que são mais uniformes na natureza. O termo "Metaloceno" foi usado inicialmente para descrever estes materiais modificados. Ele é baseado na natureza do catalisador, que era um composto metálico que incorporou uma estrutura química especial chamada "ciclopentadienil". Mais recentemente, outros catalisadores foram desenvolvidos e o termo geral 'single site catalysis' é tecnicamente mais adequado. O que isto significa é que o etileno é polimerizado em um único local sobre o catalisador.

A capacidade de controlar a estrutura molecular possibilitou que os fornecedores dos materiais podem aplicar os conhecimentos fundamentais de propriedades de estruturas para desenvolver produtos voltados para uma aplicação

específica de utilização final, ou seja, os fios e os cabos. A partir de uma perspectiva de propriedade, o produto teria aperfeiçoamentos nas propriedades mecânicas, físicas e elétricas. A partir de uma perspectiva de aplicação, estes materiais mais novos também devem ser capazes de ser processados (extrudados) no mesmo tempo (ou até mais rápido) e com o mesmo equipamento já existente na indústria de cabos. Como resultado dessas melhorias no material de base, devem-se esperar características de vida equivalente, ou até melhor, dos cabos feitos com esses materiais. Qualquer aplicação comercial para os produtos desenvolvidos, a partir dessa nova tecnologia, vai ser fortemente influenciada pelo processamento e pelas características de vida útil.

Para que o polietileno seja adequadamente extrudado em um fio como um isolamento ou blindagem, deve ser derretido na extrusora a altas temperaturas e ser empurrado através de uma matriz. A superfície lisa é alcançada através do controle da taxa de extrusão. Com o aumento da taxa de extrusão, os problemas potenciais podem surgir, que são chamados de pele de cação, e, em taxas mais elevadas, aparecem fraturas de fundido (melt fracture). Pele de Cação (sharkskin) refere-se a uma superfície áspera com padrões de crista repetidos. As taxas de extrusão convencionais, a superfície de isolamento fica suave, pois ela emerge do molde de extrusão. Com taxas mais elevadas, a instabilidade do fluxo pode ocorrer. Este fenômeno está relacionado ao peso molecular, à distribuição de peso molecular e a fenômenos de superfície interfacial. Atualmente, este não é um problema com polietilenos convencionais, visto que, nos dias de hoje, eles são moderados por sua ampla distribuição de peso molecular a taxas de extrusão convencionais. No entanto, os polietilenos mais novos são mais propensos ao desenvolvimento de pele de tubarão, mesmo em velocidades de extrusão relativamente moderadas. Fraturas de fundido (melt fracture) só se tornam uma área considerada significativa a taxas de extrusão maiores que a convencional.

Ter uma ampla distribuição de peso molecular não é necessariamente ruim sob a ótica de vista de processamento, porém, faz-se necessário um equilíbrio entre as propriedades dos materiais e a capacidade de extrusão. Até agora, os materiais mais recentes têm sido aplicados principalmente para polietilenos de alta densidade e para o polietileno linear de baixa densidade.

## AA.1.3. Polietileno Reticulado (XLPE)

Reticular é o processo de unir as diferentes cadeias de polietileno entre si através de reação química. Até agora, todas as cadeias de polietileno discutidas foram separadas em diversas extensões. Isso é mostrado na Figura AA.5. O XLPE pode ser considerado como um polietileno ramificado onde a extremidade do ramo é ligada a uma cadeia de PE diferente em vez de ficar solta. A reticulação dá certas propriedades desejáveis para o polietileno. Sob uma perspectiva de cabo, ela permite que o polímero mantenha sua forma estável a temperaturas elevadas. O XLPE impede as cadeias de se separarem demais. Outras vantagens de materiais reticulados são a resistência à deformação e à fissuração, bem como o melhoramento da resistência à tração e módulo. As propriedades elétricas do polietileno não são necessariamente melhoradas no XLPE.

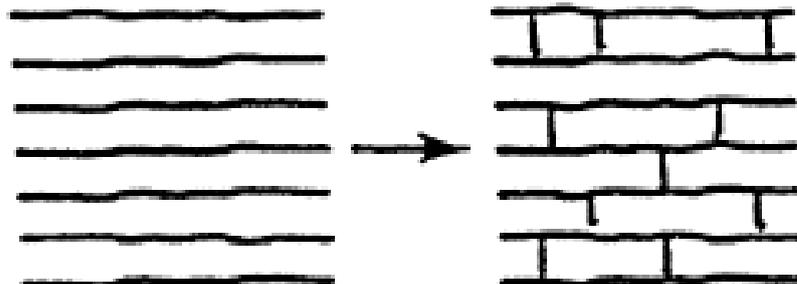


Figura AA.5 - Descrição simples de cadeia reticulada.

O polietileno convencional é composto por polímeros de cadeia longa, que, por sua vez, são constituídos por grupos de etileno. As moléculas individuais são muito longas. A espinha dorsal pode conter de 10.000 a 60.000 átomos, ou até mais. Além disso, constata-se também que existem os ramos, as regiões cristalinas e as amorfas e que quaisquer aditivos ou impurezas devem ser residentes nas regiões amorfas e não nas cristalinas. A reticulação (entrecruzamento) adiciona uma nova dimensão à complexidade do arranjo molecular.

A Figura AA.6 fornece uma descrição de como um polietileno convencional não reticulado é convertido para o reticulado. Para simplificar, as cadeias (a) são todas mostradas uma ao lado da outra. Para fins de ajustes aos propósitos deste estudo, as cadeias lineares se apresentam com uma descrição simplificada. As primeiras duas cadeias adjacentes ligam (b). Vê-se imediatamente que o peso

molecular foi aumentado. O primeiro entrecruzamento leva a dois ramos. Em (c), as duas primeiras cadeias foram simplesmente redesenhadas a partir de (b) de uma forma mais familiar. Em (d), mais três ligações entrecruzadas foram (arbitrariamente) adicionadas, sendo duas para cadeias diferentes. O terceiro mostra que as cadeias mais novas (previamente reticuladas) de maior peso molecular são novamente ligadas a outra cadeia. Em (e), foi redesenhado (d) para mostrar como o processo de reticulação aparenta que as cadeias estão novamente "esticadas". Note como as duas cadeias originais aumentaram drasticamente o peso molecular.

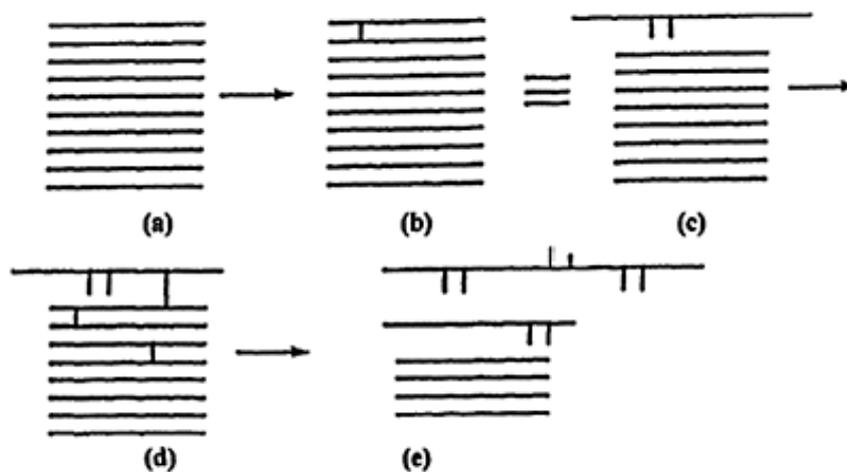


Figura AA.6 - Efeitos da reticulação no comprimento da cadeia de polietileno.

O processo de entrecruzamento é uma maneira de aumentar o peso molecular. E é exatamente o que ocorre durante este processo. Todavia, nem todas as cadeias necessariamente aumentam o peso molecular na mesma proporção. Tendo em vista que o processo continua, só o começo dele é descrito aqui. O peso molecular é tão grande que o polietileno reticulado pode ser considerado como tendo um peso molecular "infinito".

Uma maneira de caracterizar um polímero de peso molecular extremamente elevado, se comparado com um polímero reticulado, é se verificar a sua solubilidade em um solvente orgânico, tais como, tolueno, xileno, ou decalina. Um polietileno convencional, mesmo um de peso molecular muito alto, dissolverá em um destes solventes aquecidos. O polietileno reticulado não se dissolverá. As cadeias se distanciam quando o polímero reticulado é imerso no solvente quente, porém, não a ponto de ocorrer a dissolução. O que acontece é que o polietileno reticulado apenas incha no solvente e produz um gel. Outra maneira de se determinar se o polietileno é

reticulado, ou não, é submetê-lo ao calor, colocando a amostra em contacto com uma superfície quente. O PE convencional fluirá, enquanto que o XLPE resistirá e se comportará de forma mais elástica.

Os isolamentos de cabos XLPE comerciais também têm um estado "sol". Esta é a parte das cadeias de polímero que nunca são incorporadas ao entrelaçamento infinito. Na Figura AA.6, vêem-se algumas cadeias (e) não integradas ao entrelaçamento. O estado de gel de um XLPE comercial é cerca de 70 a 80%, ou seja, cerca de 70-80% das cadeias de polímero são incorporadas ao entrelaçamento tridimensional de gel, sendo que o restante não será e seria solúvel no solvente aquecido.

Outra consideração ser levada em conta a respeito do material de isolamento, é o número de ligações entrecruzadas entre as cadeias de polietileno individuais. Isto é referido como o peso molecular entre ligações entrecruzadas e tem significância teórica. No entanto, para fins comerciais, uma fração de gel de 70 a 80% é uma descrição adequada. Também é comum referir-se como módulo de elasticidade quente. Esta é uma medida um pouco mais fácil de fazer do que uma fração sol e não envolve o uso de solventes orgânicos. O módulo de elasticidade quente está diretamente relacionado ao grau de reticulação, ou mais corretamente, ao peso molecular entre ligações cruzadas. Ele é maior que o grau de aumento da reticulação ou o peso molecular entre ligações cruzadas diminui.

A reticulação das cadeias de PE pode ser induzida por diferentes meios, tais como: uso de peróxidos orgânicos, uso de radiação de alta energia e modificação da estrutura da cadeia principal.

#### AA.1.4. Polietileno Reticulado com Retardo de Arborescências (TR-XLPE)

Ao longo dos anos, muitas tentativas foram feitas para melhorar o desempenho de polietileno convencional e mais tarde para o XLPE. Foram realizados melhoramentos na resistência à arborescência em água, a fim de aumentar a vida útil dos cabos. Existem três abordagens fundamentais para alcançar os retardantes de arborescência:

- Utilizando um copolímero mais polar no lugar de um homo-polímero de polietileno;
- Usando um aditivo ou colocando aditivos dentro do homo-polímero (ou copolímero)
- Utilizando ambas as opções acima.

O XLPE modificado é geralmente testado primeiro como uma chapa pressionada para garantir que as melhorias ocorreram de fato. No entanto, deve-se notar que muita informação disponível sobre cabos é freqüentemente focada em propriedades de cabos após o teste ou o envelhecimento, ao invés de como essas propriedades são alcançadas no projeto do composto.

Um dos subprodutos dos agentes de reticulação do XLPE, acetofenona, é relatado por facilitar a resistência à arborescência em água. No passado, o álcool dodecil foi empregado como um aditivo retardante de arvorejamento para HMWPE. O primeiro material de TR XLPE comercial foi disponibilizado pela Union Carbide (agora companhia Dow Chemical) no início de 1980. Por muitos anos, este foi o único TR XLPE fabricado na América do Norte. Outro material retardante de arborescência comercialmente disponível foi descrito com o emprego de aditivos que imobilizam as moléculas de água, quando ocorre a entrada de água e minimiza os danos causados por um alto campo elétrico e cargas espaciais. O objetivo global na tecnologia de retardantes de arvorejamento é evitar que a água danifique o isolamento. Modificar o XLPE para torná-lo mais hidrofílico facilitaria a retenção ou o aprisionamento da água. Enchimentos também podem prender a água. Grupos silano reagem com a água. Em todos os casos, a água é impedida (ou retardada) de migrar para o local de alta tensão (um evento fundamental para o crescimento das arborescências em água). O TR-XLPE deve ainda conter um agente peróxido de reticulação e um antioxidante, como é feito no XLPE convencional e EPR.

Informações históricas do envelhecimento em campo combinadas com dados laboratoriais justificam o TR-XLPE ser considerado em uma categoria separada dos XLPE convencional. Entretanto, como com o EPR, não é de se esperar que todos os polietilenos reticulados com retardador de arborescências respondam da mesma maneira em ensaios de envelhecimento em laboratório ou em serviço. Dados de propriedades físicas e elétricas são de interesse não só após a fabricação do cabo, como também após o envelhecimento do cabo.

Outra questão que tem surgido nos anos recentes diz respeito à definição de TR-XLPE, ou o grau de retardamento de arvorejamento. Embora seja geralmente aceito que é diminuído o crescimento das arborescências e que a rigidez dielétrica AC é aumentada para TR-XLPE. Em uma comparação com XLPE, uma questão que foi levantada diz respeito à quanto de uma melhoria é necessário para que o material passe a ser definido como retardante de arborescências.

## AA.2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] THUE, William A. **Electrical Power Cable Engineering**. Second Edition, Revised an Expanded. Marcel Dekker, Inc.



# APÊNDICE B



## APÊNDICE B

### AB.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O texto deste apêndice foi retirado do livro “Elementos de Eletromagnetismo”.

O método dos elementos finitos (FEM) tem sua origem no campo de análise de estruturas. Esse método passou a ser aplicado a problemas de eletromagnetismo a partir de 1968. Da mesma maneira que o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos é útil para resolver equações diferenciais. O método das diferenças finitas representa o domínio por um conjunto de pontos de grade. Sua aplicação torna-se difícil para problemas em regiões com contornos de formas irregulares. Esses problemas podem ser resolvidos com maior facilidade utilizando o método dos elementos finitos.

A análise por elementos finitos de um problema qualquer envolve, basicamente, quatro etapas: (a) discretização do domínio em um número finito de sub-regiões ou elementos; (b) obtenção das equações que regem um elemento típico; (c) conexão de todos os elementos no domínio e (d) resolução do sistema de equações obtido.

#### AB.1.1. Discretização no Método dos Elementos Finitos

Dividimos o domínio em um número de elementos finitos, como ilustrado na Figura AB.1, onde a região é subdividida em quatro elementos que não se sobrepõem (dois triangulares e dois quadrangulares) e sete nós. Procuramos uma aproximação para o potencial  $V_e$ , dentro de um elemento  $e$ , então, inter-relacionados às distribuições de potencial em vários elementos, tal que o potencial seja contínuo através dos contornos entre os elementos inter-relacionados. A solução aproximada para toda região é

$$V(x, y) = \sum_{e=1}^N V_e(x, y) \quad (\text{AB.1})$$

onde  $N$  é o número de elementos triangulares nos quais o domínio é dividido.

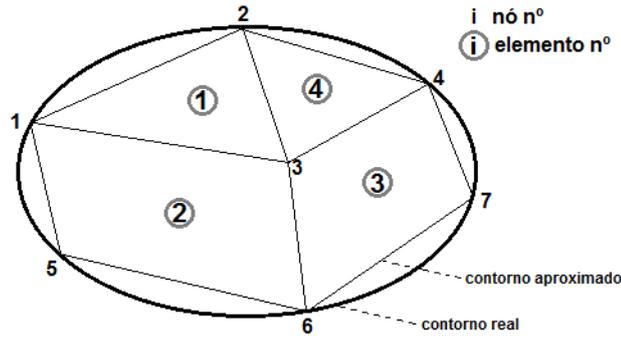


Figura AB.1 - Uma subdivisão em elementos finitos típica para um domínio irregular.

A forma mais comum de aproximação  $V_e$  no interior de um elemento é a aproximação polinomial, a saber

$$V_e(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{AB.2})$$

para um elemento triangular e

$$V_e(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{AB.3})$$

para um elemento quadrangular. Em geral, o potencial  $V_e$  é diferente de zero dentro do elemento  $e$ , mas zero fora de  $e$ . É difícil aproximar o contorno do domínio com elementos quadrangulares. Tais elementos são úteis para problemas nos quais os contornos são suficientemente regulares. Em vista disso, é preferível usar elementos triangulares. Observe que assumir variação linear do potencial no interior dos elementos triangulares, como na equação AB.2, equivale a assumir que o campo elétrico é uniforme dentro do elemento, isto é,

$$E_e = -\nabla V_e = -(ba_x + ca_y) \quad (\text{AB.4})$$

### AB.1.2. Equações que Regem os Elementos

Considerando um elemento triangular típico, mostrado na Figura AB.2, os potenciais  $V_{e1}$ ,  $V_{e2}$  e  $V_{e3}$  nos nós 1, 2 e 3, respectivamente, são obtidos utilizando a equação 2, isto é,

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (\text{AB.5})$$

os coeficientes a, b e c são determinados a partir da equação AB.5 como

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad (\text{AB.6})$$

substituindo a equação AB.6 na equação AB.2 resulta em

$$V_e = [1 \quad x \quad y] \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2y_3 - x_3y_2) & (x_3y_1 - x_1y_3) & (x_1y_2 - x_2y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix}$$

Ou

$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} \quad (\text{AB.7})$$

Onde

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (\text{AB.8a})$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (\text{AB.8b})$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} [(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (\text{AB.8c})$$

e A é a área do elemento e, isto é,

$$\begin{aligned} 2A &= \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \\ &= (x_1y_2 - x_2y_1) + (x_3y_1 - x_1y_3) + (x_2y_3 - x_3y_2) \end{aligned}$$

Ou

$$A = \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (\text{AB.9})$$

O valor de A é positivo se os nós forem numerados no sentido anti-horário (começando por qualquer nó), como mostrado na seta da Figura AB.2. Observe que a equação AB.7 nos dá o potencial em qualquer ponto (x,y) dentro do elemento, desde que os potenciais nos vértices sejam conhecidos. Esta é uma situação diferente da que envolve análise por diferenças finitas, em que o potencial é conhecido apenas nos pontos da grade. Observe, também, que  $\alpha_i$  são funções lineares de interpolação. Elas são denominadas “funções de forma dos elementos” e tem as seguintes propriedades:

$$\alpha_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (\text{AB.10a})$$

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) = 1 \quad (\text{AB.10b})$$

As funções de forma  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  por exemplo estão ilustradas nas Figura AB.3.

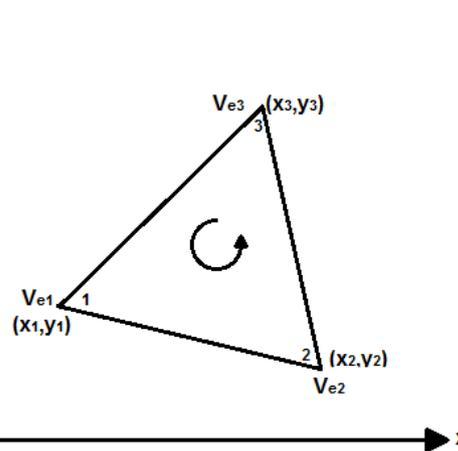


Figura AB.2 - Elemento triangular típico. A numeração dos nós locais 1-2-3 deve ser feito no sentido anti-horário, como indica a seta.

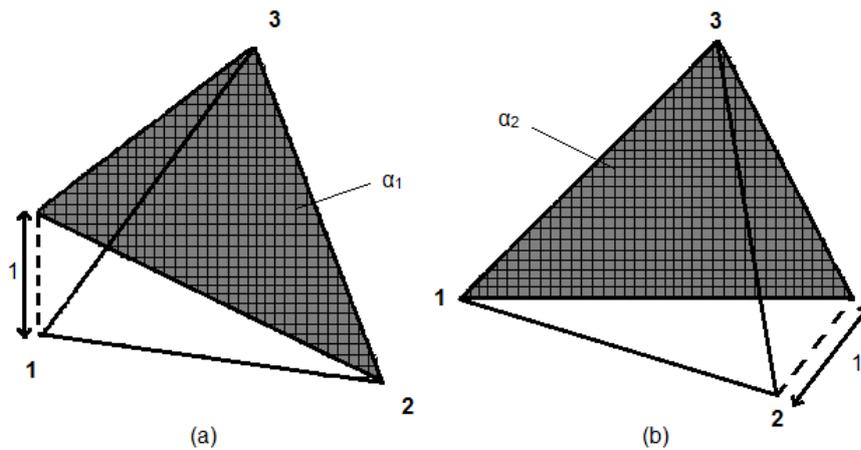


Figura AB.3 - Funções de forma  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  para um elemento triangular.

A energia por unidade de comprimento, associada ao elemento  $e$ , é dada pela equação a seguir,

$$W_e = \frac{1}{2} \int \varepsilon |E|^2 dS = \frac{1}{2} \int \varepsilon |\nabla V_e|^2 dS \quad (\text{AB.11})$$

onde se assume um domínio bidimensional, livre de cargas ( $\rho_s=0$ ). Contudo, a partir da equação AB.7.

$$\nabla V_e = \sum_{i=1}^3 V_{ei} \nabla \alpha_i \quad (\text{AB.12})$$

Substituindo a equação AB.12 na equação AB.11, resulta em

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon V_{ei} [\int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS] V_{ej} \quad (\text{AB.13})$$

se definirmos o termo entre colchetes como

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \quad (\text{AB.14})$$

podemos escrever a equação AB.13 na forma matricial como

$$W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [V_e]^T [C^{(e)}] [V_e] \quad (\text{AB.15})$$

Onde o sobrescrito T denota a matriz transposta

$$[V_e] = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad (\text{AB.16a})$$

e

$$[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix} \quad (\text{AB.16b})$$

A matriz  $[C^{(e)}]$  é usualmente denominada de “matriz dos coeficientes dos elementos”. O elemento  $C_{ij}^{(e)}$  da matriz dos coeficientes pode ser considerado como acoplamento entre os nós i e j. Seu valor é obtido a partir das equações AB.8 e AB.14.

### AB.1.3. Conexão de Todos os Elementos

Tendo considerado um elemento típico, o próximo passo é conectar todos esses elementos em um domínio. A energia associada à conexão de todos os elementos da malha é

$$W = \sum_{e=1}^N W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [V]^T [C] [V] \quad (\text{AB.17})$$

Onde

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{AB.18})$$

$n$  é o número máximo de nós,  $N$  é o número de elementos e  $[C]$  é denominada de *matriz de rigidez global*, que representa a conexão das matrizes dos coeficientes dos elementos individuais. O maior problema agora é obter  $[C]$  a partir de  $[C^{(e)}]$ .

O processo pelo qual as matrizes de coeficientes de cada elemento são conectadas para obter a matriz de rigidez global é melhor ilustrado com um exemplo. Considere a malha de elementos finitos consistindo de três elementos finitos, como mostrado na Figura AB.4. Observe a numeração dos nós. A numeração dos nós de acordo com 1, 2, 3, 4 e 5 é denominada de numeração global. A numeração  $i$ - $j$ - $k$  é denominada de numeração local e corresponde a 1-2-3 dos elementos finitos na Figura AB.2. Por exemplo, para o elemento 3 na figura 4, a numeração global 3-5-4 corresponde à numeração local 1-2-3 do elemento na Figura AB.2. Observe que a numeração local deve seguir a sequência no sentido anti-horário, começando em qualquer nó do elemento. Para o elemento 3, por exemplo poderíamos escolher 4-3-5 ou 5-4-3, ao invés de 3-5-4 para corresponder a 1-2-3 do elemento na Figura AB.2. Portanto a numeração na Figura AB.4 não é única. Entretanto, obtemos o mesmo  $[C]$  independente da numeração usada. Assumindo a numeração adotada na Figura AB.4, é esperado que a matriz de rigidez global tenha a seguinte forma:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix} \quad (\text{AB.19})$$

Que é uma matriz  $5 \times 5$ , já que cinco nós ( $n=5$ ) estão envolvidos. Novamente,  $C_{ij}$  é o acoplamento entre o nó  $i$  e o nó  $j$ . Obtemos  $C_{ij}$  utilizando o fato de que a distribuição de potencial deve ser contínua através dos contornos entre os elementos. A combinação à posição  $i, j$  em  $[C]$  vem de todos os elementos que contêm os nós  $i$  e  $j$ . Para encontrar  $C_{ij}$ , por exemplo, observamos da Figura AB.4 que o nó global 1 pertence aos elementos 1 e 2 que é o nó local 1 a ambos. Assim,

$$C_{11} = C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} \quad (\text{AB.20a})$$

para  $C_{22}$  o nó global 2 pertence ao elemento 1 somente e é o mesmo que o nó local 3. Assim,

$$C_{22} = C_{33}^{(1)} \quad (\text{AB.20b})$$

para  $C_{44}$  o nó global 4 é o mesmo que os nós locais 2, 3 e 3, respectivamente. Assim,

$$C_{44} = C_{22}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{33}^{(3)} \quad (\text{AB.20c})$$

para  $C_{14}$ , a conexão global 14 é a mesma que as conexões locais 12 e 13 nos elementos 1 e 2, respectivamente. Assim,

$$C_{14} = C_{12}^{(1)} + C_{13}^{(2)} \quad (\text{AB.20d})$$

já que não há acoplamento (ou conexão direta) entre os nós 2 e 3,

$$C_{23} = C_{32} = 0 \quad (\text{AB.20a})$$

considerando desta maneira, obtemos todos os termos na matriz rigidez global por inspeção da Figura AB.4 como

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} & C_{13}^{(1)} & C_{12}^{(2)} & C_{12}^{(1)} + C_{13}^{(2)} & 0 \\ C_{31}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 & C_{32}^{(1)} & 0 \\ C_{21}^{(2)} & 0 & C_{22}^{(2)} + C_{11}^{(3)} & C_{23}^{(2)} + C_{13}^{(3)} & C_{12}^{(3)} \\ C_{21}^{(1)} + C_{31}^{(2)} & C_{23}^{(1)} & C_{32}^{(2)} + C_{31}^{(3)} & C_{22}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{33}^{(3)} & C_{32}^{(3)} \\ 0 & 0 & C_{21}^{(3)} & C_{23}^{(3)} & C_{22}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (\text{AB.21})$$

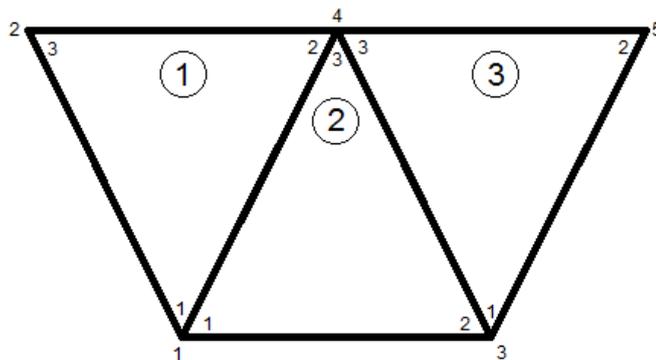


Figura AB.4 - Conexão de três elementos: i-j-k correspondentes à numeração local 1-2-3 do elemento na figura 2.

Observe que as matrizes dos coeficientes dos elementos se sobrepõem nos nós compartilhados pelos elementos e que há 27 termos (nove para cada um dos elementos) na matriz rigidez global  $[C]$ . Também observe as seguintes propriedades da matriz  $[C]$ :

1. A matriz é simétrica ( $C_{ij}=C_{ji}$ ) da mesma forma que a matriz dos coeficientes do elemento.
2. Já que não existe acoplamento entre o nó  $i$  e o nó  $j$ , fica evidente que, para um grande número de elementos,  $[C]$  torna-se esparsa e de banda.
3. A matriz é singular. Embora não seja tão obvio, isto pode ser mostrado usando a matriz dos coeficientes do elemento da equação AB.20b.

#### AB.1.4. Resolução das Equações Resultantes

A partir do Cálculo Variacional, é sabido que a equação de Laplace (ou de Poisson) é satisfeita quando a energia total no domínio é mínima. Portanto, é necessário que as derivadas parciais de  $W$ , em relação a cada valor modal do potencial, seja zero. Isto é,

$$\frac{\partial W}{\partial V_1} = \frac{\partial W}{\partial V_2} = \dots = \frac{\partial W}{\partial V_n} = 0$$

ou

$$\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (\text{AB.22})$$

por exemplo, para obter  $\partial W / \partial V_i = 0$  para a malha de elementos finitos da Figura AB.4, substituímos a equação AB.19 na equação AB.17 e tomamos a derivada parcial de  $W$  em relação a  $V_1$ . Obtemos

$$0 = \frac{\partial W}{\partial V_1} = 2V_1 C_{11} + V_2 C_{12} + V_3 C_{13} + V_4 C_{14} + V_5 C_{15} + V_2 C_{21} + V_3 C_{31} + V_4 C_{41} + V_5 C_{51}$$

ou

$$0 = V_1 C_{11} + V_2 C_{12} + V_3 C_{13} + V_4 C_{14} + V_5 C_{15} \quad (\text{AB.23})$$

Em geral,  $\partial W / \partial V_k = 0$  nos leva a

$$0 = \sum_{i=1}^n V_i C_{ik} \quad (\text{AB.24})$$

onde  $n$  é o número de nós na malha. Ao escrever a equação AB.24 para todos os nós  $k=1,2,\dots,n$ , obtemos um conjunto de equações simultâneas, a partir do que a solução de  $[V]^T = [V_1, V_2, \dots, V_n]$  pode ser encontrada. Isto pode ser feito de duas

maneiras, similares às empregadas para resolver as equações em diferenças finitas obtidas a partir da equação de Laplace (ou Poisson).

#### AB.1.4.1. Método Iterativo

Esta abordagem é similar àquela usada no método das diferenças finitas. Consideremos que o nó 1 na Figura AB.4 pode ser obtido da equação AB.23 como

$$V_1 = \frac{1}{C_{11}} \sum_{i=2}^5 V_i C_{1i} \quad (\text{AB.25})$$

Em geral o potencial em um nó livre  $k$  é obtido da equação AB.24 como

$$V_k = \frac{1}{C_{kk}} \sum_{i=1, i \neq k}^n V_i C_{ik} \quad (\text{AB.26})$$

que se aplica iterativamente a todos os nós livres na malha com  $n$  nós. Já que  $C_{ki}=0$ , se o nó  $k$  não está diretamente conectado ao nó  $i$ , somente nós que estão diretamente ligados ao nó  $k$  contribuem para  $V_k$  na equação AB.26.

Desta forma, se os potenciais nos nós conectados ao nó  $k$  são conhecidos, podemos determinar  $V_k$  usando a equação AB.26. O processo iterativo começa estabelecendo os potenciais nos nós livres iguais a zero ou iguais ao valor médio dos potenciais.

$$V_{méd} = \frac{1}{2} (V_{mín} + V_{max}) \quad (\text{AB.27})$$

onde  $V_{mín}$  e  $V_{max}$  são os valores mínimo e máximo dos potenciais preestabelecidos nos nós fixos. Com esses valores iniciais, os potenciais nos nós livres são calculados usando a equação AB.26. Ao final da primeira iteração, quando os novos valores tiverem sido calculados para todos os nós livres, esses valores tornam-se os valores de partida para a segunda iteração. O procedimento é repetido até que a diferença dos valores entre duas iterações subsequentes torne-se desprezível

## AB.1.4.2. Método da Matriz de Banda

Se todos os nós livres forem numerados por primeiro e os nós fixos por último, a equação AB.17 pode ser escrita tal que

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon [V_f \quad V_p] \begin{bmatrix} C_{ff} & C_{fp} \\ C_{pf} & C_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ V_p \end{bmatrix} \quad (\text{AB.28})$$

onde os índices  $f$  e  $p$ , respectivamente, referem-se aos nós potenciais livres e fixos (ou preestabelecidos). Já que  $V_p$  é constante (consiste de valores conhecidos e fixos), apenas diferenciamos em relação a  $V_f$  tal que, ao aplicar a equação AB.22 na equação AB.28, resulta em

$$C_{ff}V_p + C_{fp}V_p = 0$$

ou

$$[C_{ff}][V_f] = -[C_{fp}][V_p] \quad (\text{AB.29})$$

Esta equação pode ser escrita como

$$[A][V] = [B] \quad (\text{AB.30a})$$

ou

$$[V] = [A]^{-1}[B] \quad (\text{AB.30b})$$

Onde  $[V]=[V_f]$ ,  $[A]=[C_{ff}]$  e  $[B]=-[C_{fp}][V_p]$ . Já que  $[A]$  é, em geral, não singular, o potencial nos nós livres pode ser encontrado usando a equação AB.29. Podemos resolver para  $[V]$  na equação AB.30a usando a técnica de eliminação gaussiana. Também podemos resolver para  $[V]$  na equação AB.30b usando a inversão de matriz se o tamanho da matriz a ser invertida não for grande.

Observe que, da mesma forma que procedemos com as equações a partir da equação AB.11, nossa solução tem sido restrita a um problema bidimensional envolvendo a equação de Laplace  $\nabla^2 V = 0$ . Os conceitos básicos desenvolvidos nesta seção podem ser estendidos à análise em elementos finitos de problemas envolvendo a equação de Poisson ( $\nabla^2 V =$

$-\frac{\rho_v}{\epsilon}$  e  $\nabla^2 A = -\mu J$ ) ou a equação de onda ( $\nabla^2 \phi - \gamma^2 \phi = 0$ ). Dois dos maiores problemas associados com a análise por elementos finitos são a quantidade relativamente grande da memória computacional requerida para armazenar os elementos da matriz e o tempo de processamento computacional associado. Entretanto, muitos algoritmos têm sido desenvolvidos para diminuir esses problemas até certo ponto.

O método dos elementos finitos (FEM) apresentam várias vantagens em relação ao método das diferenças finitas (FDM) e em relação ao método dos momentos (MOM). Em primeiro lugar, o FEM pode lidar, mais facilmente, com um domínio mais complexo. Em segundo lugar, a generalidade do FEM torna possível construir uma proposta de programa computacional geral para resolver uma grande gama de problemas. Um único programa pode ser usado para resolver problemas diferentes (descritos pelas mesmas equações diferenciais parciais) com diferentes domínios e diferentes condições de contorno, necessitando somente mudar os dados de entrada do problema. Entretanto, o FEM tem seus próprios pressupostos. É mais fácil entendê-lo e programá-lo do que entender e programar o FDM e o MOM. Isso requer a preparação dos dados de entrada, um processo que pode ser tedioso.

## AB.2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] Sadiku, Matthew N. O. Elementos de Eletromagnetismo. Trad. Liane Ludwig Loder e Jorge Amoretti Lisboa. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2004, p. 620-637.