

TESE DE DOUTORADO Nº 267

**CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS EFEITOS ASSOCIADOS À
FALHA DE ISOLAMENTO EM CABOS COBERTOS DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COMPACTAS FRENTE A SURTOS ATMOSFÉRICOS**

RONALDO EUGENIO DE SOUZA FILHO

DATA DA DEFESA: 21/02/2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS EFEITOS ASSOCIADOS À
FALHA DE ISOLAMENTO EM CABOS COBERTOS DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COMPACTAS FRENTE A SURTOS ATMOSFÉRICOS**

RONALDO EUGENIO DE SOUZA FILHO

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Fernando Henrique Silveira
Coorientador: Prof. Silvério Visacro Filho

BELO HORIZONTE – MG

FEVEREIRO – 2018

S729c

Souza Filho, Ronaldo Eugenio de.

Caracterização e análise dos efeitos associados à falha de isolamento em cabos cobertos de redes de distribuição compactas frente a surtos atmosféricos [manuscrito] / Ronaldo Eugenio de Souza Filho. - 2018. xix, 115 f., enc.: il.

Orientador: Fernando Henrique Silveira.

Coorientador: Silvério Visacro Filho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 113-115.

Bibliografia: f. 109-112.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Distribuição - Teses. 3. Raio - Teses. 4. Cabos elétricos - Teses. I. Silveira, Fernando Henrique. II. Visacro Filho, Silvério. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

Dedico este trabalho aos meus pais,
Ronaldo Eugênio de Souza e
Rejane Garcia de Souza.

Agradecimentos

“A ti, ó Deus de meus pais, eu te rendo graças e te louvo, porque me deste sabedoria.” Faço minhas as palavras contidas no livro de Daniel (capítulo 2, versículo 23), proferidas em um momento de profunda gratidão a Deus, fonte inesgotável de todo o conhecimento.

Agradeço aos meus pais, Ronaldo Eugênio de Souza e Rejane Garcia de Souza, pelo suporte, pelo encorajamento e pelo apoio incondicional que têm me dado ao longo de toda a vida. Muito obrigado porque vocês são meus incentivadores e meu maior exemplo.

Agradeço aos meus familiares, especialmente à minha avó Sebastiana Santos Garcia (*in memoriam*) pelas orações ao longo de toda a sua vida. À minha namorada, Jayne Santos Rodrigues, pelo carinho, apoio, compreensão e torcida.

Ao meu orientador, Professor Fernando Henrique Silveira, pela dedicação, pelos ensinamentos e por todo o auxílio prestado ao longo dos últimos anos. Seus conselhos, além de sua solicitude e disponibilidade foram extremamente valiosas para o êxito deste doutorado.

Ao Professor Silvério Visacro Filho, coorientador, por sua estimada contribuição para a realização deste trabalho e pela oportunidade oferecida de trabalhar no LRC. Certamente, o conhecimento adquirido nos últimos anos foi de grande importância para minha formação.

Ao Professor Alberto Resende De Conti pelas consideráveis contribuições e pela parceria firmada durante a realização desta pesquisa. Aos demais membros da banca, Professores Alexandre Piantini, Clever Sebastião e Rafael Alípio, pelas ponderações e importantes contribuições para fechamento deste texto.

À equipe do LRC, Alyson Cardoso, Felipe Cota, Guilherme Lima, Listz Simões, Miguel Guimarães, Rafael Maia e Thiago Virgílio, pela ajuda e experiência compartilhada, e em especial aos amigos, Matheus Mendonça e Victor Migliorini, pelas conversas e dicas que foram de grande auxílio para conclusão desta etapa da minha vida.

“Porquanto a sabedoria entrará no teu coração, e o conhecimento será agradável à tua alma.”

(Salomão – Provérbios 2.10)

Resumo

Os efeitos associados à incidência direta de descargas atmosféricas em redes de distribuição de energia elétrica ou em regiões próximas são capazes de gerar sobretensões de amplitude elevada nessas redes, podendo resultar em sua falha de isolamento. De modo a minimizar os problemas decorrentes de tais solicitações, tem-se difundido o uso de cabos com cobertura dielétrica dispostos em componentes poliméricos, configurando a denominada rede de distribuição compacta.

Nos últimos anos, uma extensa pesquisa tem sido realizada no Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas da UFMG com o objetivo de investigar o papel desempenhado pela cobertura dielétrica dos cabos no aumento da suportabilidade elétrica dessa rede. É nesse contexto que se insere esta tese de doutorado, cuja motivação está relacionada à compreensão dos fenômenos e dos efeitos associados à falha de isolamento em cabos cobertos nesse tipo de rede.

Neste trabalho são apresentados resultados experimentais de ensaios realizados em estruturas monofásicas e trifásicas com tensões de impulso atmosférico padronizado ($1,2/50 \mu\text{s}$) com o objetivo de determinar parâmetros que modelem os efeitos relacionados à falha de isolamento das redes, a saber: (i) os valores mínimos e médios da tensão disruptiva, (ii) os tempos para disrupção e (iii) os principais eventos relacionados ao processo disruptivo, como o acúmulo de cargas sobre a cobertura dielétrica dos cabos – responsável por modificar as características do processo disruptivo –, a ocorrência de descargas disruptivas parciais e a perfuração da camada dielétrica dos cabos cobertos.

Os resultados obtidos indicam que o uso de cabos cobertos proporciona um ganho de suportabilidade elétrica das estruturas testadas em pelo menos 40%. Observou-se que a polaridade da tensão aplicada modifica o comportamento dos arranjos isolantes. Utilizando condutores nus, a tensão disruptiva negativa foi 20% superior em relação ao valor obtido para a polaridade de tensão positiva. Por outro lado, os condutores cobertos apresentaram maior suportabilidade frente a tensões impulsivas positivas – no mínimo 8%. Ensaios realizados com cabos danificados apontaram uma tendência de crescimento do valor da tensão disruptiva com o aumento da distância do furo em relação ao isolador. Além disso, cabos que já estiveram em operação mostraram um desempenho muito semelhante àquele obtido para cabos novos.

Abstract

The effects associated with lightning direct or nearby strikes to the power distribution grids are able to induce high overvoltages on the lines. Such overvoltages are often the cause of breakdown. Aiming to minimize the occurrence of outage due to lightning, some Brazilian power utility companies are replacing their traditional systems – bare cables supported by ceramic insulators in wood cross arms – by overhead compact distribution lines. This configuration consists of covered cables, polymeric spacers and polymeric insulators.

In the last years, a thorough investigation has been developed at *Lightning Research Center*. This research is dedicated to the role of the dielectric layer of the cables on the increment of voltage withstand. In this context, the present thesis is related to the comprehension of the phenomena and the effects associated to the breakdown process in covered cables.

In this work, experimental results of tests with impulse voltages performed with single- and three-phase structures are presented. Such results compose a set of parameters that model the effects of the breakdown process on compact overhead lines due lightning overvoltage. The main parameters are: (i) minimum and mean values of the disruptive voltages, (ii) time-to-failure, and (iii) the main events related to the breakdown process, such as charge accumulation over the insulation – which is responsible for modify the characteristics of the disruptive process –, the occurrence of partial disruptive discharges and the pinhole formation.

The obtained results indicate that the use of covered cables promotes a weighty increase of the withstand voltage level compared to the use of bare cables – at least 40%. The results have also indicated the polarity effect on the impulse withstand levels of covered cables. When the insulating layer is present, the breakdown voltage values for negative impulses are at least 8% lower than the values for positive impulses. Tests performed with punctured cables have shown a trend of increase of the voltage value with the increase of the distance between the damage and the insulator. In addition, cables that had already been in operation before the tests showed a performance very similar to that obtained for new ones.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Redes de distribuição aérea: (a) convencional e (b) compacta da CEMIG instaladas na região da Pampulha em Belo Horizonte.	2
Figura 2.1 – Representação esquemática do mecanismo de avalanche em um dielétrico gasoso. Reproduzida de (LOPES; NOLASCO, 1996).	10
Figura 2.2 – Efeito da carga espacial produzida por uma avalanche: (a) desenvolvimento de canais de ionização secundários e (b) distorção do campo elétrico. Reproduzida de (KUFFEL et al., 2000).	16
Figura 3.1 – Estruturas típicas empregadas em redes de distribuição compactas. Adaptada de (CEMIG, 2012).	23
Figura 3.2 – Rede de distribuição compacta. Adaptada de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).	24
Figura 3.3 – Principais causas de desligamentos da rede de distribuição da CEMIG entre 2010 e 212. Dados de (SOUZA, 2015).	26
Figura 3.4 – Falha de isolamento em uma rede de distribuição: (a) arco elétrico estabelecido entre o condutor fase e o condutor neutro. O grau de dano depende do condutor utilizado podendo ser (b) leve em condutores nus ou (c) grave em condutores cobertos. Adaptada de (LEE et al., 1982).	28
Figura 3.5 – Curvas V-T obtidas nos ensaios realizados por (POWELL et al., 1965).	31
Figura 3.6 – Detalhe da amarração do cabo ao isolador. Reproduzida de (NAKAMURA et al., 1986).	33
Figura 3.7 - Arranjo experimental do trabalho de (BLENNOW et al., 2000).	35
Figura 3.8 – Tensões suportáveis para o arranjo testado por (BLENNOW et al., 2000).	35
Figura 3.9 – Arranjo dos condutores utilizados nos ensaios. Reproduzida de (DARVENIZA, 2000).	36
Figura 3.10 - Arranjo experimental para representar o evento de incidência direta de descarga sobre estrutura da rede de distribuição. Reproduzida de (SEKIOKA et al., 2008).	39

Figura 4.1 – Tensão de impulso atmosférico padronizado (1,2/50 μ s). Adaptada de (ABNT, 2013).....	42
Figura 4.2 – Tensão de impulso atmosférico cortado na cauda. Adaptada de (ABNT, 2013).....	43
Figura 4.3 – Umidade absoluta do ar em função das leituras dos termômetros de bulbo seco e úmido. Reproduzida de (ABNT, 2013).	46
Figura 4.4 – Componentes da estrutura CM2.....	49
Figura 4.5 – Estrutura trifásica CE2. Reproduzida de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).....	49
Figura 4.6 – Cabos utilizados nos ensaios. Reproduzida de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).....	50
Figura 4.7 – Arranjo para a realização dos ensaios. Adaptada de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).....	50
Figura 4.8 – Gerador de tensões impulsivas modelo Haefely SGSA 600kV 30 kJ.	51
Figura 4.9 – Descarga superficial.	52
Figura 5.1 – Estrutura CM2 com cabo nu.	54
Figura 5.2 – Escova metálica utilizada para a remoção da carga depositada sobre a cobertura do cabo.....	57
Figura 5.3 – Perfuração na cobertura XLPE de um cabo de 15 kV causada por uma descarga disruptiva. Adaptada de (LIMA et al., 2015).....	58
Figura 5.4 – Descarga disruptiva parcial. Reproduzida de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).....	58
Figura 5.5 – Ondas de tensão medidas durante a realização dos ensaios.....	59
Figura 5.6 – Dispersão dos valores de tensão para ocorrência de descargas disruptivas parciais nos ensaios com cabos cobertos com XLPE.	60
Figura 5.7 – Descarga disruptiva plena com perfuração da cobertura dielétrica do cabo. Reproduzida de (SOUZA; GOMES; et al., 2017)	61
Figura 5.8 – Relação entre a tensão disruptiva e o tempo de corte para os ensaios na estrutura monofásica CM2.....	63
Figura 5.9 – Registro das ondas de tensão durante a disrupção dos cabos testados na estrutura CM2.	64

Figura 5.10 – Localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos testados com a estrutura monofásica.	66
Figura 5.11 – Regiões de ocorrência dos furos ao longo da cobertura dos cabos testados.	66
Figura 5.12 – Valores mínimos da tensão disruptiva de polaridade positiva obtidas nos ensaios com cabos intactos e perfurados.	69
Figura 5.13 – Valores mínimos da tensão disruptiva de polaridade negativa obtidas nos ensaios com cabos intactos e perfurados.	69
Figura 5.14 – Posicionamento do cabo para ensaios com amostras com cobertura perfurada.	70
Figura 5.15 – Relação entre a tensão disruptiva e a distância do furo ao isolador para os ensaios com cabos previamente perfurados.	71
Figura 5.16 – Tensão disruptiva em função da localização do furo: ajuste linear.	72
Figura 5.17 – Valores médios das tensões disruptivas associadas à estrutura CE2: cabos XLPE e HDPE.	79
Figura 5.18 – Localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos posicionados no isolador A da estrutura trifásica CE2.	79
Figura 5.19 – Localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos posicionados no isolador B da estrutura trifásica CE2.	80
Figura 5.20 – Localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos posicionados no isolador C da estrutura trifásica CE2.	80
Figura 5.21 – Distribuição dos furos ao longo da cobertura dos cabos considerando todos os ensaios na estrutura monofásica CM2.	82
Figura 5.22 – Distribuição dos furos ao longo da cobertura dos cabos considerando todos os ensaios na estrutura trifásica CE2.	83
Figura 6.1 – Relação entre a tensão disruptiva e a localização dos furos ao longo da cobertura de cabos com e sem cargas estáticas para ensaios com polaridade positiva.	86
Figura 6.2 – Relação entre a tensão disruptiva e a localização dos furos ao longo da cobertura de cabos com e sem cargas estáticas para ensaios com polaridade negativa.	88

Figura 6.3 – Relação entre a tensão disruptiva e a distância do furo ao isolador para os ensaios com cabos previamente perfurados: ensaios com e sem remoção de cargas (polaridade positiva).....	91
Figura 6.4 – Relação entre a tensão disruptiva e a distância do furo ao isolador para os ensaios com cabos previamente perfurados: ensaios com e sem remoção de cargas (polaridade negativa).....	92
Figura 6.5 – Comparação entre os cabos XLPE utilizados nos ensaios.....	98
Figura 6.6 – Relação entre a tensão disruptiva e a localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos XLPE de 150 mm ² testados na estrutura monofásica CM2.	99

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Função trabalho para alguns elementos químicos. Adaptada de (REZENDE, 2004).	11
Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais empregados na cobertura de cabos elétricos utilizados em redes de distribuição compactas. Adaptada de (DAS-GUPTA, 1994).	25
Tabela 3.2 – Tensões disruptivas para a configuração isolador livre de rádio interferência com amarração plástica	34
Tabela 3.3 – Menor valor da tensão de descarga disruptiva para o ar. Adaptada de (DARVENIZA, 2000).	37
Tabela 3.4 – Menor valor da tensão de descarga parcial na superfície da camada XLPE dos cabos. Adaptada de (DARVENIZA, 2000).	38
Tabela 4.1 – Condições atmosféricas de referência.	45
Tabela 4.2 – Valores dos expoentes m para a correção da densidade do ar e w para a correção de umidade em função do parâmetro g . Reproduzida de (ABNT, 2013).	47
Tabela 5.1 – Condições atmosféricas no momento de realização do ensaio de acréscimo e decréscimo para a determinação de U_{50} da estrutura monofásica CM2 (polaridades positiva e negativa).	55
Tabela 5.2 – Valores das tensões suportáveis para a estrutura monofásica CM2 com cabo nu.	55
Tabela 5.3 – Tensões médias disruptivas associadas com a estrutura CM2.	61
Tabela 5.4 – Tensões mínimas disruptivas associadas com a estrutura CM2. ...	63
Tabela 5.5 – Intervalo dos tempos de corte referentes às disrupções nos ensaios com cabos cobertos.	64
Tabela 5.6 – Comparação entre as tensões médias disruptivas para os ensaios com cabos XLPE.	67
Tabela 5.7 – Comparação entre as tensões médias disruptivas para os ensaios com cabos HDPE.	67
Tabela 5.8 – Condições atmosféricas no momento de realização do ensaio de acréscimo e decréscimo para a determinação de U_{50} da estrutura monofásica CE2 (polaridades positiva e negativa).	74

Tabela 5.9 – Valores absolutos das tensões suportáveis de polaridade positiva para a estrutura trifásica CE2 com cabo nu.	75
Tabela 5.10 – Valores absolutos das tensões suportáveis de polaridade negativa para a estrutura trifásica CE2 com cabo nu.	75
Tabela 5.11 – Tensões médias disruptivas associadas com a estrutura CE2 com cabos XLPE.	76
Tabela 5.12 – Tensões mínimas disruptivas associadas com a estrutura CE2 com cabos XLPE.	77
Tabela 5.13 – Tensões médias disruptivas associadas com a estrutura CE2 com cabos HDPE.	78
Tabela 5.14 – Tensões mínimas disruptivas associadas com a estrutura CE2 com cabos HDPE.	78
Tabela 6.1 – Valores médios absolutos da tensão disruptiva para cabos com cobertura XLPE carregada e descarregada para ensaios com polaridade positiva.	86
Tabela 6.2 – Valores mínimos absolutos da tensão disruptiva para cabos com cobertura XLPE carregada e descarregada para ensaios com polaridade positiva.	87
Tabela 6.3 – Valores médios absolutos da tensão disruptiva para cabos com cobertura XLPE carregada e descarregada para ensaios com polaridade negativa.	89
Tabela 6.4 – Valores mínimos absolutos da tensão disruptiva para cabos com cobertura XLPE carregada e descarregada para ensaios com polaridade negativa.	89
Tabela 6.5 – Valores mínimos absolutos da tensão disruptiva positiva para cabos nus e cobertos com a camada XLPE perfurada para ensaios com e sem remoção de cargas.	90
Tabela 6.6 – Valores mínimos absolutos da tensão disruptiva negativa para cabos nus e cobertos com a camada XLPE perfurada para ensaios com e sem remoção de cargas.	91
Tabela 6.7 – Valores médios absolutos das tensões disruptivas para o condutor nu e para o condutor coberto com XLPE obtidos nos ensaios com a estrutura monofásica CM2.	94
Tabela 6.8 – Valores mínimos absolutos das tensões disruptivas para o condutor nu e para o condutor coberto com XLPE obtidos nos ensaios com a estrutura monofásica CM2.	94
Tabela 6.9 – Características dos cabos XLPE fornecidas pelos fabricantes.	96

Tabela 6.10 – Resultados dos ensaios com cabos cobertos com XLPE na estrutura monofásica CM2.	96
Tabela 6.11 – Tensões disruptivas em função do número de amostras.....	97
Tabela 6.12 – Características construtivas dos cabos XLPE fornecidas pelos fabricantes.....	98
Tabela 6.13 – Características elétricas dos cabos XLPE fornecidas pelos fabricantes.....	98
Tabela 6.14 – Condições atmosféricas no momento de realização do ensaio de acréscimo e decréscimo para a determinação de U_{50} da estrutura monofásica CM2 (polaridades positiva e negativa).	99
Tabela 6.15 – Valores médios das tensões disruptivas para cabos XLPE de 50 mm ² e 150 mm ² obtidos nos ensaios com a estrutura monofásica CM2.	100
Tabela 6.16 – Valores mínimos das tensões disruptivas para cabos XLPE de 50 mm ² e 150 mm ² obtidos nos ensaios com a estrutura monofásica CM2.	100

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
HDPE	Polietileno de alta densidade (do inglês, <i>high density polyethylene</i>)
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (do inglês, <i>International Electrotechnical Commission</i>)
LDPE	Polietileno de baixa densidade (do inglês, <i>low density polyethylene</i>)
LRC	Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas da UFMG (ou <i>Lightning Research Center</i>)
NBI	Nível Básico de Isolamento
PE	Polietileno termoplástico
PVC	Policloreto de polivinila
RDC	Rede de Distribuição Aérea Compacta
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
XLPE	Polietileno reticulado (do inglês, <i>cross-linked polyethylene</i>)

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Relevância e Motivação.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Metodologia.....	4
1.4	Organização do texto.....	5
2	Processos Disruptivos em Meios Dielétricos.....	7
2.1	Considerações Iniciais.....	7
2.2	Disrupção em Dielétricos Gasosos.....	8
2.2.1	Teoria de Townsend.....	9
2.2.2	Teoria de Streamer.....	15
2.3	Disrupção em Dielétricos Líquidos.....	17
2.4	Disrupção em Dielétricos Sólidos.....	18
2.5	Considerações Finais.....	20
3	Dinâmica dos Processos de Disrupção em Cabos Cobertos: Estado da Arte.....	22
3.1	Panorama do Uso de Redes de Distribuição Compactas.....	22
3.2	Processos Disruptivos em Cabos Cobertos.....	26
3.3	Cobertura Protetora dos Cabos e Suportabilidade Elétrica.....	30
3.3.1	Artigo de (POWELL et al., 1965).....	30
3.3.2	Artigo de (GILL et al., 1967).....	31
3.3.3	Artigo de (NAKAMURA et al., 1986).....	32
3.3.4	Artigo de (BLENNOW et al., 2000).....	34
3.3.5	Artigo de (DARVENIZA, 2000).....	36
3.3.6	Artigo de (SEKIOKA et al., 2008).....	38
3.4	Considerações Finais.....	39

4	Investigação experimental para determinação da suportabilidade elétrica de estruturas típicas de redes de distribuição compactas	41
4.1	Considerações iniciais.....	41
4.2	Parâmetros de interesse para análise de suportabilidade elétrica de arranjos isolantes.....	42
4.2.1	Tensões Disruptivas.....	42
4.2.2	Procedimentos para Determinação das Tensões Disruptivas	44
4.2.3	Correção para as Condições Ambientais de Referência.....	45
4.3	Panorama geral dos ensaios com cabos cobertos.....	47
5	Resultados Experimentais	53
5.1	Considerações iniciais.....	53
5.2	Estrutura monofásica CM2	54
5.2.1	Ensaio com cabos nus	54
5.2.2	Ensaio com cabos cobertos	56
5.3	Estrutura trifásica CE2.....	74
5.3.1	Cabos nus.....	74
5.3.2	Ensaio com cabos cobertos	76
5.4	Comentário final	81
6	Aspectos de interesse para a modelagem dos efeitos associados à falha de isolamento dos cabos cobertos	84
6.1	Considerações iniciais.....	84
6.2	Efeito das cargas superficiais.....	85
6.2.1	Tensões impulsivas de polaridade positiva	85
6.2.2	Tensões impulsivas de polaridade negativa.....	88
6.2.3	Comentário final	89
6.3	Efeito da polaridade	93
6.4	Efeito do número de amostras.....	95

6.5	Ensaio com cabos cobertos retirados de serviço	97
7	Conclusões	101
7.1	Considerações iniciais.....	101
7.2	Conclusões	101
7.2.1	Estrutura monofásica CM2.....	102
7.2.2	Estrutura trifásica CE2.....	106
7.3	Propostas de continuidade.....	107
	Referências Bibliográficas.....	109
	Anexos.....	113
A)	Trabalhos publicados durante a realização deste trabalho.....	113
A.1	Periódicos	113
A.2	Congressos	113
B)	Premiação recebida em congresso	114

1 Introdução

1.1 Relevância e Motivação

As descargas atmosféricas são uma das principais causas de falha de operação dos sistemas elétricos de potência, especialmente de linhas de transmissão e distribuição de energia. A interação das descargas com esses sistemas advém de dois tipos de eventos: (i) as descargas diretas, capazes de injetar correntes impulsivas com amplitudes elevadas na estrutura atingida, e (ii) as descargas indiretas, que correspondem à incidência de descargas em pontos próximos ao sistema elétrico, cujo efeito se refere às tensões induzidas pelos campos eletromagnéticos associados ao fluxo de corrente ao longo do canal da descarga (SILVEIRA, 2006).

Do ponto de vista da análise dos efeitos das descargas nas linhas, falhas de isolamento podem ocorrer primordialmente devido às sobretensões resultantes no sistema elétrico. Essas falhas podem comprometer o desempenho do sistema, especialmente nos casos em que ocorra o desligamento da linha, gerando prejuízos para concessionárias e consumidores. No que tange às causas do desligamento, um dos principais motivos é o estabelecimento de um arco elétrico entre condutores fase ou entre um condutor fase e um ponto aterrado, especialmente se esse arco for sustentado pela corrente em frequência industrial, constituindo dessa forma um curto-circuito.

No sentido de promover melhorias no desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica em média e baixa tensão e prezando por questões de segurança, visto que grande parte da extensão desses sistemas se encontra em áreas urbanas, a chamada Rede de Distribuição Aérea Convencional tem sido gradativamente substituída por novas configurações, as quais fazem uso de cabos com cobertura isolante. Um exemplo de

aplicação consiste na implantação da Rede de Distribuição Aérea Compacta (RDC) no sistema da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

Ao contrário da configuração convencional, que utiliza tradicionalmente condutores nus fixados a isoladores posicionados sobre cruzetas de madeira, as redes de distribuição compactas utilizam cabos cobertos com polietileno e espaçadores no formato de losango para sustentar os condutores. Essa cobertura dos cabos na rede compacta é capaz de evitar correntes de fuga elevadas em caso de contato acidental com árvores, por exemplo. No entanto, ela não seria suficiente, ao menos em tese, para promover a segurança de pessoas no caso de toque acidental ou para garantir o isolamento elétrico da rede no caso de contato entre circuitos diferentes (ROCHA et al., 2002). A Figura 1.1 ilustra as configurações típicas de redes de distribuição aéreas dos tipos convencional e compacta.

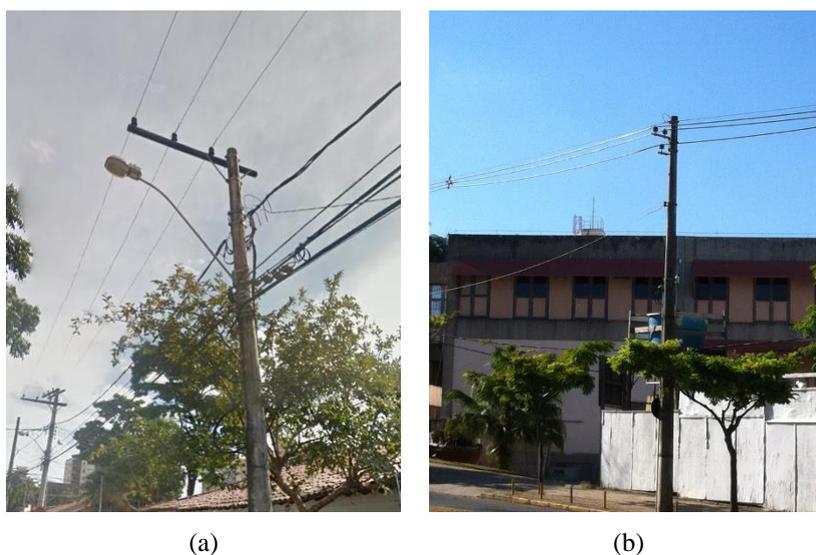


Figura 1.1 – Redes de distribuição aérea: (a) convencional e (b) compacta da CEMIG instaladas na região da Pampulha em Belo Horizonte.

A despeito da crescente utilização dessa topologia de rede, a literatura referente ao papel desempenhado pela cobertura dielétrica dos cabos no aumento da sua suportabilidade elétrica ainda carece de um maior número de obras dedicadas ao tema. Nos últimos anos, o Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas da UFMG (LRC – *Lightning Research Center*) tem realizado uma pesquisa articulada referente à suportabilidade elétrica de redes de distribuição compactas, na qual se insere a realização, até o momento, de três dissertações de mestrado (SOUZA, 2015), (LIMA, 2015), (GOMES, 2015), um conjunto de trabalhos em congressos internacionais

e periódicos de primeira linha (SOUZA et al., 2014), (LIMA et al., 2015), (GOMES et al., 2015), (SOUZA et al., 2016a), (SOUZA et al., 2016b), (LIMA et al., 2017), (SOUZA et al., 2017), (SOUZA; SILVEIRA; et al., 2017), (LIMA; DE CONTI; et al., 2017) e a presente tese de doutorado. Os resultados dessa pesquisa têm indicado que as linhas aéreas com cabos cobertos apresentam um melhor desempenho em relação às linhas compostas por condutores nus. No entanto, alguns aspectos ainda não foram amplamente abordados e motivaram a realização desta tese de doutorado, a saber: os eventos associados ao processo disruptivo, os níveis de suportabilidade a tensões impulsivas de estruturas monofásicas e trifásicas, o efeito da utilização de diferentes materiais na cobertura dos cabos, o impacto do número de amostras no valor da tensão disruptiva, e a análise do efeito da presença de cargas superficiais na ocorrência de descargas disruptivas.

1.2 Objetivos

O tema “Falha de isolamento em cabos cobertos de redes de distribuição compactas” é pouco explorado na literatura tradicional do setor elétrico, sobretudo no Brasil. Atualmente, o estágio de conhecimento desse tema ainda não se encontra em um nível avançado. Sabe-se, todavia, que os processos disruptivos em redes elétricas com cabos cobertos guardam importantes diferenças em relação à disrupção em cabos nus (NAKAMURA et al., 1986). Esse fato justifica a realização de uma investigação dedicada ao tema. Tal investigação tem como objetivo geral prover elementos que proporcionem uma melhor compreensão do desempenho de redes de distribuição compactas frente aos efeitos de descargas atmosféricas, contribuindo para a evolução do conhecimento científico relativo ao processo de ruptura do isolamento dessas redes e ao comportamento eletromagnético de cabos com cobertura dielétrica frente a ensaios com ondas impulsivas.

Os objetivos específicos desta tese de doutorado são:

- Avaliar o comportamento de estruturas monofásicas e trifásicas frente a tensões de impulso atmosférico padronizado (1,2/50 μ s);
- Determinar as tensões disruptivas associadas aos cabos cobertos com polietileno reticulado (XLPE) e polietileno de alta densidade (HDPE)

posicionados nas estruturas avaliadas para as polaridades positiva e negativa;

- Identificar fenômenos relacionados à falha de isolamento em redes de distribuição compactas, como o acúmulo de cargas sobre a cobertura dielétrica dos cabos, a ocorrência de descargas parciais e a perfuração da camada isolante;
- Investigar possíveis relações entre os parâmetros de maior interesse para a avaliação de suportabilidade elétrica das estruturas testadas: tensões disruptivas, tempo de corte e localização dos furos na cobertura dos cabos;
- Apresentar os efeitos de diferentes fatores nos níveis de tensão suportável das estruturas avaliadas, sendo eles: (i) cargas superficiais depositadas ao longo da camada dielétrica dos cabos cobertos; (ii) polaridade das tensões impulsivas aplicadas nesses cabos (iii) número de amostras utilizadas nos ensaios e (iv) utilização de amostras de cabos retirados de serviço nos ensaios de suportabilidade elétrica.

1.3 Metodologia

Uma análise mais detalhada do tema revela a necessidade de uma abordagem que busque o estudo e a compreensão dos fenômenos envolvidos na falha de isolamento de redes de distribuição compactas, em um primeiro momento. Nesse sentido, o trabalho compreende a realização de uma sequência de investigações de natureza teórica e experimental.

O ponto de partida do trabalho se baseia em atividade sistemática de ensaio em laboratório com foco na estimativa dos valores de tensão de descarga disruptiva para arranjos compostos por cabos desprovidos de cobertura adotando-se os procedimentos descritos em norma brasileira (ABNT, 2013). Para efeito de comparação dos níveis básicos de isolamento de arranjos com cabos cobertos, tornou-se necessário o desenvolvimento de procedimentos próprios que atendam o objetivo inicial do estudo, tendo em vista que ensaios em redes de distribuição compactas apresentam desafios não previstos na norma supracitada.

Este trabalho contempla os ensaios realizados utilizando duas estruturas tipicamente empregadas nas instalações de redes de distribuição compactas. Por uma questão de

simplicidade, optou-se inicialmente pela realização dos ensaios em uma estrutura monofásica composta por um condutor coberto com XLPE sustentado por um isolador polimérico de 15 kV. Esse conjunto foi submetido a sucessivas tensões de impulso atmosférico padronizado (1,2/50 μ s). Em seguida, os ensaios foram realizados utilizando uma estrutura trifásica. Dentre os principais resultados obtidos, destacam-se as tensões mínimas necessárias para a ocorrência de descargas parciais e descargas disruptivas plenas com perfuração da camada isolante; a distribuição dos furos ao longo da superfície do cabo; a determinação dos tempos para disrupção e também o registro fotográfico de tais fenômenos.

1.4 Organização do texto

O texto desta tese de doutorado é dividido em sete capítulos. Os próximos parágrafos apresentam um breve resumo do conteúdo de cada um deles.

No **Capítulo 2** são descritos alguns dos principais processos que levam materiais dielétricos à disrupção, com foco nos meios gasoso e sólido.

Uma revisão de alguns dos principais trabalhos experimentais relacionados ao tema é apresentada no **Capítulo 3**. Tais trabalhos tratam de certos aspectos da suportabilidade de redes de distribuição compactas frente a sobretensões de origem atmosférica, sobretudo com relação ao papel desempenhado pela cobertura protetora dos cabos no aumento da sua suportabilidade elétrica.

No **Capítulo 4** são apresentados parâmetros e procedimentos de interesse para a avaliação da suportabilidade elétrica de arranjos de redes aéreas de distribuição.

O **Capítulo 5** é dedicado à investigação experimental realizada. São apresentados os procedimentos experimentais adotados e os resultados alcançados nos ensaios realizados com as estruturas monofásicas e trifásicas utilizando condutores nus e cobertos. Dentre os resultados, destacam-se os valores das tensões disruptivas, o tempo de corte e a localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos. Além disso, são realizadas análises de fenômenos relacionados ao processo disruptivo.

O **Capítulo 6** aborda aspectos de interesse relacionados à falha de isolamento em redes de distribuição compactas. De forma geral, são avaliados os impactos da presença de cargas estáticas na cobertura dielétrica dos cabos e da polaridade da tensão aplicada

na suportabilidade elétrica da estrutura monofásica. Além disso, o efeito do aumento do número de amostras utilizadas nos ensaios também é abordado, bem como os resultados obtidos nos ensaios com cabos que já estiveram em operação na rede da concessionária de energia elétrica.

As conclusões e as propostas de continuidade estão no **Capítulo 7**. As referências bibliográficas encontram-se listadas ao final do texto.

2 Processos Disruptivos em Meios Dielétricos

2.1 Considerações Iniciais

De forma geral, uma descarga disruptiva resulta de uma falha de isolamento quando um arranjo isolante se encontra sob solicitação elétrica. No caso de uma rede de distribuição de energia elétrica, o desempenho elétrico envolve a capacidade do isolamento de suportar as diversas solicitações que acometem seus componentes.

O arranjo isolante deve garantir o pleno funcionamento da linha, evitando que os pontos energizados entrem em contato com as partes aterradas. No entanto, a ocorrência de sobretensões pode resultar na perda momentânea ou permanente da capacidade desse arranjo em desempenhar seu papel. Dependendo de fatores como a amplitude da sobretensão e o tempo durante o qual o arranjo fica submetido a tal solicitação, pode ocorrer uma descarga disruptiva com o eventual estabelecimento de um arco elétrico.

Em uma rede de distribuição aérea compacta, o processo disruptivo está associado a dois tipos de meios (i) gasoso, envolvendo o ar que atua como um isolante e (ii) sólido, relacionado aos cabos cobertos. Esse processo guarda uma série de importantes eventos a nível microscópico. Além disso, do ponto de vista eletromagnético, esse processo depende da intensidade do campo elétrico estabelecido na região de interesse da rede e da rigidez dielétrica dos componentes do arranjo isolante. Tal parâmetro é de extrema importância para a o projeto e avaliação de desempenho de qualquer sistema elétrico, especialmente levando-se em consideração os requisitos de segurança e proteção.

A rigidez dielétrica de um material isolante pode ser definida como o máximo valor de campo elétrico ao qual o material pode ser submetido sem perder sua característica isolante. Ela depende de diversos parâmetros, dentre eles, pressão, temperatura, umidade, configuração do campo elétrico, características da tensão aplicada (forma de onda, polaridade, amplitude) e imperfeições no material (NAIDU; KAMARAJU, 1996).

Em um material isolante, os elétrons na banda de valência normalmente estão fortemente ligados aos átomos adjacentes. Como essas ligações são difíceis de serem quebradas, praticamente não há elétrons livres para promover uma corrente de condução à temperatura ambiente. Os materiais isolantes são caracterizados por uma grande barreira de energia entre as bandas de valência e condução (da ordem de 4 eV a 9 eV). Nesses materiais, os elétrons ocupam todos os níveis de energia na banda de valência. Conseqüentemente, a banda de condução é vazia em condições normais de temperatura e de baixa intensidade de campo elétrico (SZE; LEE, 2012).

Entretanto, se a intensidade do campo aumenta, as forças eletrostáticas atuando nas ligações intermoleculares podem ser suficientes para liberar alguns elétrons, dando ao material a condição para que ele passe a se comportar como um condutor. Se o campo for removido, o dielétrico pode recuperar integralmente suas propriedades isolantes, como é o caso dos gases e alguns líquidos. Entretanto, para dielétricos sólidos tal comportamento não é observado. Esse fenômeno é conhecido como ruptura elétrica e seu comportamento depende de diversos fatores como temperatura, umidade, impurezas presentes no material, tempo de exposição do dielétrico ao campo elétrico, entre outros (NAIDU; KAMARAJU, 1996). Neste capítulo, são apresentados maiores detalhes a respeito dos processos disruptivos em dielétricos, com foco nos meios gasoso e sólido.

2.2 Disrupção em Dielétricos Gasosos

Em sistemas elétricos de potência, os materiais dielétricos utilizados podem ser encontrados nos três estados da matéria. Em isoladores, por exemplo, são empregados vidro, porcelana ou polímeros. Diferentes tipos de óleos são encontrados em transformadores e capacitores. E dois dielétricos gasosos comumente utilizados são o ar atmosférico – composto principalmente por nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2) – e o hexafluoreto de enxofre (SF_6), largamente utilizado em subestações

compactas. Em condições normais de temperatura, pressão e para baixos valores de campo elétrico, o ar comporta-se como um bom isolante. Estima-se que a condutividade da camada de ar próxima à superfície terrestre (na biosfera) esteja na faixa entre 10^{-14} e 10^{-12} S/m. Considerando campos elétricos uniformes, o valor da rigidez dielétrica do ar pode alcançar até 3 MV/m (VISACRO, 2005).

Na condição de solicitação elétrica, porém, podem ocorrer descargas disruptivas curto-circuitando o isolante. Descargas elétricas em gases podem ser classificadas em dois tipos: (i) não sustentadas e (ii) autossustentadas. A descarga não sustentada é caracterizada pelo curto-circuito momentâneo do isolante. Durante esse evento, a tensão sobre o dielétrico é momentaneamente reduzida a zero ou a um valor muito baixo. Já a descarga autossustentada é caracterizada pelo estabelecimento de um arco elétrico que pode ser mantido pelo fluxo de corrente até que um fator externo o extinga (ABNT, 2013).

A descarga disruptiva em um gás é chamada de centelhamento e corresponde à transição de uma descarga não sustentada para uma autossustentada em um processo conhecido como ionização. A literatura apresenta duas teorias principais que buscam explicar os mecanismos que resultam em ruptura nos gases: (i) Teoria de Townsend (TOWNSEND, 1915) e (ii) Teoria de *streamer* (MEEK, 1940), (RAETHER, 1956).

2.2.1 Teoria de Townsend

De modo simplificado, pode-se considerar que as moléculas que compõem o ar estão em movimento contínuo aleatório e em constante colisão entre si. Geralmente, colisões entre partículas podem ser de dois tipos: (i) elástica, na qual não há perda de energia cinética entre os instantes anterior e posterior ao choque, e (ii) inelástica, na qual parte da energia cinética das partículas é transformada em energia potencial. Considerando que duas partículas de massas m e M (sendo $m \ll M$) estejam envolvidas em uma colisão e que a partícula de massa M esteja inicialmente em uma velocidade muito inferior à velocidade da partícula de massa m , verifica-se a conversão da energia cinética da partícula incidente em energia potencial da partícula atingida.

Essa observação é importante pois sinaliza que átomos ou moléculas presentes no ar podem ganhar significativa energia potencial em colisões com elétrons¹. Além disso, tem-se um indicativo de um processo que pode resultar em uma mudança de comportamento do dielétrico gasoso, ou seja, quando este deixa de ser um isolante e passa a apresentar a capacidade de condução elétrica (KUFFEL et al., 2000).

Sabe-se que em um meio gasoso existem elétrons livres oriundos de fontes naturais de radiação, raios cósmicos etc. Se tais elétrons penetram numa região de campo elétrico elevado, eles passam a sofrer ação da força do campo e são acelerados. Caso a energia cinética desses elétrons seja maior que a energia de ionização² (eV_i) de um átomo ou molécula na rota de colisão, pode ocorrer a remoção de um elétron da camada de valência mais externa, resultando na formação de um íon. Esse processo é conhecido como ionização por colisão e pode resultar na ruptura do dielétrico à medida em que o número de elétrons livres aumenta significativamente em um mecanismo de avalanche. A Figura 2.1 ilustra esquematicamente o processo.

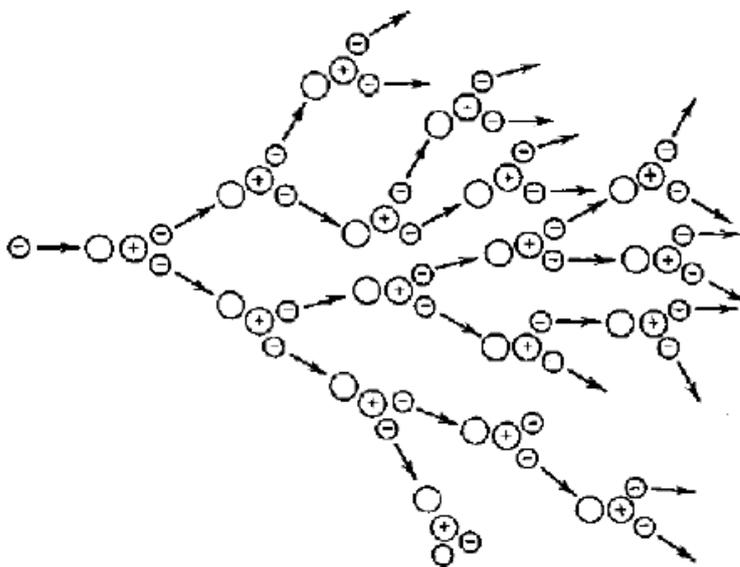


Figura 2.1 – Representação esquemática do mecanismo de avalanche em um dielétrico gasoso. Reproduzida de (LOPES; NOLASCO, 1996).

¹ A massa de um elétron é aproximadamente 1836 vezes menor que a massa de um próton e de um nêutron.

² Energia de ionização é a energia mínima necessária para remover um elétron de um átomo no estado gasoso (no qual não são consideradas as forças intermoleculares) e no seu estado fundamental (CHANG; GOLDSBY, 2013).

Em ensaios de alta tensão, os eletrodos desempenham um importante papel nas descargas que ocorrem no dielétrico. Durante a aplicação de uma tensão entre dois eletrodos planos e paralelos imersos no ar, por exemplo, o cátodo é responsável pelo suprimento dos elétrons para a manutenção do mecanismo de avalanche. Em condições normais, esse suprimento decorre da ação de forças eletrostáticas resultantes da aplicação do campo elétrico entre os eletrodos. A energia necessária para um elétron vencer as forças de atração internas e atravessar a superfície de um metal é definida como função trabalho (W_a) e é uma característica do material (REZENDE, 2004). A Tabela 2.1 apresenta a função trabalho para alguns elementos químicos.

Tabela 2.1 – Função trabalho para alguns elementos químicos. Adaptada de (REZENDE, 2004).

Elemento	Prata	Alumínio	Cobre	Ferro	Tungstênio
W_a (eV)	4,74	2,98 – 4,43	4,07 – 4,70	3,91 – 4,60	4,35 – 4,60

Neste texto são destacadas quatro formas de emissão de elétrons a partir da superfície do eletrodo:

- Emissão por campo;
- Emissão fotoelétrica;
- Emissão por íons positivos e por impacto de átomos excitados;
- Emissão termiônica.

Na emissão por campo, elétrons podem ser arrancados da superfície do eletrodo quando são aplicados campos eletrostáticos de alta intensidade. À temperatura $T = 0$ K, os elétrons ocupam os estados de menor energia de modo a preencher todos os estados até o nível de Fermi E_F (CHANG; GOLDSBY, 2013). Quando a temperatura é alterada, essa distribuição modifica-se de forma a proporcionar aos elétrons uma probabilidade de ocuparem estados de energia superiores ao nível de Fermi ($E > E_F$). Se, além disso, um campo elétrico for aplicado na superfície do metal a ponto de alterar a barreira de potencial, os elétrons que ocupam níveis superiores de energia – próximos a E_F – terão uma probabilidade de atravessar a barreira de potencial em um mecanismo conhecido como tunelamento. As intensidades típicas de campo elétrico que produzem emissão de elétrons por esse mecanismo são da ordem de $10^9 - 10^{10}$ V/m e podem ser observadas em

pontas agudas e em irregularidades microscópicas na superfície de eletrodos com a aplicação de uma tensão da ordem de alguns quilovolts (KUFFEL et al., 2000).

A emissão fotoelétrica ocorre quando o cátodo é iluminado por ondas eletromagnéticas. Se a energia dessa radiação, na forma de fótons³, for igual ou superior à função trabalho (Tabela 2.1), elétrons que estão menos ligados aos átomos são arrancados da superfície do eletrodo. Para a maioria dos metais, a frequência das ondas que causam emissão fotoelétrica está na faixa do ultravioleta (10^{15} a 10^{16} Hz).

No caso de fótons com energia que supera a função trabalho, o excesso de energia é transferido para o elétron na forma de energia cinética. Conforme já exposto, esse elétron pode ser capaz de provocar ionização se sua energia for superior à energia de ionização de um outro átomo neutro, por exemplo. Por outro lado, se a energia cinética do elétron for menor que a energia de ionização, um elétron na camada de valência mais externa do átomo atingido na colisão pode ser excitado para um estado de energia superior, permanecendo nesse estado durante um período de tempo da ordem de 10^{-7} a 10^{-10} segundos. Na volta para o estado ocupado anteriormente, o átomo emite um quantum de energia na forma de um fóton, que por sua vez pode ionizar outro átomo cuja energia de ionização seja igual ou menor que a energia do fóton. Esse processo é conhecido como fotoionização e consiste em um processo secundário no mecanismo de Townsend, sendo, contudo, relevante na disrupção por *streamer* (KUFFEL et al., 2000).

Elétrons também podem ser emitidos de superfícies metálicas pelo bombardeamento de íons positivos ou átomos metaestáveis. Um átomo ou molécula metaestável é uma partícula excitada cujo tempo nesse estado é muito grande (da ordem de 10^{-3} s) comparado ao tempo de excitação de uma partícula regular, que é da ordem de 10^{-8} s (NAIDU; KAMARAJU, 1996). Para causar uma emissão eletrônica, o íon deve ser capaz de retirar dois elétrons, um que será utilizado para neutralizá-lo e o outro que será efetivamente ejetado do eletrodo. A energia mínima necessária para esse tipo de emissão é, portanto, duas vezes a função trabalho. Matematicamente:

³ Segundo (EINSTEIN, 1905), a radiação eletromagnética é quantizada em energia na forma de pacotes, chamados fótons. Os fótons podem se comportar como partículas com velocidade da luz e massa de repouso nula.

$$W_K + W_p \geq 2W_a \quad (2.1)$$

onde W_K e W_p são, respectivamente, as energias cinética e potencial do íon incidente.

Dentre os processos secundários no mecanismo de Townsend, a emissão eletrônica por íons positivos é o principal deles. Por terem uma energia potencial elevada, partículas metaestáveis também são capazes de ejetar elétrons do eletrodo ou ionizar átomos e moléculas neutras em colisões (KUFFEL et al., 2000).

A literatura ainda apresenta outro tipo de emissão eletrônica, a qual corresponde à retirada de elétrons pelo fornecimento de energia térmica. Em metais à temperatura ambiente, a energia térmica média de um elétron é de aproximadamente 0,04 eV; ou seja, muito menor que os valores da função trabalho apresentados na Tabela 2.1. Teoricamente, se a temperatura é aumentada até valores na faixa entre 1500 K e 2500 K, os elétrons receberão energia suficiente para, cruzar a barreira superficial por meio de vibrações. Entretanto, com exceção do tungstênio, a temperatura de fusão dos metais da Tabela 2.1 é inferior ou reside nessa mesma faixa. Portanto, esse processo raramente é observado em eletrodos nos ensaios de suportabilidade elétrica (NAIDU; KAMARAJU, 1996).

Uma vez apresentados os processos ionizantes, vale a pena ressaltar que, sob condições de equilíbrio termodinâmico e de pressão atmosférica, a taxa de formação de íons é igual à taxa de recombinação, a qual consiste na neutralização de partículas eletricamente carregadas em um meio. Na recombinação elétron-íon, o elétron livre colide com um íon positivo, liberando um fóton. Já sob altas pressões, um íon positivamente carregado pode ligar-se a um íon negativo, configurando a recombinação íon-íon.

Além da recombinação, existe outro processo que contribui para a chamada deionização do meio. Esse processo consiste na formação de íons negativos por *attachment* e depende da afinidade eletrônica, a qual exprime a atração de um átomo por um elétron. Ela é definida como a variação da energia quando um elétron é adicionado a uma molécula ou átomo no estado gasoso. Gases que apresentam a propriedade de absorção de elétrons livres são classificados como eletronegativos e são largamente utilizados como isolantes em sistemas elétricos de potência.

Uma primeira tentativa de quantificar o número de elétrons livres produzidos no mecanismo de avalanche foi proposta por (TOWNSEND, 1915). Considerando-se que n_0 seja o número inicial de elétrons emitidos do cátodo e que n seja o número de elétrons em uma distância x a partir do cátodo, o acréscimo desse número dn em uma distância dx é dada por:

$$dn = \alpha ndx \quad (2.2)$$

onde α é o número de elétrons produzidos por um elétron por unidade de comprimento na direção do campo elétrico aplicado. Essa quantidade é conhecida como primeiro coeficiente de ionização de Townsend e depende não apenas da pressão do gás como também da relação entre o campo elétrico e a pressão. Integrando (2.2) ao longo da distância d de separação entre os eletrodos, tem-se que:

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (2.3)$$

onde o termo $e^{\alpha d}$ representa a avalanche eletrônica. A Eq. (2.3) pode ser reescrita em termos da corrente deixando o cátodo, conforme mostra a Eq. (2.4):

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.4)$$

Analogamente, define-se o coeficiente de *attachment* η . Ele representa o número de íons negativos formados pela captura de elétrons livres por unidade de comprimento na direção do campo elétrico. Considerando que os mecanismos de avalanche e *attachment* ocorram simultaneamente, o número de elétrons livres em qualquer ponto ao longo do caminho entre os eletrodos pode ser estimado como:

$$n = n_0 e^{(\alpha-\eta)x} \quad (2.5)$$

Já a corrente passa a ter duas componentes: uma resultante do fluxo de elétrons e outra proveniente dos íons negativos (KUFFEL et al., 2000):

$$I = I_0 \left[\frac{\alpha}{\alpha - \eta} e^{(\alpha-\eta)d} - \frac{\eta}{\alpha - \eta} \right] \quad (2.6)$$

É conveniente condensar esses coeficientes em um único parâmetro $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$, o qual representa o coeficiente de ionização efetiva. Além desse, Townsend postulou um

segundo coeficiente γ de forma a se incluir o efeito dos processos de emissão eletrônica do eletrodo. Com isso, a corrente de (2.4) é reescrita como:

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.7)$$

Dessa forma, teoricamente se a parcela $\gamma(e^{\alpha d} - 1) \rightarrow 1$, a corrente tende a um valor infinitamente elevado, configurando a disrupção. Contudo, na prática, essa corrente será limitada pelo circuito. Considerando a ocorrência da deionização por *attachment*, pode-se definir o seguinte critério para disrupção:

- Se $\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1$, o número de elétrons produzidos é suficiente para produzir sucessivas avalanches, levando à disrupção do dielétrico.
- Se $\gamma(e^{\alpha d} - 1) < 1$, a corrente I não se mantém por si, ou seja, a retirada da fonte que produz a corrente I_0 leva à interrupção do processo.

2.2.2 Teoria de Streamer

De acordo com a Teoria de Townsend, o mecanismo fundamental que leva um dielétrico gasoso à disrupção é a avalanche eletrônica. Contudo, em sua formulação – Eq. (2.7) – o termo $e^{\alpha d}$ somente explica o crescimento da avalanche se o campo elétrico devido à presença de elétrons e íons for desprezível em relação ao campo externo aplicado.

Na medida em que as colisões vão acontecendo e a disponibilidade de elétrons no dielétrico aumenta, a quantidade de íons também cresce. Dessa forma, quando a concentração de íons é elevada, ocorre significativa distorção do campo elétrico devido à carga espacial presente no meio. Como resultado, o processo de avalanche se enfraquece. Essa carga espacial transforma a avalanche em pequenos canais de ionização chamados *streamers* (KUFFEL et al., 2000).

De acordo com o modelo proposto por (MEEK, 1940), quando um canal ionizado atinge um comprimento crítico, o campo elétrico das cargas espaciais somado ao campo elétrico aplicado ocasiona intensa ionização e excitação das partículas do gás localizadas na frente da avalanche. Recombinações entre íons positivos e elétrons emitem fótons os quais geram elétrons secundários via processos de fotoionização. Esses elétrons, sob a

influência do campo elétrico aplicado, resultam no desenvolvimento de avalanches secundárias. Uma vez que os fótons viajam com a velocidade da luz, o processo de formação dos canais de condução se desenvolve rapidamente através do *gap*. Esse processo é ilustrado na Figura 2.2 (a).

Na avalanche, os elétrons se movem mais rapidamente em comparação aos íons positivos. Com isso, ocorre uma intensificação do campo elétrico na direção radial na frente da avalanche, conforme indicado esquematicamente na Figura 2.2 (b). O campo elétrico resultante na frente da avalanche é então $E + E_r$, onde E_r é a parcela devida à carga espacial. Já na região positiva da avalanche, o campo é reduzido para um valor $E - E_r$. Dessa forma, a avalanche rapidamente atinge um comprimento crítico x_c dando origem a um *streamer* direcionado para o ânodo. A evolução do processo leva ao estabelecimento de um canal de plasma conectando o ânodo ao cátodo, configurando a disrupção.

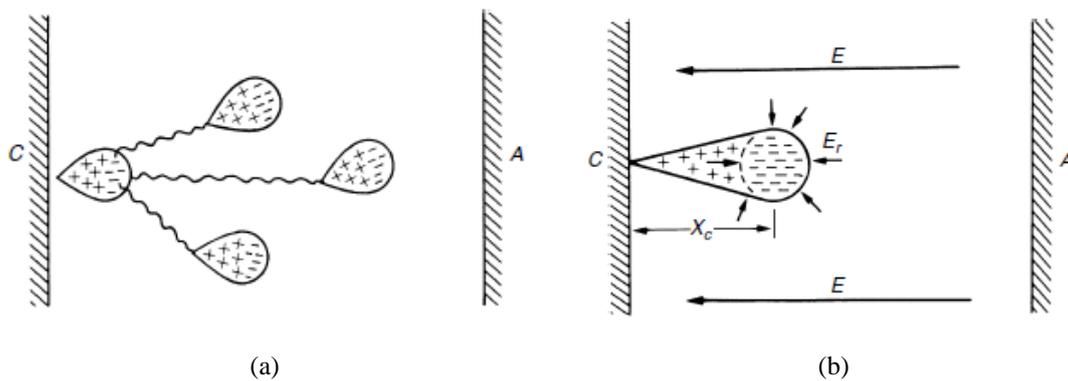


Figura 2.2 – Efeito da carga espacial produzida por uma avalanche: (a) desenvolvimento de canais de ionização secundários e (b) distorção do campo elétrico. Reproduzida de (KUFFEL et al., 2000).

De acordo com essa condição, a transição do mecanismo de avalanche para a disrupção por *streamer* tem início quando $E_r \approx E$ e o canal é estabelecido quando a avalanche cruza o *gap* ($x_c = d$). Baseado nesse critério, (RAETHER, 1956) relaciona o comprimento crítico da avalanche na direção do campo aplicado (x_c) ao campo elétrico devido à carga espacial (E_r) e ao campo elétrico aplicado externamente (E). Matematicamente:

$$\alpha x_c = 17,7 + \ln x_c + \ln \frac{E_r}{E} \quad (2.8)$$

Com relação aos processos apresentados – mecanismo de Townsend e disrupção por *streamer* – acredita-se que, na condição de campo elétrico uniforme, para baixos valores de pd – produto entre a pressão do ar (p) e a distância do gap (d) – e para valores de pressão aproximadamente entre 1 e $40 \cdot 10^3$ Pa, o mecanismo de Townsend atue de forma predominante. Já para valores elevados de pressão e do produto pd , a disrupção por *streamer* ganha importância. Contudo, ainda há controvérsias em relação ao mecanismo que atua de forma predominante na disrupção em dielétricos gasosos, especialmente na condição de campos não uniformes (NAIDU; KAMARAJU, 1996).

2.3 Disrupção em Dielétricos Líquidos

Os processos disruptivos em líquidos encontram-se em um estágio de entendimento menos avançado em comparação aos processos relativos aos gases. A literatura aponta que o caminho para estudos que buscam um maior entendimento do tema deve tratar a disrupção em líquidos como uma extensão dos processos disruptivos que ocorrem em gases, sobretudo da avalanche eletrônica. Todavia, tal mecanismo seria observado apenas em líquidos homogêneos de extrema pureza e não naqueles efetivamente utilizados no isolamento industrial (KUFFEL et al., 2000).

Embora não seja propósito deste trabalho estudar o fenômeno neste tipo de dielétrico, ressalta-se que em sistemas elétricos de potência, a maior preocupação se refere ao óleo utilizado em transformadores. Dependendo do nível de contaminação do material, nesse tipo de aplicação podem ser observadas disrupções a partir de partículas sólidas suspensas (impurezas) ou até mesmo disrupções a partir de cavidades (bolhas) no interior do óleo. Além disso, processos de eletrificação envolvendo eletroconvecção podem levar à formação de carga superficial quando o óleo é forçado a passar nos *coolers* do transformador. Esse fenômeno pode comprometer o isolamento dos enrolamentos e resultar em uma falha do equipamento.

2.4 Disrupção em Dielétricos Sólidos

Materiais dielétricos sólidos são classificados como isolamento não autorrecuperante, pois esse tipo de material perde suas propriedades isolantes, ou não as recupera integralmente, após a ocorrência de uma descarga disruptiva causada pela aplicação de uma tensão de ensaio (ABNT, 2013). Esse comportamento apresenta grande importância prática, uma vez que estruturas isolantes típicas de sistemas elétricos de potência são compostas – além de partes gasosas ou líquidas – por partes sólidas, as quais também conferem sustentação mecânica.

De forma geral, os fenômenos envolvidos na disrupção em dielétricos sólidos são menos conhecidos que aqueles determinantes para a disrupção em gases. Embora os modelos apresentados pela literatura ainda não sejam conclusivos, é possível estabelecer algumas diferenças entre os processos disruptivos nesses dois tipos de meio.

Enquanto em gases a condução elétrica ocorre tipicamente por processos eletrônicos e iônicos (avalanche eletrônica), em sólidos ela envolve também a corrente de deslocamento. Contudo, é difícil verificar de forma experimental uma distinção entre as correntes de deslocamento e de condução em materiais sólidos. Sabe-se que para determinados materiais – como vidro e cerâmica, por exemplo – a condutividade pode aumentar com a temperatura, sendo caracterizada por processos eletrônicos e iônicos. Entretanto, em virtude de uma solitação elétrica, pode haver um aumento da corrente no material além daquela observada devido aos processos eletrônicos. Nesse caso, o crescimento exponencial da corrente pode ser explicado por uma série de fatores a começar pela injeção de portadores de carga a partir dos eletrodos e pela posterior multiplicação dos portadores de carga no interior do material. Impurezas e defeitos na estrutura cristalina constituem fontes adicionais de portadores.

Assim como ocorre nos gases, o valor da tensão disruptiva depende da temperatura, da umidade, da forma de onda e do tempo ao qual o dielétrico é submetido ao campo elétrico. Além disso, fatores como a pressão aplicada aos eletrodos, descargas no gás ou líquido envolvendo o dielétrico sólido e a presença de impurezas e cavidades no material também podem influenciar na suportabilidade dielétrica do material.

Em sólidos, os mecanismos básicos para a disrupção são:

- Disrupção intrínseca;
- Disrupção por *streamer*;
- Disrupção eletromecânica;
- Disrupção por arborescência (*treeing*);
- Disrupção térmica;
- Disrupção por erosão;
- Disrupção por trilhamento.

A disrupção intrínseca ocorre quando o material é submetido a níveis de campo elétrico superiores à rigidez dielétrica intrínseca por um período de tempo da ordem de 10^{-8} segundos. Como o próprio nome sugere, esta é uma propriedade inerente ao material e à temperatura e que também depende do grau de pureza e homogeneidade. Dificilmente esse tipo de disrupção é obtida em laboratório, mas estima-se que os valores típicos da rigidez dielétrica intrínseca estão na faixa entre 1 MV/cm (para cristais) e 10 MV/cm (para polímeros), por exemplo (KUFFEL et al., 2000). O processo de disrupção intrínseca é de natureza eletrônica e depende do balanço entre a energia ganha pelos elétrons e a energia transferida para o material quando da aplicação de um campo elétrico externo. Contudo, os modelos para prever os valores críticos de campo são imprecisos tendo em vista que os mecanismos de transferência de energia aos elétrons na estrutura do sólido são pontos críticos para a análise.

A disrupção por *streamer* acontece de modo semelhante ao observado em gases. Em condições de campo uniforme, elétrons livres são acelerados e colidem com átomos produzindo novos elétrons em um mecanismo de avalanche. Quando esta atinge um tamanho crítico, ocorre a disrupção (NAIDU; KAMARAJU, 1996).

A disrupção eletromecânica ocorre tipicamente em materiais que são facilmente deformáveis quando estes são submetidos a forças de compressão eletrostáticas resultantes da aplicação de elevados campos elétricos (KUFFEL et al., 2000).

Na disrupção por arborescência, pequenos canais disruptivos são observados na estrutura do material. Esses canais resultam do estresse elétrico a que o sólido é submetido. Esse tipo de disrupção é frequentemente observado na cobertura XLPE de cabos utilizados em linhas de distribuição compactas (KUFFEL et al., 2000).

A disrupção térmica está associada ao comportamento da condutividade elétrica do material dependente da temperatura. A condição crítica que leva o dielétrico à disrupção térmica depende da temperatura de trabalho do material e do tempo no qual o sólido fica sujeito à temperatura crítica. De acordo com a Lei de Arrhenius, a cada acréscimo de 10°C na temperatura de trabalho de um dielétrico sólido, sua vida útil se reduz em 50% (KUFFEL et al., 2000).

Finalmente, a disrupção por erosão ocorre devido a cavidades no interior do material provenientes de defeitos de fabricação. Nesses pontos, ocorre uma intensificação do campo aplicado, o que propicia a condição para a ocorrência de descargas disruptivas. Já a disrupção por trilhamento consiste na formação de um caminho condutor permanente no interior do sólido. Normalmente, esse processo decorre da degradação envolvendo a presença de substâncias orgânicas (KUFFEL et al., 2000).

2.5 Considerações Finais

Este capítulo teve como objetivo apresentar importantes conceitos relativos à disrupção em dielétricos com foco nos meios gasosos e sólidos, de modo a dar subsídio para o entendimento dos fenômenos relacionados à falha de isolamento nas estruturas de redes de distribuição compactas que são apresentados ao longo desta tese. Embora, uma profunda investigação em escala microscópica esteja fora do escopo deste trabalho, é válido estabelecer uma relação entre o comportamento dos arranjos utilizados nos estudos dessa natureza e o comportamento dos arranjos isolantes de redes de distribuição submetidos a solicitações diversas, tomando-se algumas precauções.

Um primeiro aspecto que deve ser levado em consideração é a diferença entre os arranjos. Normalmente, nas investigações que buscam averiguar os processos disruptivos em dielétricos, são adotadas configurações de eletrodos de modo a simplificar o problema (em paralelo ou ponta-plano, por exemplo). Tais configurações não refletem, porém, alguns dos típicos arranjos vistos nas estruturas das redes de distribuição. Contudo, em um eventual estabelecimento de um arco elétrico, os mecanismos responsáveis pelo início do processo disruptivo são, em certa medida, explicados pelas teorias de *Townsend* e *Streamer* (TOWNSEND, 1915), (MEEK, 1940), (RAETHER, 1956).

Outro aspecto que também deve ser abordado diz respeito à disrupção na camada dielétrica dos cabos cobertos utilizados em linhas de distribuição aéreas compactas quando estes são submetidos a elevadas sobretensões. Em uma primeira análise, é muito difícil estabelecer com clareza todos os mecanismos envolvidos no processo disruptivo. Diversos fatores são responsáveis pelo desempenho elétrico dos condutores cobertos: a composição do material, o tempo de serviço, o nível de deterioração, entre outros. Dessa forma, quando são submetidos a condições elétricas severas, mais de um processo pode estar envolvido na disrupção do material (arborescência, erosão, trilhamento, etc.). Novamente, não é propósito desta tese investigar qual a origem exata dos danos na cobertura de cabos de média tensão quando submetidos a elevadas sobretensões. Todavia, é de fundamental importância conhecer quais são os principais mecanismos envolvidos na disrupção de meios dielétricos. No próximo capítulo é abordada, em maiores detalhes, a dinâmica dos processos disruptivos em cabos cobertos em uma escala macroscópica.

3 Dinâmica dos Processos de Disrupção em Cabos Cobertos: Estado da Arte

3.1 Panorama do Uso de Redes de Distribuição Compactas

Os primeiros sistemas de distribuição de energia elétrica que fizeram uso de cabos cobertos datam da década de 1950 nos Estados Unidos. Em uma topologia inicialmente conhecida como *Spacer Cable*, condutores cobertos foram posicionados em espaçadores formando uma rede compacta de 5 kV. Nas décadas seguintes, houve o avanço desse tipo de rede para outros países e também a adequação a diferentes níveis de tensão (SOUZA, 2015).

No contexto brasileiro, tem-se difundido o uso de redes de distribuição aérea compactas desde 1998, sobretudo a partir da experiência da CEMIG. Dentre as principais vantagens desse padrão rede em relação à rede do tipo convencional destacam-se (i) redução do custo operacional devido a uma menor taxa de desligamento; (ii) melhoria de segurança e (iii) economia de espaço na instalação, tornando possível o compartilhamento dos postes com outras redes, como as de telecomunicações, por exemplo. Tais benefícios tornam a utilização das redes compactas mais adequada para áreas urbanas densamente povoadas (ROCHA et al., 2002).

De forma geral, a rede de distribuição aérea compacta (RDC) é formada por condutores cobertos com polietileno posicionados sobre estruturas que isolam eletricamente o circuito e garantem ao mesmo sustentação mecânica. Algumas das estruturas típicas que compõem a RDC são ilustradas esquematicamente na Figura 3.1. As estruturas CM1, CM2 e CM3 são utilizadas em redes monofásicas. Já as estruturas CE1, CE2 e CE3 são empregadas em redes trifásicas. Essa nomenclatura é adotada pelas principais companhias de energia elétrica brasileiras.

A Figura 3.2 mostra alguns componentes de uma rede de distribuição compacta trifásica. Construtivamente, a RDC utiliza um cabo mensageiro para sustentação da rede. Esse cabo é fixado ao poste por meio de braços metálicos e espaçadores poliméricos losangulares instalados em intervalos regulares ao longo do vão. Ele é formado por uma cordoalha de aço e deve ser aterrado, no máximo, a cada 300 m com, no mínimo, uma haste (ELEKTRO, 2014).

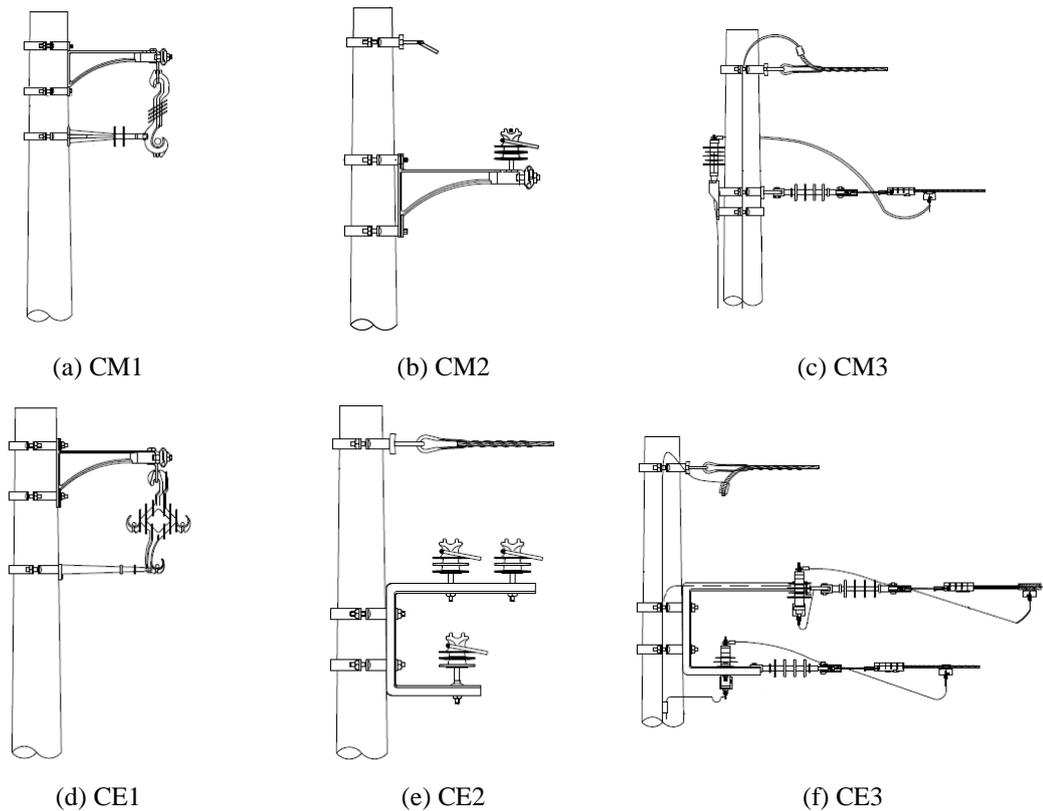


Figura 3.1 – Estruturas típicas empregadas em redes de distribuição compactas. Adaptada de (CEMIG, 2012).



Figura 3.2 – Rede de distribuição compacta. Adaptada de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).

Os espaçadores, por sua vez, exercem a função de elementos de sustentação e separação dos cabos cobertos, os quais ficam dispostos em um arranjo triangular compacto. No fim da rede, são empregados isoladores poliméricos de ancoragem. Esses isoladores também são utilizados para realizar a derivação da rede (ELEKTRO, 2014).

Por apresentarem, no mínimo, uma camada dielétrica, os cabos utilizados nas linhas de distribuição compactas proporcionam a redução do espaço necessário para montagem da rede, conforme ilustrado na Figura 3.1 e na Figura 3.2. Tipicamente, o material empregado no revestimento dos condutores é o polietileno, que apresenta propriedades físicas e químicas adequadas para sua utilização em redes de distribuição de energia. O polietileno é um polímero composto exclusivamente de carbono e hidrogênio. Dependendo da morfologia e das características químicas (grau de reticulação, densidade de ligações cruzadas e cristalinidade) os polímeros utilizados como revestimento desses cabos elétricos são classificados como LDPE, HDPE e XLPE.

O polietileno de baixa densidade (LDPE) é um termoplástico semicristalino que apresenta boa resistência química, absorve pouca umidade, tem baixo custo e é de fácil processamento industrial (HARPER, 1999), (GULMINE, 2004). Devido às suas excelentes propriedades elétricas, tais como baixa constante dielétrica, alta resistividade, baixa permissividade, além de resistência à abrasão, esse material foi empregado nas primeiras redes de distribuição compactas nos Estados Unidos, a partir da década de 1950 (GULMINE, 2004), (NÓBREGA, 2013).

No entanto, o LDPE foi gradativamente substituído pelo polietileno reticulado (XLPE), o qual apresenta propriedades mecânicas e térmicas superiores (DAS-GUPTA, 1994). O XLPE exibe uma estrutura semicristalina similar à do LDPE. A obtenção desse composto a partir do LDPE envolve a formação de ligações covalentes entre as macromoléculas, em um processo conhecido como reticulação (GULMINE, 2004).

Geralmente, os polietilenos de baixa e média densidade são sintetizados através de um processo de polimerização do gás etileno em um reator sob condições extremas de pressão e a temperaturas muito altas utilizando peróxidos como catalisadores. Esta técnica permite a obtenção de estruturas de polietileno ramificadas (NÓBREGA, 2013). Já o polietileno de alta densidade (HDPE) se diferencia do LDPE e do XLPE por apresentar um menor número de ramificações e dimensões das ramificações mais curtas. Ele é produzido através de um processo de baixa pressão com diferentes catalisadores, o que permite a obtenção de um tipo de polietileno mais rígido, que é denominado de "alta densidade" (NÓBREGA, 2013). Um quadro comparativo entre algumas propriedades desses materiais é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais empregados na cobertura de cabos elétricos utilizados em redes de distribuição compactas. Adaptada de (DAS-GUPTA, 1994).

Propriedade	Material		
	<i>LDPE</i>	<i>HDPE</i>	<i>XLPE</i>
Rigidez dielétrica (kV/mm)	75	100	50
Constante dielétrica	~ 2,3	2,3	2,4
Resistividade (Ωm)	5×10^{15}	5×10^{15}	$\sim 10^{16}$
Densidade (g/cm^3)	0,92	0,95	0,92
Módulo elástico (kN/mm^2)	0,15	0,70	0,10

É prática comum das concessionárias de energia elétrica realizar a operação das redes de distribuição compactas em conjunto com as redes convencionais. Por causa disso, há uma dificuldade em se realizar análises de desempenho considerando apenas a rede de distribuição aérea compacta. Apesar desta condição mista de redes compactas e convencionais, (SOUZA, 2015) apresenta um levantamento de falhas ocorridas nas redes de distribuição em média tensão (13,8 kV) na região central do estado de Minas Gerais no período de 2010 a 2012. De um total de 435 alimentadores cuja extensão total é de aproximadamente 7700 km, foram apuradas as falhas observadas em cinco alimentadores

puramente constituídos por rede compacta e cinco alimentadores puramente constituídos por rede convencional, totalizando 30 km de extensão. Nesse trecho, foram registradas 273 ocorrências na rede convencional e apenas 28 na rede compacta; ou seja, menos de 10% do total, indicando um melhor desempenho da rede compacta em comparação com a rede convencional.

Ainda segundo (SOUZA, 2015), as descargas atmosféricas foram a principal causa de desligamentos da rede de distribuição da CEMIG no período de 2010 a 2012 (Figura 3.3). Nesses três anos, cerca de 29% das ocorrências que levaram à interrupção no fornecimento de energia elétrica foram originadas por descargas atmosféricas.

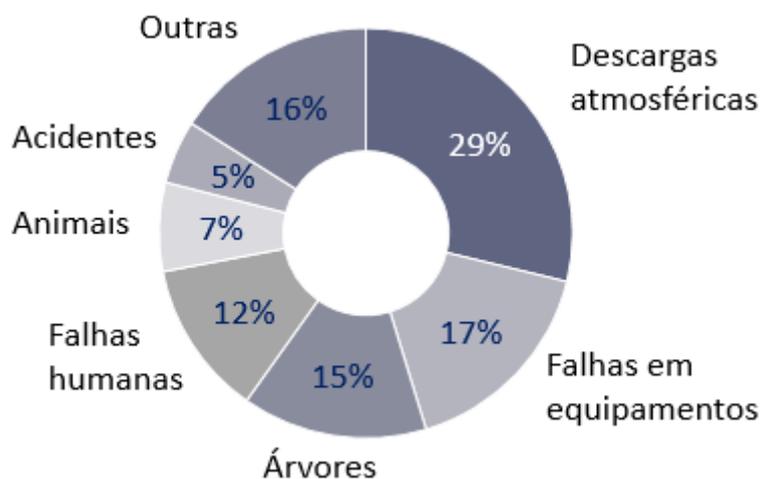


Figura 3.3 – Principais causas de desligamentos da rede de distribuição da CEMIG entre 2010 e 2012. Dados de (SOUZA, 2015).

Esse dado é importante pois sinaliza a necessidade de investigações que busquem um maior entendimento dos processos envolvidos no estabelecimento de descargas disruptivas que podem resultar em falha de isolamento nas redes de distribuição. Observa-se, no entanto, que o processo de disrupção é dependente do tipo de rede empregada. A seguir são discutidas algumas diferenças entre a dinâmica desses processos em cabos nus e em cabos com cobertura dielétrica.

3.2 Processos Disruptivos em Cabos Cobertos

A dinâmica de estabelecimento de ondas de tensões induzidas nas redes de distribuição em decorrência da incidência de descargas atmosféricas próximas depende da interação eletromagnética entre o canal de descarga e os condutores da linha. A partir

do fluxo da corrente de retorno pelo canal, estabelece-se um campo eletromagnético intenso que se propaga e ilumina a linha (VISACRO, 2005). A tensão induzida é definida como a integral do campo elétrico ao longo de um percurso vertical entre a superfície do solo e o ponto do condutor imediatamente acima. Sua amplitude, bem como sua forma de onda, são determinadas pela distribuição temporal e espacial da onda de corrente de retorno no canal de descarga (SILVEIRA, 2006).

Uma vez estabelecido o surto de tensão na linha, este se propaga ao longo dos condutores. Caso essa sobretensão exceda a suportabilidade do isolamento que separa o condutor energizado da estrutura aterrada (poste), pode ocorrer uma descarga disruptiva, com o eventual estabelecimento de um arco elétrico. Dependendo da intensidade da corrente drenada para o solo, do nível de tensão e do tempo de atuação de dispositivos de proteção, esse arco é extinto e a linha continua sua operação normalmente. Contudo, em caso de estabelecimento do fluxo da corrente de frequência industrial (60 Hz) do condutor para o solo através do arco, fica caracterizado o curto-circuito, o qual pode levar ao desligamento da linha (VISACRO, 2005).

Dependendo do tipo e configuração da rede, há diferenças no processo de estabelecimento e no posterior comportamento do arco elétrico resultante da falha de isolamento. A Figura 3.4 ilustra uma falha de isolamento em uma rede de distribuição composta por um condutor fase (energizado) e um condutor neutro (aterrado).

Se o cabo energizado for um condutor nu, o ponto de contato entre o arco elétrico e o cabo varia sua posição em função do tempo devido à ação de forças de origem eletromagnética e ambiental (ventos, por exemplo). Com isso, ocorre a dissipação de energia ao longo do cabo, evitando maiores danos. No entanto, em cabos com cobertura dielétrica o arco elétrico tende a se concentrar no ponto em que houve a perfuração da camada de cobertura do cabo. Devido à resistência de contato entre o arco e o condutor e ao fluxo da corrente de falta, ocorre o aquecimento do material. Por excesso de dissipação de energia em um único ponto, esse comportamento do arco elétrico em cabos cobertos pode causar a sua ruptura e posterior queda sobre a via pública (LEE et al., 1982).

Com relação ao processo de disrupção em cabos cobertos, a literatura aborda alguns eventos que geralmente são observados antes da perfuração da camada de

cobertura dielétrica do condutor. Tais eventos estão relacionados aos níveis de tensão e, em última análise, ao campo elétrico a que o dielétrico é submetido.

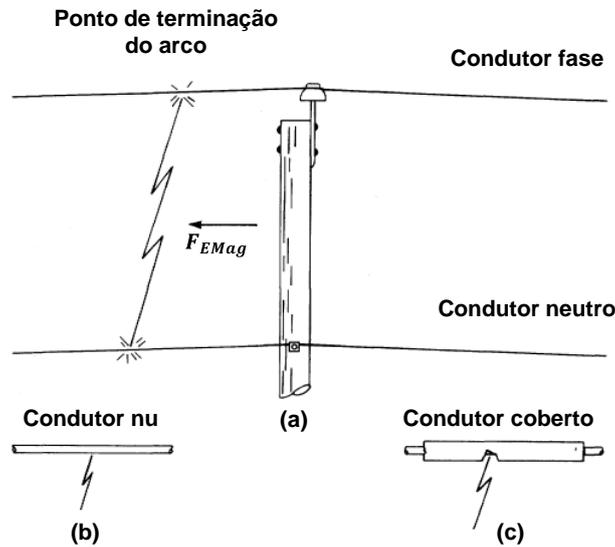


Figura 3.4 – Falha de isolamento em uma rede de distribuição: (a) arco elétrico estabelecido entre o condutor fase e o condutor neutro. O grau de dano depende do condutor utilizado podendo ser (b) leve em condutores nus ou (c) grave em condutores cobertos. Adaptada de (LEE et al., 1982).

Manifestações luminosas e audíveis na região ao redor dos cabos submetidos a sobretensões são normalmente observadas. Tais manifestações, que tipicamente ocorrem em condição de campo elétrico não uniforme, são conhecidas como **efeito corona**. Quando a tensão aplicada em um condutor atinge um valor tal que o campo elétrico resultante na sua superfície ultrapasse determinado limiar, estabelece-se o início do processo de ionização do ar (KUFFEL et al., 2000). Considerando geometria cilíndrica, uma relação empírica foi apresentada por (PEEK, 1915) para o cálculo do campo elétrico de início do efeito corona em kV/cm (E_C):

$$E_C = 31,53\delta + \frac{9,63\delta}{\sqrt{\delta r}} \quad (3.1)$$

onde δ é a densidade relativa do ar dada por (3.2) e r é a distância a partir da superfície do condutor em centímetros.

$$\delta = \frac{p}{p_0} \left(\frac{273 + t_0}{273 + t} \right) = 0,386 \left(\frac{p}{273 + t} \right) \quad (3.2)$$

O efeito corona pode levar à deterioração de materiais pela ação combinada da colisão de íons na superfície do condutor e de componentes químicos resultantes das descargas (KUFFEL et al., 2000). Em condições normais e na ausência de intensa poluição, o ar consiste de uma mistura de gases com predominância de nitrogênio (N_2) e de oxigênio (O_2). Quando o ar é estressado eletricamente, uma molécula de oxigênio pode ser separada em dois átomos de O. Os átomos de oxigênio nesse estado podem se recombinar em O_2 ou formar moléculas de ozônio O_3 , que também são instáveis e podem se separar em O_2 e O. Em caso de estresse elétrico intenso, esses átomos de O podem se combinar com o nitrogênio formando óxidos, os quais podem se depositar sobre os condutores (PEEK, 1915).

Em condutores cobertos, também é observada na região de fixação do cabo no isolador e na base deste uma espécie de efeito corona, mesmo para baixos níveis de tensão. Esse efeito resulta no aparecimento de uma carga superficial sobre o condutor coberto de polaridade oposta à tensão aplicada, a qual influencia o processo disruptivo (NAKAMURA et al., 1986).

Com o aumento do nível de tensão aplicada, observa-se um segundo fenômeno designado por (NAKAMURA et al., 1986) como descargas parciais⁴. Esse fenômeno é caracterizado por um arco luminoso (porém não muito intenso) entre a superfície coberta do condutor e a estrutura aterrada mais próxima ao cabo (pino de sustentação isolador, por exemplo).

Essas descargas, a partir deste ponto denominadas como **descargas disruptivas parciais**, podem causar danos à cobertura dos condutores. Devido à elevada intensidade do campo elétrico resultante da diferença de potencial na região que separa a superfície externa da cobertura e os fios (ou anéis de amarração) utilizados para a fixação dos cabos nos isoladores podem ocorrer descargas disruptivas parciais, as quais causarão a erosão do material ao longo do tempo (LEE et al., 1982).

⁴ Neste ponto é importante fazer uma distinção no que tange à utilização do termo ‘descargas parciais’. Esse termo é utilizado de forma abrangente pela literatura para caracterizar diversos fenômenos como efeito corona, arborescência, trilhamento e outros tipos de descargas não disruptivas. Neste texto, o termo é adotado no mesmo sentido utilizado por (NAKAMURA et al., 1986).

Finalmente, se a tensão ultrapassar determinado limiar, ocorre o estabelecimento de um arco elétrico pleno resultando na completa perfuração da cobertura no ponto de contato. Esse fenômeno é designado por (NAKAMURA et al., 1986) como *breakdown* e neste trabalho foi denominado como **descarga disruptiva plena**.

3.3 Cobertura Protetora dos Cabos e Suportabilidade Elétrica

A despeito da crescente utilização de redes de distribuição compactas, a literatura técnica dedicada ao estudo do papel desempenhado pela cobertura protetora dos cabos no aumento da sua suportabilidade elétrica não esgota o tema. Os seguintes itens apresentam um panorama geral das principais referências no assunto.

3.3.1 Artigo de (POWELL et al., 1965)

Já nos primeiros anos da utilização de redes de distribuição compactas foram realizados estudos voltados para melhoria do desempenho desse novo sistema frente a descargas atmosféricas. Nesse sentido, o trabalho de (POWELL et al., 1965) destaca-se pelo pioneirismo. Na ocasião, os autores avaliaram duas linhas de distribuição compactas de 4 kV e 13 kV da concessionária *Public Service Electric and Gas Company*, na cidade de *Newark*, em *New Jersey* (Estados Unidos).

O artigo apresenta resultados experimentais da suportabilidade elétrica de uma estrutura muito semelhante à CE1, ilustrada na Figura 3.1(d). Na ocasião, os autores aplicaram tensões impulsivas de polaridade positiva (1,5/40 μ s) a cabos cobertos com polibutileno posicionados em espaçadores losangulares de porcelana e acrílico. Os resultados são apresentados na Figura 3.5 na forma de curvas tensão-tempo (V-T). A curva A refere-se a cabos da rede de 13 kV posicionados em um espaçador de porcelana. As curvas B e C são associadas a cabos da rede de 4 kV posicionados em espaçadores de acrílico e porcelana, respectivamente.

Os autores citam a ocorrência de descargas superficiais ao longo do cabo, as quais não perfuraram a cobertura dielétrica. Por conta disso, os autores afirmam que não foi possível a obtenção de dados em certas porções das curvas V-T (linhas tracejadas na Figura 3.5). Esses dados foram, então, estimados a partir de curvas V-T relacionadas a isoladores de 15 kV. Apesar de sua importância histórica e pioneirismo, o trabalho não apresenta maiores detalhes a respeito dos ensaios de suportabilidade elétrica realizados.

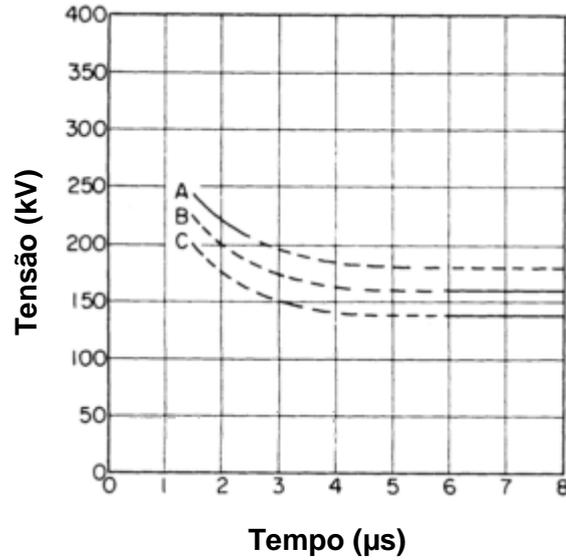


Figura 3.5 – Curvas V-T obtidas nos ensaios realizados por (POWELL et al., 1965).

3.3.2 Artigo de (GILL et al., 1967)

Dois anos após a publicação do trabalho de (POWELL et al., 1965), (GILL et al., 1967) publicaram um importante artigo com significativos avanços nos estudos de suportabilidade elétrica de redes de distribuição compactas. Neste trabalho, os autores buscaram avaliar o efeito de três parâmetros no comportamento da linha de distribuição compacta frente a tensões impulsivas: (i) a distância entre os condutores energizados (fases) e o cabo mensageiro, (ii) o material empregado na cobertura e (iii) a espessura da cobertura dos condutores.

A metodologia de ensaio consistiu na aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa (1,5/40 μs) em cabos cobertos com neopreno⁵ posicionados em espaçadores de porcelana tipicamente utilizados na rede de 13 kV. Curiosamente, os autores adotaram a polaridade negativa nos testes justificando sua escolha com base em um estudo que mostrou ser esta a condição mais severa para a rede. No entanto, como será mostrado adiante (Seção 6.3), não foi esse o comportamento observado na investigação experimental realizada.

⁵ O neopreno é um tipo de borracha sintética desenvolvida originalmente para substituir a borracha natural. Possui em sua composição policloropeno, um elastômero sintético.

Os resultados apresentados pelos autores indicam que a *tensão de descarga disruptiva a 50% (U_{50})* da estrutura varia em função do espaçamento entre o cabo mensageiro e o condutor fase. Para o espaçador de 6 polegadas (15,2 cm), o valor estimado de U_{50} foi igual a 192 kV. Para o espaçador de 9 polegadas (22,9 cm), o valor de U_{50} foi estimado em 244 kV. Também foram testados espaçadores feitos de material plástico, os quais apresentaram uma tensão disruptiva igual a 218 kV (distância de separação entre mensageiro e fase igual a $6 \frac{1}{8}$ polegadas, ou 15,6 cm). Uma importante observação dos autores menciona o fato de que os resultados obtidos em ensaios realizados sob condição de chuva artificial não promoveram uma redução significativa na suportabilidade elétrica do conjunto.

Com relação ao material empregado na cobertura, o trabalho mostra que os condutores com cobertura de polietileno suportaram um maior nível de tensão impulsiva na comparação com o nível de suportabilidade do cabo de borracha sintética: 287 kV contra 192 kV. Outra importante conclusão ressalta que a espessura da cobertura dos condutores somente é importante para a suportabilidade do arranjo isolante para distâncias entre a fase e o mensageiro inferiores a 17 polegadas (43,2 cm).

3.3.3 Artigo de (NAKAMURA et al., 1986)

Este trabalho é considerado uma das referências mais importantes nos estudos de suportabilidade elétrica de cabos cobertos. Os autores apresentam os processos envolvidos no mecanismo de disrupção, além de uma investigação experimental com o propósito de identificar as combinações de isoladores e fios de fixação mais susceptíveis às descargas parciais e à perfuração da cobertura dos condutores bem como os níveis de tensão que causariam tais fenômenos. Nos ensaios, foram utilizados dois tipos de isoladores de 15 kV denominados *radio-freed* e *plain*⁶. Em conjunto com cada um deles (Figura 3.6), foram testadas quatro diferentes amarrações totalizando oito diferentes configurações. As amarrações utilizadas estão listadas a seguir:

- Nua – fio de alumínio com diâmetro 3/16”;

⁶ Em tradução livre, neste texto adotam-se os termos ‘isolador livre de rádio interferência’ e ‘isolador do tipo comum’.

- Semicondutora – fio de policloreto de polivinila (PVC) com diâmetro 3/8” com um revestimento semicondutor de 0,762 mm;
- Coberta – fio de alumínio com diâmetro 3/16” revestido com polietileno termoplástico (PE) de espessura 1,5 mm;
- Plástica – fio de PVC com diâmetro 7/16”.

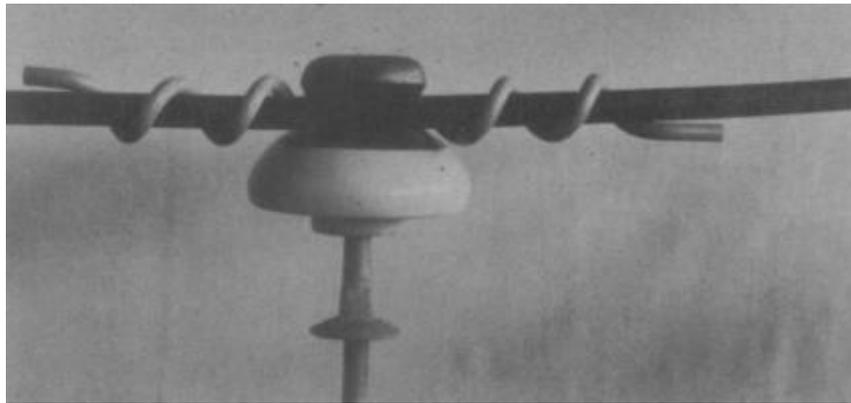


Figura 3.6 – Detalhe da amarração do cabo ao isolador. Reproduzida de (NAKAMURA et al., 1986).

O procedimento consistiu em testar dez amostras de cada configuração. Em cada ensaio, foram aplicados dez impulsos atmosféricos padronizado (1,2/50 μ s) por nível de tensão. A amplitude inicial foi igual a 90 kV e aumentou-se essa tensão em passos de 10 kV até que uma disrupção fosse observada.

Nas configurações utilizando o isolador livre de rádio interferência onde a amarração plástica estava presente, os autores não observaram a ocorrência de descargas parciais para impulsos de tensão de polaridade positiva. Para impulsos de tensão de polaridade negativa, a tensão média para a ocorrência de descargas parciais foi de aproximadamente 145 kV. Com relação à ocorrência de disrupção plena, para tensões de polaridade negativa, o valor médio de tensão no qual ocorreu a perfuração completa da cobertura foi igual a 172 kV. Já para tensões de polaridade positiva, o valor médio de tensão foi superior, alcançando o valor de 206 kV. Nas demais configurações, o aumento do valor da tensão média de perfuração também foi observado quando impulsos positivos de tensão foram aplicados.

Com relação à distribuição dos furos ao longo do cabo, na configuração isolador livre de rádio interferência/amarração plástica, aproximadamente 87% dos furos localizaram-se a uma distância de até 20 cm do isolador na região limitada pelo

comprimento da amarração. Para o outro isolador – tipo comum – com a mesma amarração plástica, 100% dos furos ocorreram na região por ela limitada. Segundo os autores, isso indica que este isolador pode apresentar uma maior intensidade de campo elétrico concentrada entre ele e a amarração do que o isolador do tipo livre de rádio interferência.

Em um segundo tipo de análise, os autores repetiram os ensaios realizando a retirada das cargas depositadas nas superfícies do isolador, do cabo e da amarração antes da aplicação de cada impulso de tensão. Tal procedimento teve como objetivo determinar a influência da carga superficial nos resultados anteriores.

Para efeito de comparação, os autores também apresentam os resultados obtidos nos ensaios realizados com condutores nus. A Tabela 3.2 sumariza os valores de tensão para disrupção em cabos cobertos e condutores nus para a configuração utilizando o isolador livre de rádio interferência com amarração plástica.

Tabela 3.2 – Tensões disruptivas para a configuração isolador livre de rádio interferência com amarração plástica

Polaridade	Cabo Nu	Cabo Coberto	
		<i>Com carga superficial</i>	<i>Sem carga superficial</i>
Negativa	125 kV	172 kV	160 kV
Positiva	135 kV	206 kV	162 kV

No ensaio com remoção de cargas, os autores observaram a redução da tensão disruptiva em ambas as polaridades. Neste tipo de ensaio, foi observada ainda a ocorrência de descargas parciais. Ao contrário do ocorrido nos ensaios anteriores, para essa mesma configuração – livre de rádio interferência com amarração plástica – descargas parciais foram observadas na aplicação de impulsos de polaridade positiva, com um valor médio de tensão igual a 160 kV. Para a polaridade negativa, a tensão média foi igual a 148 kV, muito próxima daquela obtida no ensaio sem a remoção de cargas (145 kV).

3.3.4 Artigo de (BLENNOW *et al.*, 2000)

Neste trabalho, os autores apresentam um estudo referente ao impacto da presença de cargas elétricas na superfície de eletrodos cobertos por uma fina camada polimérica na

suportabilidade do arranjo isolante frente a tensões contínuas e impulsivas. Uma investigação experimental foi realizada considerando um arranjo formado por eletrodos planos e paralelos cobertos com uma espécie de borracha de silicone (elastosil).

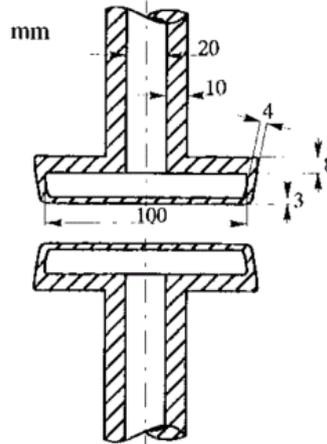


Figura 3.7 - Arranjo experimental do trabalho de (BLENNOW et al., 2000).

Esse arranjo foi submetido a tensões contínuas e impulsivas de polaridade positiva. As tensões foram aplicadas ao eletrodo superior, estando o eletrodo inferior aterrado. Variou-se a distância entre os eletrodos de 3 mm a 27 mm. A Figura 3.8 apresenta os resultados alcançados.

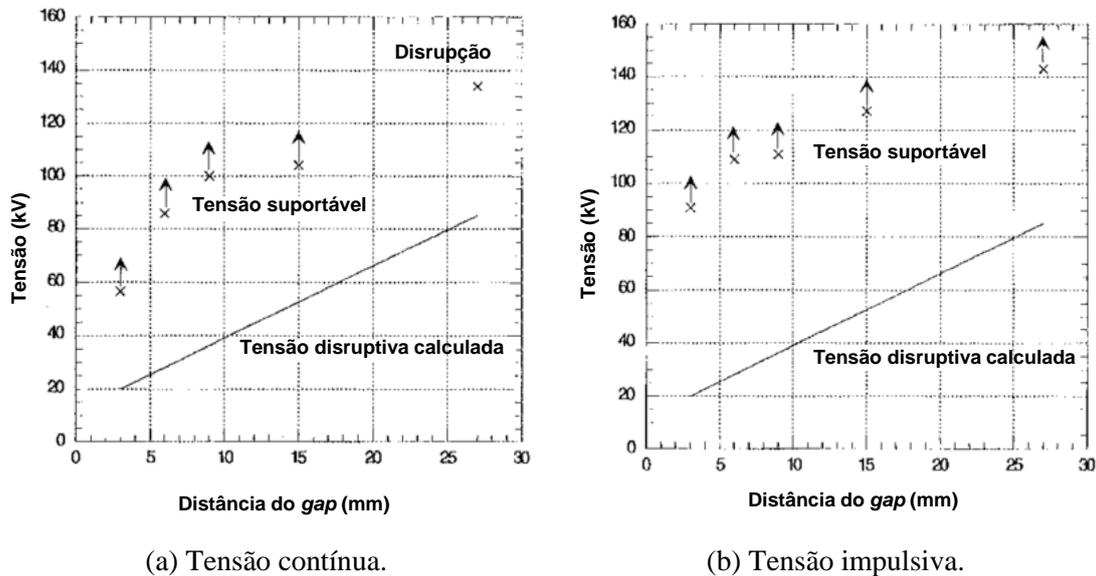


Figura 3.8 – Tensões suportáveis para o arranjo testado por (BLENNOW et al., 2000).

Conforme indicam os resultados, os valores máximos das tensões disruptivas que causariam ruptura plena (com perfuração da cobertura polimérica) não foram de fato alcançados, com exceção de um caso para a tensão contínua. No entanto, é evidente o

aumento da suportabilidade do arranjo testado. Na Figura 3.8, os pontos marcados com um ‘x’ indicam o máximo valor de tensão aplicada em cada distância avaliada que não causou descarga no gap de ar entre os eletrodos. Também são apresentadas as curvas correspondentes aos valores de tensão que levariam à disrupção caso a cobertura não estivesse presente. Os autores creditam esse aumento de suportabilidade à presença de cargas na superfície da camada dielétrica. Nesse sentido, o trabalho mostra-se interessante, embora não apresente de fato as tensões que causariam a perfuração da camada dielétrica utilizada como cobertura dos eletrodos.

3.3.5 Artigo de (DARVENIZA, 2000)

O artigo descreve experimentos realizados com o objetivo de determinar a tensão suportável fase-fase entre cabos utilizados em linhas de distribuição compactas a partir da aplicação de tensões impulsivas e tensões contínuas. Além disso, o autor se preocupa com a determinação da polaridade, magnitude e localização de cargas depositadas ao longo da cobertura de XLPE dos cabos. Essas cargas são resultantes de disrupções parciais do ar no espaço de separação dos cabos.

A Figura 3.9 apresenta o arranjo proposto para a realização dos ensaios. Dois condutores de comprimento igual a 1 m (diâmetro igual a 14 mm) cobertos com uma camada de XLPE (espessura igual a 6 mm) foram posicionados perpendicularmente com seus centros separados verticalmente por uma distância d .

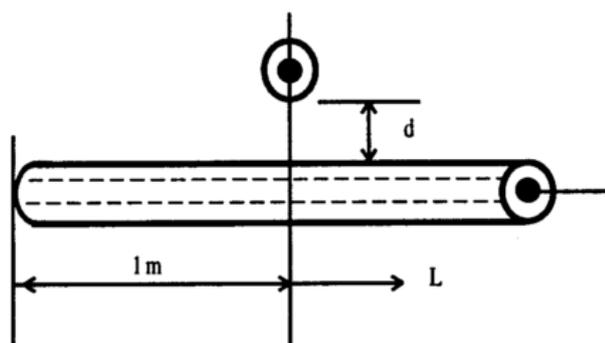


Figura 3.9 – Arranjo dos condutores utilizados nos ensaios. Reproduzida de (DARVENIZA, 2000).

O primeiro conjunto de ensaios envolveu a determinação do menor valor da tensão de descarga disruptiva para o ar em ambas as polaridades. Com as superfícies dos cabos inicialmente descarregadas, foram aplicados 25 impulsos por nível de tensão em um dos cabos enquanto o outro foi aterrado e um detector de cargas foi utilizado ao final de cada

conjunto de aplicações. Os níveis de tensão foram acrescidos em passos até que uma disrupção no ar fosse detectada. Para identificar a ocorrência de descargas parciais, utilizou-se um sensor resistivo através do qual foram medidos pulsos de corrente característicos do fenômeno. Foram testadas quatro diferentes distâncias entre os cabos. Os resultados são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Menor valor da tensão de descarga disruptiva para o ar. Adaptada de (DARVENIZA, 2000).

Distância entre os cabos (mm)	Tensão de descarga disruptiva (kV)	
	<i>Polaridade Negativa</i>	<i>Polaridade Positiva</i>
3	25	26
8	36	36
14	53	67
22.5	60	–

O autor ressalta que o conceito da tensão de descarga disruptiva a 50% (U_{50}) não se aplica para esse teste por conta do acúmulo de cargas que se dá no cabo após a aplicação cada impulso. Isso significa que cada aplicação de tensão subsequente não é um teste estatisticamente independente dos anteriores.

Com o aumento da amplitude dos impulsos de tensão aplicados, os pulsos de corrente oriundos das descargas parciais apareceram cada vez mais cedo e maior foi a quantidade de cargas depositadas e o espalhamento das mesmas ao longo da superfície da cobertura polimérica. Para as distâncias de 14 mm e 22,5 mm, foram observados pulsos de corona nas tensões que causaram disrupção. Além disso, em todas as distâncias testadas, quando a tensão aplicada excedeu 90 kV, um novo tipo de pulso de corrente foi identificado. Esse pulso de menor amplitude e polaridade oposta àquele que caracteriza uma disrupção no ar, tipicamente ocorreu em sequência após 50 μ s e perdurou até 100 μ s. Para o autor, seu aparecimento está relacionado à ocorrência de descargas parciais na superfície da cobertura do cabo. Dessa forma, foram registradas as tensões nas quais tal fenômeno foi percebido (Tabela 3.4).

Com relação ao processo de acúmulo de cargas, o artigo destaca o fato de que somente após a ocorrência de uma descarga disruptiva no ar é que foram detectadas cargas sobre a cobertura dos cabos. Quando as tensões aplicadas eram de polaridade negativa, a carga acumulada sobre o cabo de alta tensão era positiva e no cabo aterrado era negativa.

Para as tensões aplicadas de polaridade positiva, as cargas apresentaram polaridade oposta àquela verificada no caso de impulsos negativos. Ressalta-se o fato de que a carga sobre o cabo é fonte de um campo elétrico que, por conta da polaridade, se opõe ao campo elétrico resultante da tensão aplicada ao condutor. Portanto, quando há presença de cargas acumuladas no cabo, a tensão que provoca disrupções deve ser superior àquela que seria requerida caso o cabo estivesse descarregado.

Tabela 3.4 – Menor valor da tensão de descarga parcial na superfície da camada XLPE dos cabos. Adaptada de (DARVENIZA, 2000).

Distância entre os cabos (mm)	Tensão de descarga parcial (kV)	
	<i>Polaridade Negativa</i>	<i>Polaridade Positiva</i>
3	93	89
8	93	92
14	93	91
22.5	104	–

3.3.6 Artigo de (SEKIOKA et al., 2008)

Neste artigo, os autores apresentam resultados experimentais para a suportabilidade elétrica de uma estrutura básica utilizada em redes de distribuição isoladas no Japão frente a incidência direta de descargas atmosféricas (Figura 3.10). Tensões de impulso atmosférico padronizado foram aplicadas a uma cruzeta, sobre a qual foi posicionado um isolador sustentando um cabo coberto. Este tipo de ensaio teve como objetivo representar o evento de incidência direta de descarga sobre o poste. Dois diferentes isoladores do tipo pino foram utilizados nos ensaios: um com tensão de descarga disruptiva a 50% igual a 120 kV – e outro com tensão de descarga disruptiva a 50% igual a 90 kV. O cabo testado é coberto com polietileno e possui área igual a 60 mm², sendo o diâmetro do condutor igual a 10,2 mm e a espessura da cobertura igual a 2,5 mm. A tensão suportável do isolamento do cabo para tensões alternadas é igual a 12 kV. O comprimento utilizado foi igual a 40 m e o cabo foi posicionado no isolador de forma simétrica. O procedimento adotado nos ensaios consiste na aplicação de um impulso atmosférico na cruzeta e observação da ocorrência de uma descarga disruptiva. A cada aplicação, a carga acumulada na superfície do cabo é removida e o cabo é substituído após a ocorrência de uma perfuração da camada isolante.

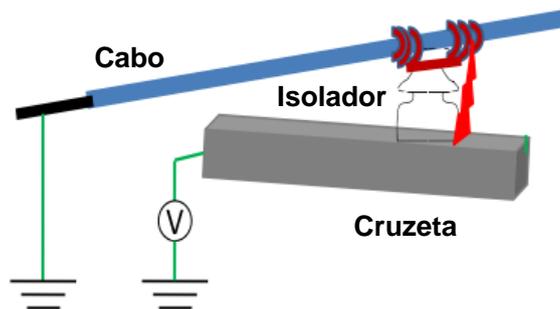


Figura 3.10 - Arranjo experimental para representar o evento de incidência direta de descarga sobre estrutura da rede de distribuição. Reproduzida de (SEKIOKA et al., 2008).

Os autores definem a falha de isolamento do cabo em três processos: a descarga disruptiva no isolador com o estabelecimento de um arco elétrico da cruzeta para o cabo; a descarga de contorno ao longo do cabo e a disrupção na camada isolante do cabo. A partir dos resultados apresentados, os autores concluem que o processo de descarga disruptiva no isolador é semelhante àquele observado entre eletrodos separados por um intervalo de ar. Já a modelagem da falha de isolamento do cabo depende não só desta descarga disruptiva no isolador, como também do desenvolvimento da descarga de contorno e da posterior perfuração da camada isolante. Entretanto, o artigo não apresenta essa modelagem, sugerindo apenas que os desenvolvimentos destes processos devem ser considerados simultaneamente.

Os valores da tensão de descarga disruptiva para a polaridade negativa são menores que aqueles obtidos para a polaridade positiva. No entanto, ao contrário dos resultados apresentados por (NAKAMURA et al., 1986), os autores afirmam que no ensaio que representa tensões induzidas por descargas atmosféricas, no qual o impulso de tensão é aplicado na terminação do cabo e a cruzeta é aterrada, a suportabilidade do isolamento para tensões negativas é maior do que para a polaridade positiva. Essa diferença é atribuída às características do condutor e à configuração da cruzeta.

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados importantes aspectos sobre a disrupção em arranjos isolantes empregados nas redes de distribuição aérea compactas. Os principais eventos relacionados ao processo disruptivo em cabos cobertos – efeito corona, descargas disruptivas parciais e descargas disruptivas plenas – foram abordados a partir de uma revisão bibliográfica de proeminentes trabalhos acerca do tema.

Os trabalhos aqui discutidos serviram como ponto de partida para a realização de uma extensa investigação experimental, que buscou identificar e caracterizar esses eventos de forma a proporcionar um amplo conjunto de dados contendo valores de tensão disruptiva, tempos de corte, e localização dos furos na cobertura dos cabos. Os procedimentos de ensaio adotados nessa investigação são descritos no Capítulo 4. Os resultados e análises são apresentados nos Capítulos 5 e 6, respectivamente.

4 Investigação experimental para determinação da suportabilidade elétrica de estruturas típicas de redes de distribuição compactas

4.1 Considerações iniciais

Uma vez apresentados os principais processos disruptivos observados em dielétricos (Capítulo 2) e, mais especificamente, em cabos cobertos (Capítulo 3), são destacados neste capítulo alguns tópicos de interesse para análises de suportabilidade elétrica em arranjos isolantes frente a sobretensões de origem atmosférica. A literatura associada à coordenação de isolamento fornece metodologias largamente empregadas na realização de ensaios em estruturas e equipamentos pertencentes às redes elétricas. Na seção 4.2, são apresentados os parâmetros de maior interesse para avaliações de suportabilidade elétrica. A seguir, na seção 4.3 é descrita a metodologia aplicada nos ensaios para a determinação desses parâmetros.

4.2 Parâmetros de interesse para análise de suportabilidade elétrica de arranjos isolantes

Para a caracterização da suportabilidade elétrica de um arranjo isolante, a literatura tradicional apresenta importantes definições e conceitos relacionados à coordenação de isolamento. Esta seção resume os principais parâmetros e procedimentos tradicionalmente empregados para a determinação das tensões disruptivas. Uma abordagem completa a respeito do tema pode ser encontrada em (ABNT, 2013).

4.2.1 Tensões Disruptivas

Uma das formas para se avaliar a suportabilidade elétrica de um determinado isolamento consiste na sua caracterização por um valor de tensão disruptiva. Tal valor é obtido por meio da realização de ensaios em laboratório utilizando formas de onda de tensão adequadas ao propósito do teste. Na avaliação experimental de arranjos isolantes sujeitos a solicitações de origem atmosférica, utiliza-se como tensão de ensaio a tensão de impulso atmosférico padronizado, cuja forma de onda é indicada na Figura 4.1.

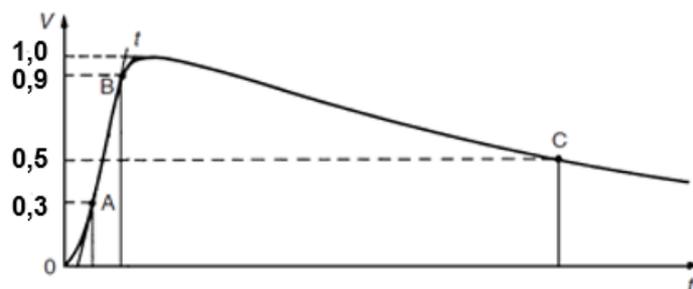


Figura 4.1 – Tensão de impulso atmosférico padronizado (1,2/50 μ s). Adaptada de (ABNT, 2013).

Essa tensão é caracterizada por um rápido crescimento até atingir a amplitude máxima seguida por uma lenta queda. O tempo de frente⁷ é igual a 1,2 μ s com tolerância de $\pm 30\%$ e o tempo de cauda⁸ é de 50 μ s com tolerância de $\pm 20\%$.

⁷ O tempo de frente (T_1) pode ser obtido a partir do parâmetro T_{30} , que corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre 30% e 90% do valor de pico da onda (pontos A e B da Figura 4.1). Para isso, basta dividir T_{30} por 0,6 (VISACRO, 2005).

⁸ O tempo de cauda pode ser definido como o instante de tempo correspondente à amplitude igual a 50% do valor de pico da onda (ponto C da Figura 4.1).

De acordo com a norma brasileira NBR IEC 60060-1 (ABNT, 2013), uma descarga disruptiva corresponde a uma falha de isolamento quando esta se encontra sob solitação elétrica. A descarga promove um curto-circuito no arranjo isolante reduzindo a tensão entre os eletrodos a praticamente zero. A Figura 4.2 ilustra a forma de onda de tensão resultante da ocorrência de uma descarga disruptiva.

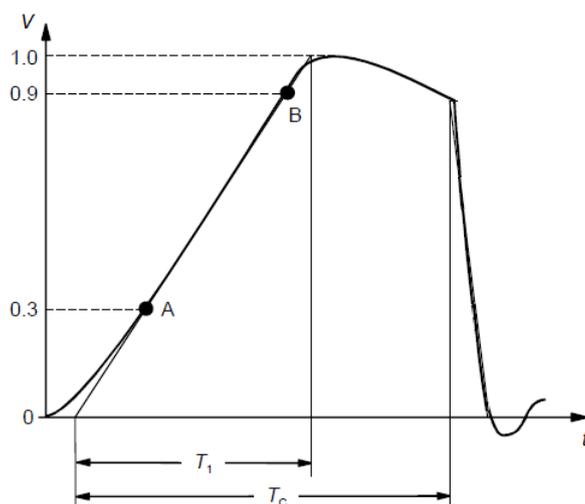


Figura 4.2 – Tensão de impulso atmosférico cortado na cauda. Adaptada de (ABNT, 2013).

Quando uma tensão de ensaio é aplicada em um isolamento, há uma probabilidade de ocorrência de descarga disruptiva. Essa probabilidade depende, dentre outros fatores, da amplitude de tensão. Com relação a esta característica, são definidos três importantes valores de tensões disruptivas.

O **Nível Básico de Isolamento (NBI)** ou **Tensão Suportável Estatística (U_{10})** corresponde ao valor de pico de uma tensão de impulso atmosférico padronizado que, se for aplicada a um isolamento, é capaz de provocar uma descarga disruptiva em 10% dos casos. Isso significa que a probabilidade de o isolamento suportar a tensão aplicada é igual a 90%. Já a **Tensão de Descarga Disruptiva a 50% (U_{50})** corresponde ao valor de pico de uma tensão de impulso atmosférico padronizado que tem uma probabilidade de 50% de resultar em uma descarga disruptiva neste isolamento. Há ainda outro valor de tensão que pode ser utilizado para caracterizar a suportabilidade de um arranjo isolante: a **Tensão de Descarga Disruptiva Assegurada (U_{90})**. Esse valor apresenta 90% de probabilidade de ocorrência de descarga disruptiva (ABNT, 2013).

Outro importante parâmetro utilizado na análise de suportabilidade consiste no tempo para interrupção. Ele é obtido a partir do registro da forma de onda da tensão de ensaio. Na Figura 4.2, observa-se uma reta traçada entre os pontos A e B. O ponto de interseção entre essa reta e o eixo horizontal representando o tempo (t) é chamado de origem virtual. O intervalo de tempo entre essa origem virtual e o instante de colapso da tensão é definido como tempo para interrupção ou tempo de corte (T_C). Tanto as tensões disruptivas quanto o tempo de corte são utilizados no levantamento das curvas características de suportabilidade (ou curvas V-T).

4.2.2 Procedimentos para Determinação das Tensões Disruptivas

Para isolação autorrecuperante, as tensões U_{10} , U_{50} e U_{90} podem ser avaliadas utilizando procedimentos estatísticos. Dentre os mais empregados, destacam-se os ensaios com acréscimo e decréscimo. Nessa classe de ensaios, n grupos de solicitações de tensões são aplicados em níveis de tensão U_i . O nível de tensão para cada grupo de solicitações é aumentado ou diminuído por uma parcela ΔU , de acordo com o resultado do grupo anterior de solicitações.

Dois procedimentos de ensaio são comumente utilizados: o procedimento suportável e o procedimento disruptivo. No procedimento suportável, o nível de tensão é acrescido de uma parcela ΔU se nenhuma descarga disruptiva ocorrer em um grupo de aplicações de tensão; caso contrário, o nível de tensão é diminuído da mesma quantidade. No procedimento disruptivo, o nível de tensão é aumentado de ΔU se for observado pelo menos um caso de suportabilidade; do contrário, é reduzido na mesma proporção. Em cada grupo de solicitação de tensão, pelo menos 15 aplicações devem ser feitas com ΔU variando de 1% a 3% do valor presumido de U_{50} (ABNT, 2013).

As tensões U_{10} e U_{90} também podem ser avaliadas indiretamente a partir de U_{50} a partir das relações:

$$U_{10} = U_{50}(1 - 1,3s) \quad (4.1)$$

$$U_{90} = U_{50}(1 + 1,3s) \quad (4.2)$$

onde s é o desvio-padrão da tensão de descarga disruptiva.

4.2.3 Correção para as Condições Ambientais de Referência

Em isolações externas, a ocorrência de disrupções depende, dentre outros fatores, das condições atmosféricas no momento da solicitação. Usualmente, a tensão de descarga disruptiva para uma dada distância no ar cresce com a densidade ou umidade do ar. Por isso, deve ser aplicado um fator de correção atmosférico K_t às tensões de descarga disruptiva determinadas em ensaios laboratoriais. Esse fator de correção resulta do produto entre dois parâmetros:

- Fator de correção para a densidade do ar (k_1);
- Fator de correção para a umidade do ar (k_2).

$$K_t = k_1 k_2 \quad (4.3)$$

Aplicando o fator de correção K_t , a tensão de descarga disruptiva U obtida em determinadas condições ambientais pode ser convertida no valor U_0 utilizando a Eq. (4.4). O valor corrigido seria obtido nas condições atmosféricas de referência, as quais são apresentadas na Tabela 4.1.

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \quad (4.4)$$

Tabela 4.1 – Condições atmosféricas de referência.

Temperatura	$t_0 = 20 \text{ °C}$
Pressão barométrica	$p_0 = 760 \text{ mmHg}$
Umidade absoluta	$h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

O fator de correção para a densidade do ar k_1 depende da densidade relativa do ar δ e de um expoente m :

$$k_1 = \delta^m \quad (4.5)$$

A densidade relativa do ar δ é dada por:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \left(\frac{273 + t_0}{273 + t} \right) = 0,386 \left(\frac{p}{273 + t} \right) \quad (4.6)$$

onde p e t são, respectivamente, a pressão atmosférica (em mmHg) e a temperatura ambiente (em °C) medidas no momento do ensaio.

Já o fator de correção para a umidade k_2 é geralmente expresso como:

$$k_2 = k^w \quad (4.7)$$

onde w é um expoente e k é um parâmetro adimensional que depende do tipo de tensão de ensaio (contínua, alternada ou impulsiva) e é função tanto da umidade absoluta h quanto da densidade relativa do ar δ . Para tensões impulsivas:

$$k = 1 + 0,010 \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad (4.8)$$

A umidade absoluta h (em g/m^3) pode ser determinada indiretamente pela medição da umidade relativa R (em percentual) e da temperatura ambiente t (em $^\circ\text{C}$) aplicando a seguinte relação:

$$h = \frac{6,11 R e^{\frac{17,6t}{243+t}}}{0,4615(273 + t)} \quad (4.9)$$

A umidade relativa R pode ser determinada utilizando um termo higrômetro. Esse equipamento fornece duas temperaturas: a do bulbo úmido e a do bulbo seco (temperatura ambiente). Com o auxílio do gráfico da Figura 4.3, a umidade relativa é encontrada.

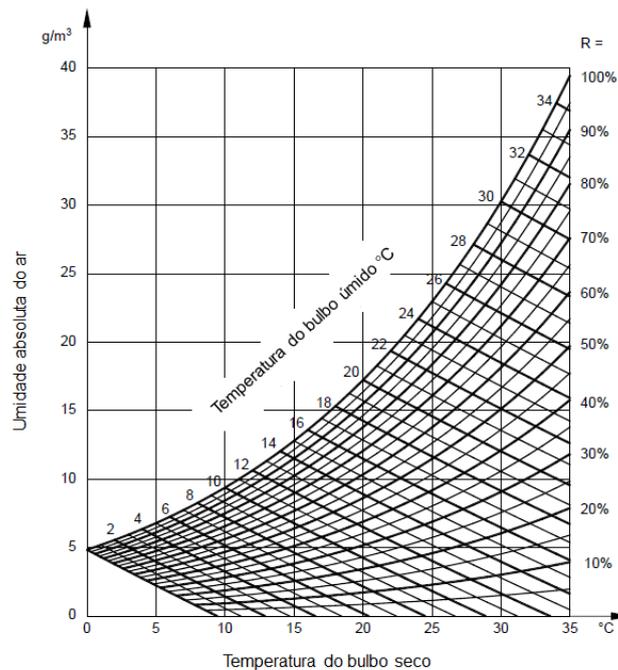


Figura 4.3 – Umidade absoluta do ar em função das leituras dos termômetros de bulbo seco e úmido. Reproduzida de (ABNT, 2013).

Os expoentes m e w dependem de um parâmetro g dado por:

$$g = \frac{U_{50}}{500L\delta k} \quad (4.10)$$

onde U_{50} é o valor da tensão crítica disruptiva (em kV) medida nas condições atmosféricas reais (ou estimada como 1,1 vezes a tensão de ensaio); L é a menor distância de arco (em metros); δ é densidade relativa do ar dada por (4.6) e k é o parâmetro adimensional dado por (4.8). A partir do cálculo do parâmetro g , os expoentes m e w podem ser determinados com o auxílio da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores dos expoentes m para a correção da densidade do ar e w para a correção de umidade em função do parâmetro g . Reproduzida de (ABNT, 2013).

g	m	w
$< 0,2$	0	0
0,2 a 1,0	$\frac{g}{0,8}(g - 0,2)$	$\frac{g}{0,8}(g - 0,2)$
1,0 a 1,2	1,0	1,0
1,2 a 2,0	1,0	$\frac{(2,2 - g)(2,0 - g)}{0,8}$
> 2	1,0	0

Dessa forma, sendo conhecidos todos os parâmetros necessários para a determinação dos fatores de correção, basta aplicar as Eq. (4.3) e (4.4) ao valor das tensões disruptivas.

4.3 Panorama geral dos ensaios com cabos cobertos

As avaliações do comportamento da suportabilidade de arranjos isolantes apresentadas até aqui referem-se essencialmente a meios autorrecuperantes. As informações descritas no Capítulo 2 a respeito dos processos disruptivos em dielétricos sólidos indicam que tais procedimentos, em tese, não poderiam ser aplicados na avaliação de isolações não autorrecuperantes. Em dielétricos sólidos, é praticamente impossível

garantir a independência entre os testes. Uma vez que o material sofre alterações a cada solicitação, os resultados dos ensaios são influenciados, de certa forma, pelo que acontece em um ensaio anterior. Com isso, as análises do comportamento estatístico das descargas disruptivas são comprometidas. No caso específico de cabos cobertos, ocorre o acúmulo de cargas na camada isolante após cada aplicação de tensão. Há ainda um fator complicador: a perfuração da camada isolante em decorrência das descargas disruptivas.

A norma (ABNT, 2013) recomenda um procedimento de ensaio para isolação não autorrecuperante. Nesse procedimento, três impulsos, de forma e polaridade especificadas, no nível presumido de tensão suportável são aplicados ao arranjo sob ensaio. Os requisitos do ensaio são satisfeitos se não houver indicação de falha. Entretanto tal procedimento apresenta a limitação de apenas indicar se o objeto mantém ou não suas características isolantes para determinado nível de tensão. Dessa forma, torna-se necessário modificar esse procedimento para avaliar o nível de tensão disruptiva de isolantes sólidos. A metodologia empregada em cada ensaio é detalhada a seguir.

Por uma questão de simplicidade, em um primeiro momento, optou-se pela realização dos testes utilizando a estrutura monofásica CM2. Sua configuração mais simples permite um melhor controle das variáveis do problema, o que é de grande importância no processo de sistematização dos ensaios. Nesse tipo de estrutura, por exemplo, é possível eliminar uma possível influência do braço suporte tipo “C” e dos parafusos de fixação dos isoladores superiores no processo disruptivo, caso a estrutura CE3 fosse utilizada. A Figura 4.4 mostra os componentes da estrutura CM2. Ela é formada por um braço suporte em formato “L”, o qual é preso ao poste por uma cinta metálica e cuja função é de sustentar o conjunto isolador/cabo. O isolador é polimérico do tipo pino e classe 15 kV.

No entanto, a maior parte das redes de distribuição compactas é formada por estruturas trifásicas. De forma a contemplar também uma estrutura desse tipo, foram realizados ensaios utilizando a estrutura CE2 (Figura 4.5). Ela foi escolhida por apresentar semelhanças à estrutura monofásica CM2. Conforme pode ser visto na Figura 3.1, as demais estruturas são formadas por diferentes componentes (espaçadores, isoladores de ancoragem, etc.).

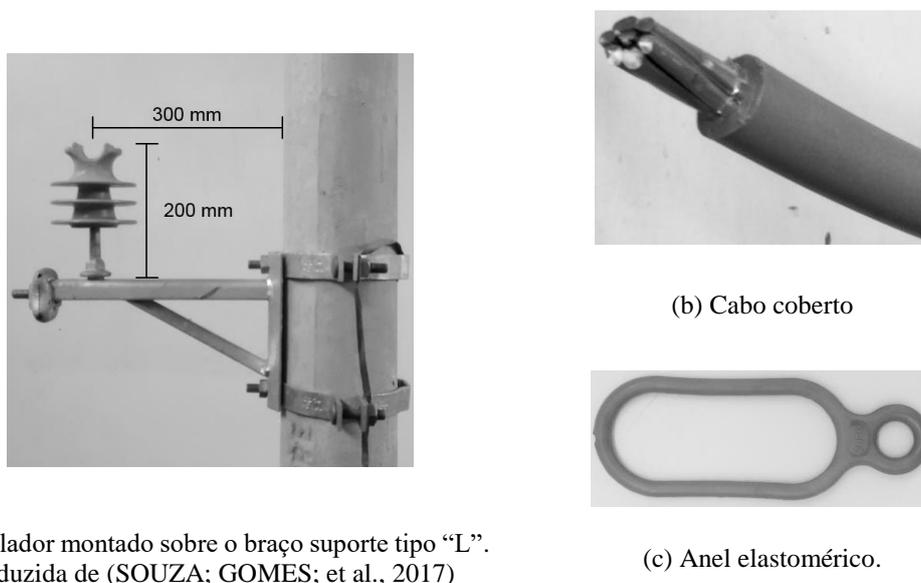


Figura 4.4 – Componentes da estrutura CM2.

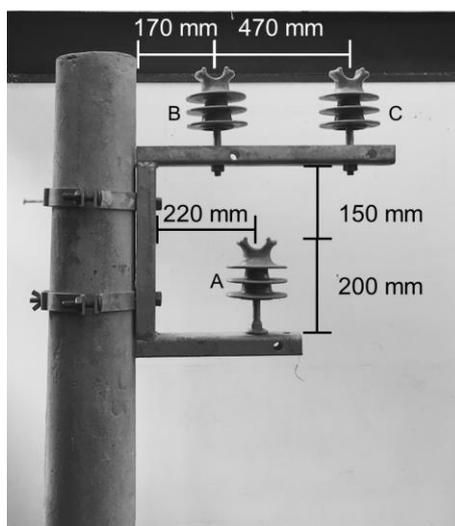
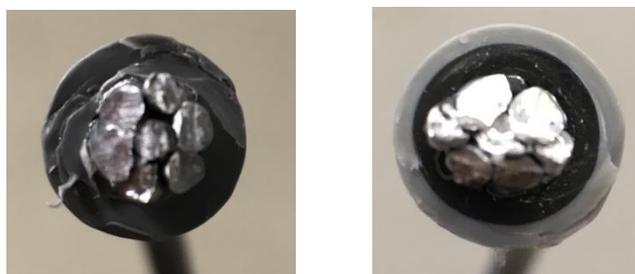


Figura 4.5 – Estrutura trifásica CE2. Reproduzida de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).

Os condutores utilizados nos ensaios são apresentados na Figura 4.6. Ambos possuem seção transversal igual a 50 mm^2 e são formados por sete fios de alumínio. Eles se diferenciam na cobertura empregada. O cabo XLPE é provido de uma camada dielétrica com espessura igual a 3 mm aplicada diretamente sobre os fios condutores. O outro cabo testado, possui uma dupla camada protetora. A camada interna é composta por um material polimérico (normalmente XLPE) acrescido de um pigmento popularmente conhecido como ‘negro de fumo’ (*carbon black*). Esse material funciona como uma blindagem à luz e como reforço ao cabo. Dependendo da quantidade adicionada, ele pode

tornar o material polimérico semicondutivo (NÓBREGA, 2013). A camada externa possui em sua composição HDPE. A espessura total das duas camadas desse cabo é igual a 4 mm.



(a) Cabo XLPE.

(b) Cabo HDPE.

Figura 4.6 – Cabos utilizados nos ensaios. Reproduzida de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).

O arranjo montado nas dependências do LRC (UFMG/CEMIG) para os ensaios é mostrado na Figura 4.7. O gerador de tensão Haefely SGSA 600kV (Figura 4.8) foi utilizado para fornecer as tensões de impulso atmosférico padronizado (1,2/50 μ s). Ele é composto por seis estágios de até 100 kV cada um e é baseado no circuito proposto por (MARX, 1923). A saída do gerador foi conectada a uma das terminações do cabo posicionado na estrutura a ser testada. As amostras de cabo foram fixadas ao isolador utilizando um anel elastomérico (Figura 4.4c). Na saída do gerador também foi conectado o divisor capacitivo, responsável pela medição das tensões. Todo o sistema (incluindo as partes metálicas da estrutura) foi aterrado utilizando uma fita de cobre conectada à malha de aterramento do laboratório.



Figura 4.7 – Arranjo para a realização dos ensaios. Adaptada de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).



Figura 4.8 – Gerador de tensões impulsivas modelo Haefely SGSA 600kV 30 kJ.

De forma geral, os ensaios com cabos cobertos foram realizados adotando o procedimento descrito em (LIMA, 2015) e (GOMES, 2015): a partir de um nível inicial (normalmente próximo ao valor da tensão U_{50} da estrutura), cinco tensões impulsivas de mesma amplitude foram aplicadas. Esse nível de tensão foi elevado em passos de 10 kV até que uma descarga disruptiva plena fosse observada (LIMA; GOMES; et al., 2017), (SOUZA; GOMES; et al., 2017).

O ensaio com polaridade negativa apresentou um grande desafio para a sua realização. Inicialmente, foram testadas amostras de comprimento igual a 5 m. No entanto, todas as disrupções ocorreram da ponta do cabo para a estrutura aterrada (pino do isolador). Aumentou-se então o comprimento do cabo para 7 m, mas o problema persistiu. Além disso, foi instalada uma pequena esfera metálica na ponta livre do cabo na tentativa de equalizar o campo elétrico local, mas essa solução também se mostrou insuficiente. O ensaio só foi possível de ser realizado com o aumento do comprimento do cabo para 10 m. Esse valor corresponde ao limite exequível dada a limitação de espaço do laboratório e outras importantes questões como a curvatura máxima do cabo no isolamento recomendada pela concessionária e o *layout* dos equipamentos.

Dada a dificuldade em distinguir os arcos elétricos que efetivamente foram capazes de perfurar a camada dielétrica daqueles que contornaram todo o comprimento do cabo em direção à sua extremidade a olho nu, optou-se por realizar a foto-filmagem de cada aplicação de tensão de ensaio. Os equipamentos utilizados foram um *tablet* e um *smartphone* cujas câmeras possuem a capacidade de filmagem em 120 e 240 frames por segundo, respectivamente. No caso de ocorrência de descarga disruptiva, procedia-se à verificação frame a frame para identificar o ponto de contato do arco. A Figura 4.9 ilustra uma descarga superficial registrada durante a realização dos ensaios. Maiores detalhes a respeito das particularidades de cada condição de ensaio são apresentados no Capítulo 5.

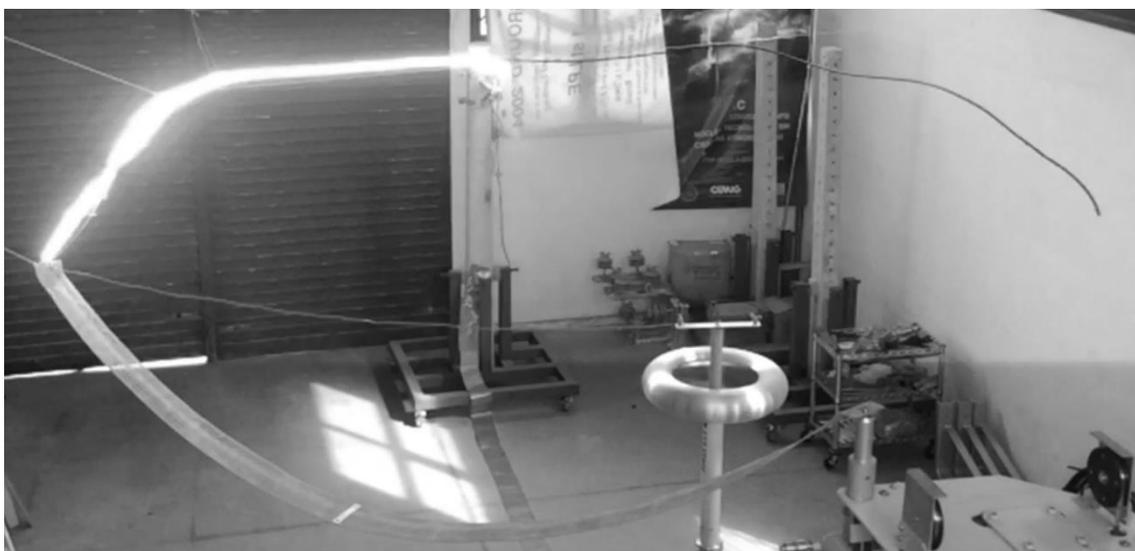


Figura 4.9 – Descarga superficial.

5 Resultados

Experimentais

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados resultados experimentais de ensaios realizados com ondas de tensão impulsiva obtidas em laboratório em arranjos formados por cabos nus e cobertos posicionados nas estruturas monofásica CM2 e trifásica CE2 com o objetivo de determinar as tensões disruptivas, os tempos para disrupção e as distâncias de arco. Em um primeiro momento, os ensaios foram realizados utilizando tensões impulsivas de polaridade positiva. Essa polaridade foi escolhida por se tratar de uma condição representativa das tensões induzidas em redes de distribuição quando estas são iluminadas pelo campo eletromagnético irradiado a partir do ponto de incidência de descargas descendentes, que tipicamente transferem cargas negativas da nuvem para o solo (SILVEIRA, 2006). Posteriormente, também foram realizados ensaios utilizando tensões impulsivas de polaridade negativa. Embora solicitações oriundas de surtos de tensão atmosférica com essa polaridade sejam menos frequentes, buscou-se uma análise de forma a contemplar ambos os casos.

5.2 Estrutura monofásica CM2

5.2.1 Ensaios com cabos nus

Os ensaios realizados com cabos nus posicionados na estrutura CM2 (Figura 5.1) correspondem a uma condição inicial de análise para proporcionar um entendimento do comportamento da estrutura caso a cobertura dielétrica do cabo esteja completamente danificada ou tenha sido removida. Uma situação que exemplifica essa prática foi descrita por (LEE et al., 1982). De acordo com o artigo, a concessionária de energia elétrica dos Estados Unidos PPL adotou a prática de retirar a cobertura dos cabos nas proximidades dos isoladores nos postes com o intuito de minimizar os danos causados por descargas disruptivas na cobertura dos cabos. A decorrente redução do Nível Básico de Isolamento (NBI) como resultado dessa medida faz com que neste local se estabeleça um ponto preferencial de ocorrência do arco de contorno dos isoladores (*flashover*). Dessa forma, preserva-se a cobertura no vão entre dois postes.

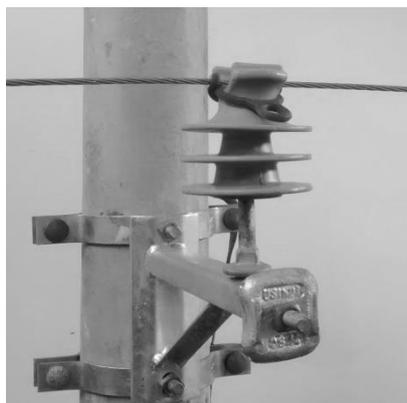


Figura 5.1 – Estrutura CM2 com cabo nu.

O primeiro ensaio realizado teve como objetivo a identificação dos valores das tensões suportáveis U_{10} , U_{50} e U_{90} . Esses valores correspondem ao valor de pico das tensões impulsivas que apresentam, respectivamente, 10%, 50% e 90% de probabilidade de ocorrência de uma descarga disruptiva. Para a determinação de U_{50} adotou-se, conforme (ABNT, 2013), o método de acréscimo e decréscimo com $n = 1$ solicitação por grupo e 29 aplicações, sendo 22 úteis para o cálculo. A tensão inicial foi de 106 kV (polaridade positiva) e adotou-se um passo de 3 kV. A primeira disrupção ocorreu no nível de 127 kV. A partir deste ponto foram realizadas mais 21 aplicações.

A média das 22 tensões aplicadas a contar a partir da primeira disrupção foi igual a 125,6 kV com desvio-padrão percentual de 2,2%. Utilizando (4.1) e (4.2), os valores de U_{10} e U_{90} foram determinados como 122,1 kV e 129,2 kV, respectivamente. As condições ambientais aferidas no momento de realização do ensaio são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Condições atmosféricas no momento de realização do ensaio de acréscimo e decréscimo para a determinação de U_{50} da estrutura monofásica CM2 (polaridades positiva e negativa).

Temperatura	$t = 24 \text{ °C}$
Pressão barométrica	$p_0 = 699 \text{ mmHg}$
Umidade absoluta	$h_0 = 16,6 \text{ g/m}^3$

Adotando o mesmo procedimento utilizado para a polaridade positiva, realizou-se o ensaio para a determinação dos valores das tensões suportáveis U_{10} , U_{50} e U_{90} para a polaridade negativa. O método de acréscimo e decréscimo foi utilizado com $n = 1$ solicitação por grupo e 38 aplicações, sendo 22 úteis para o cálculo. O valor absoluto da tensão inicial foi de 105 kV e adotou-se um passo de 3 kV (em módulo). A primeira disrupção ocorreu no nível de 153 (valor absoluto) kV. A partir deste ponto foram realizadas mais 21 aplicações.

O valor absoluto médio das 22 tensões aplicadas a contar da primeira disrupção foi igual a 148,9 kV com desvio-padrão percentual de 2,7%. Utilizando (4.1) e (4.2), os valores absolutos de U_{10} e U_{90} foram determinados como 143,7 kV e 154,1 kV, respectivamente. Aplicando as correções para as condições atmosféricas de referência (Tabela 4.1), os valores do nível básico de isolamento U_{10} , da tensão crítica disruptiva U_{50} e da tensão de descarga disruptiva assegurada U_{90} foram calculados para ambas as polaridades e são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores das tensões suportáveis para a estrutura monofásica CM2 com cabo nu.

Polaridade	Tensões suportáveis (kV)		
	U_{10}	U_{50}	U_{90}
Positiva	126	130	134
Negativa	151	156	161

Os resultados indicam uma pequena variação entre os valores das tensões suportáveis U_{10} , U_{50} e U_{90} . Para a polaridade positiva, os valores de U_{10} e U_{90} são aproximadamente 2% inferior e 3% superior ao valor de U_{50} , respectivamente. Já para a polaridade negativa, os valores de U_{10} e U_{90} diferem do valor de U_{50} em apenas 3%. Conforme apontado por (GOMES, 2015), a razão desse comportamento reside nos baixos valores do desvio-padrão obtido nos ensaios e utilizados no cálculo dessas tensões.

Com relação ao módulo do valor de U_{50} , percebe-se que para a polaridade negativa, a estrutura apresenta uma suportabilidade cerca de 20% maior que para a polaridade positiva. Esse resultado indica que a polaridade positiva se constitui uma condição crítica para cabos nus.

Esse comportamento deve-se, sobretudo, aos valores de campo elétrico requeridos para início do processo disruptivo. Tais valores dependem de fatores como configuração do arranjo isolante, forma de onda e polaridade da tensão aplicada. De acordo com (CIGRE, 1991), os valores críticos de campo elétrico tipicamente utilizados em análises de suportabilidade de isoladores do tipo pino são 520 kV/m e 600 kV/m para as polaridades positiva e negativa, respectivamente. Dessa forma, espera-se que a ruptura no arranjo isolante ocorra em um nível de tensão menos elevado quando este é submetido a tensões impulsivas positivas.

5.2.2 Ensaios com cabos cobertos

A despeito da necessidade de se estabelecer os níveis mínimos de tensão capazes de provocar falha de isolamento nas estruturas das redes de distribuição compactas, a literatura tradicional não apresenta uma definição clara da metodologia a ser adotada nos ensaios com cabos cobertos. Nesse sentido, modificou-se o procedimento recomendado pela norma (ABNT, 2013) de forma a atender a proposta de identificação das tensões disruptivas das principais estruturas que compõem uma rede de distribuição compacta. Esse procedimento é o mesmo proposto em (LIMA, 2015), (GOMES, 2015) e adotado em recentes trabalhos realizados no LRC (UFMG/CEMIG), conforme mostram (SOUZA; GOMES; et al., 2017) e (LIMA; GOMES; et al., 2017).

Na tentativa de determinar a tensão disruptiva para a estrutura CM2 com o cabo coberto posicionado sobre o isolador foram encontradas algumas dificuldades relativas à

definição do comprimento do cabo a ser utilizado e ao procedimento de ensaio. Em um primeiro momento, buscou-se avaliar a tensão mínima que provocaria uma perfuração na camada de cobertura do cabo. Contudo, os primeiros testes indicaram que o comprimento inicial adotado (1 m) não seria suficiente para observar uma perfuração. Com esse comprimento, as descargas disruptivas aconteciam superficialmente da ponta do cabo para a estrutura aterrada mais próxima (braço suporte). Novas tentativas com um comprimento igual a 2 m foram realizadas sem sucesso. Com isso, aumentou-se o comprimento para 5 m e o problema foi contornado para impulsos de polaridade positiva.

Outra dificuldade encontrada consistiu no fenômeno de acúmulo de carga sobre a superfície da cobertura dielétrica do cabo após cada aplicação da tensão de ensaio. Conforme indicado em (NAKAMURA et al., 1986), o campo elétrico resultante é alterado pela presença dessa carga estática, influenciando o valor da tensão disruptiva. De modo a eliminar essa influência, torna-se necessária a remoção da carga depositada sobre a cobertura do cabo após cada aplicação de tensão. Isso foi realizado com o auxílio de uma escova com fios de cobre fixados entre uma base de madeira e conectados ao aterramento do gerador. Essa escova foi fixada a um bastão isolante para garantir a segurança do operador e é apresentada na Figura 5.2.



Figura 5.2 – Escova metálica utilizada para a remoção da carga depositada sobre a cobertura do cabo.

O procedimento adotado consistiu na realização de dois tipos de ensaio: A e B. No ensaio do tipo A, foram utilizados cabos novos e intactos (sem perfuração na cobertura dielétrica). A partir de determinado nível de tensão inicial, foram aplicadas cinco tensões

de ensaio em cada nível de tensão. Esse nível foi aumentado em passos de 10 kV até que uma ruptura resultando em perfuração da camada isolante fosse observada (Figura 5.3). Após a perfuração, realizou-se o ensaio do tipo B seguindo o mesmo procedimento, porém utilizando o cabo perfurado. Este tipo de ensaio teve como objetivo observar a influência do furo no comportamento da suportabilidade do arranjo (LIMA, 2015), (GOMES, 2015).

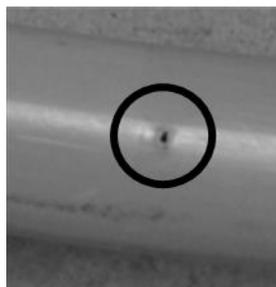


Figura 5.3 – Perfuração na cobertura XLPE de um cabo de 15 kV causada por uma descarga disruptiva. Adaptada de (LIMA et al., 2015).

5.2.2.1 Descargas disruptivas parciais

Os primeiros eventos observados nos testes com cabos cobertos foram as descargas disruptivas parciais. Esse tipo de evento é caracterizado pelo estabelecimento de um arco elétrico no ar e um leve efeito luminoso no cabo, conforme mostra a Figura 5.4.

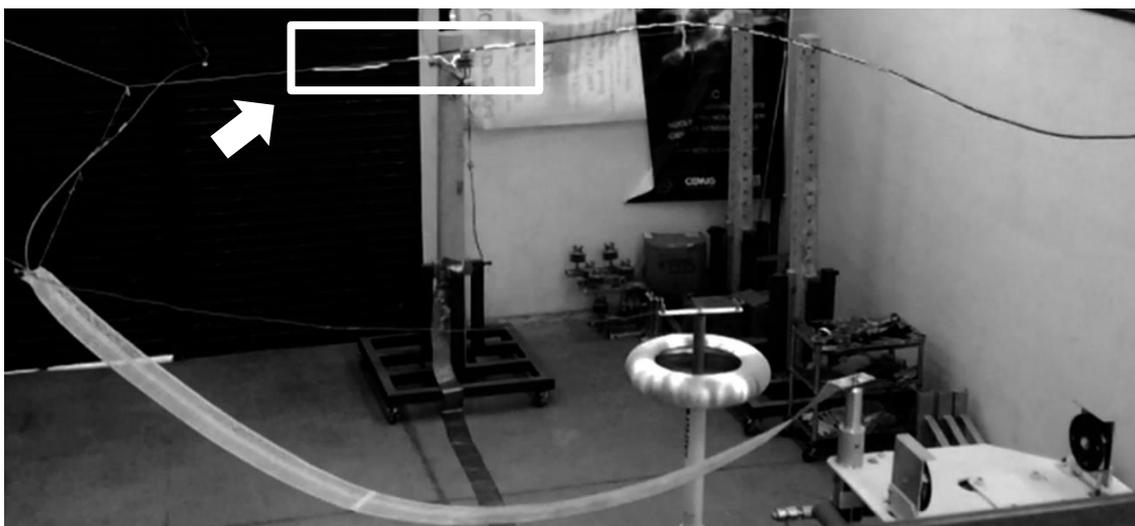


Figura 5.4 – Descarga disruptiva parcial. Reproduzida de (SOUZA; GOMES; et al., 2017).

A Figura 5.5(a) ilustra uma típica onda de tensão medida durante a ocorrência de uma descarga disruptiva parcial. Essa onda apresenta um afundamento de tensão da ordem de 30 kV, com a amplitude se recuperando logo em seguida. Já a Figura 5.5(b) ilustra uma onda de tensão medida durante um ensaio que causou a perfuração de uma amostra de cabo. Também é possível perceber um afundamento de tensão, contudo, logo após algumas oscilações, há o colapso de tensão. Esse comportamento é característico das disrupções que causaram perfuração do cabo.

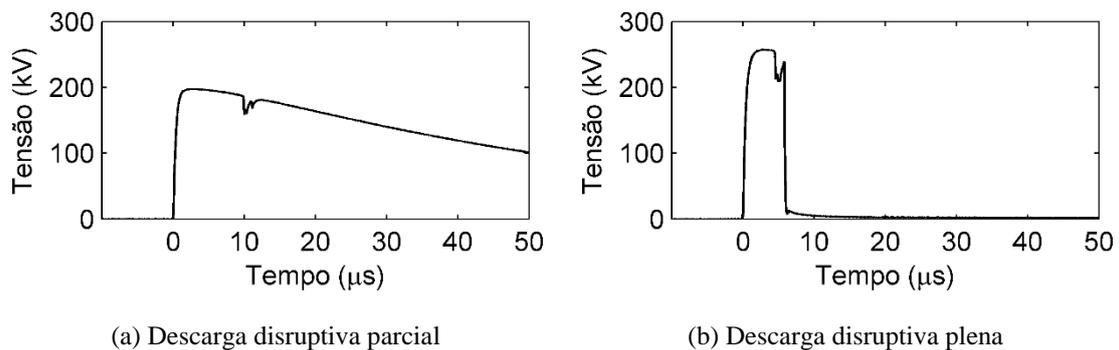


Figura 5.5 – Ondas de tensão medidas durante a realização dos ensaios.

Durante os ensaios, foram observadas 61 ocorrências de descargas disruptivas parciais, sendo 45 registros para a polaridade positiva e 16 para a polaridade negativa. A Figura 5.6 apresenta a dispersão dos valores absolutos de pico das tensões medidas quando se observou a ocorrência de descargas disruptivas parciais em cabos cobertos com XLPE. Nos diagramas de caixa (ou *boxplots*) da Figura 5.6, as bordas inferior e superior dos retângulos delimitam uma faixa onde localizam-se 50% dos valores de tensão que provocaram uma descarga disruptiva parcial.

Conforme indica a Figura 5.6(a), em testes com tensões impulsivas positivas, 50% das descargas disruptivas parciais ocorreram quando as tensões aplicadas estavam entre 222 kV e 248 kV. O menor e o maior valores de tensão que provocaram uma descarga desse tipo foram 198 kV e 267 kV, respectivamente. O valor mediano foi 233 kV e, para esta polaridade, coincide com o valor médio.

Já os testes com impulsos negativos apresentaram a faixa de ocorrência mais provável de descargas disruptivas parciais entre 178 kV e 188 kV. O menor e o maior valores absolutos de tensão que causaram descargas desse tipo foram 168 kV e 198 kV,

respectivamente. Os valores absolutos mediano e médio foram 178 kV e 182 kV, respectivamente.

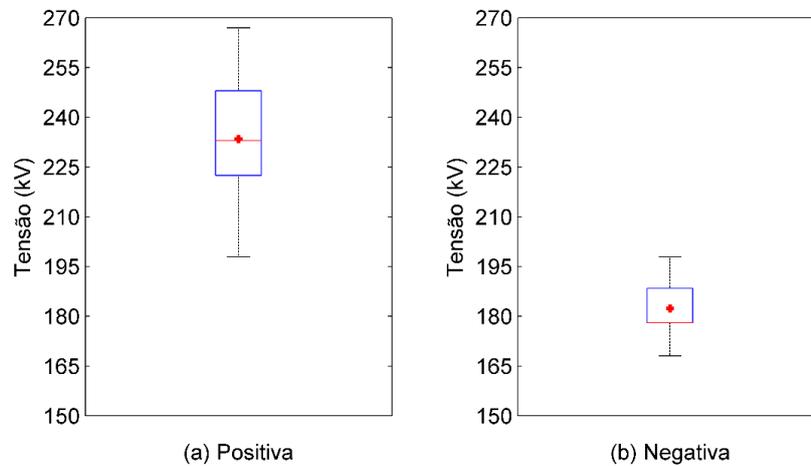


Figura 5.6 – Dispersão dos valores de tensão para ocorrência de descargas disruptivas parciais nos ensaios com cabos cobertos com XLPE.

Esses resultados indicam uma maior dispersão dos valores de tensão que levaram à ocorrência de descargas disruptivas parciais nos testes com polaridade positiva. Além disso, os valores absolutos de tensão correspondentes a esses eventos para ensaios com tensões positivas são superiores aos valores obtidos nos ensaios com tensões negativas. Tal condição constitui-se em um indicativo de que os valores de tensão esperados para ocorrência de disrupção plena serão maiores para tensões positivas do que para tensões negativas. A análise referente a esse tipo de ocorrência é realizada na próxima seção.

Em testes com cabos cobertos com HDPE, não houve um número significativo de descargas disruptivas parciais que permitisse a realização de uma análise semelhante. Em apenas duas ocasiões essas descargas foram observadas, ambas durante ensaios com tensões impulsivas positivas. O valor de pico das tensões aplicadas que levaram a essas ocorrências foi 250 kV.

5.2.2.2 Descargas disruptivas plenas

As descargas disruptivas plenas compreendem a etapa final do processo disruptivo de um cabo coberto submetido a tensões impulsivas. Normalmente, essa descarga é responsável pela perfuração da cobertura dielétrica do cabo causando redução da suportabilidade elétrica. Ela é caracterizada por um arco elétrico de elevada luminosidade

estabelecido entre o local da perfuração da cobertura do cabo e a estrutura aterrada, conforme mostra a Figura 5.7.

5.2.2.2.1 Tensões disruptivas

Todos os resultados incluídos neste capítulo foram corrigidos para as condições ambientais de referência de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 4. As tensões médias disruptivas para a estrutura CM2 com cabos XLPE e HDPE submetidos a impulsos positivos e negativos são apresentadas na Tabela 5.3. Essas tensões foram determinadas como a média simples dos valores de pico dos impulsos aplicados que resultaram em uma descarga disruptiva plena. Para o cálculo dessa média, foram utilizadas cinco amostras de cabo para cada polaridade.

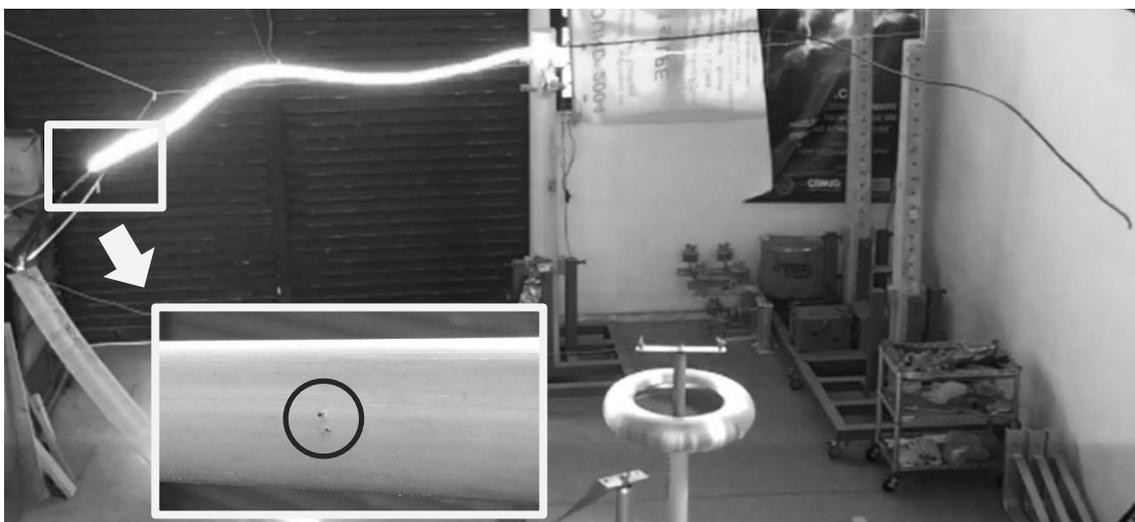


Figura 5.7 – Descarga disruptiva plena com perfuração da cobertura dielétrica do cabo. Reproduzida de (SOUZA; GOMES; et al., 2017)

Tabela 5.3 – Tensões médias disruptivas associadas com a estrutura CM2.

Polaridade	Tensão média disruptiva (kV)		Variação percentual
	<i>XLPE</i>	<i>HDPE</i>	
Positiva	239	424	77%
Negativa	219	347	58%

Como pode ser observado, para ambas as polaridades a suportabilidade do arranjo isolante aumenta quando cabos HDPE são utilizados ao invés de cabos XLPE. Os valores absolutos médios da tensão disruptiva média obtidos com o uso de cabos HDPE foram

77% e 58% maiores que os valores alcançados com o uso de cabos XLPE para as polaridades positiva e negativa, respectivamente.

Os resultados também indicam que o efeito da polaridade nos níveis de suportabilidade das estruturas com cabos cobertos difere daquele observado em cabos nus. Quando a camada isolante está presente, os valores da tensão disruptiva para impulsos negativos são menores que os valores para impulsos positivos. Esse resultado está consoante com o apresentado na literatura (NAKAMURA et al., 1986).

Por se tratar de ensaios que provocam danos permanentes no arranjo isolante, essas tensões são, em essência, diferentes das tensões que representam uma probabilidade de resultar em uma descarga disruptiva, como os parâmetros U_{10} , U_{50} e U_{90} , por exemplo, referentes a ensaios considerando cabos nus.

Feita essa ressalva, é importante, contudo, estabelecer o efeito da cobertura dielétrica do cabo na suportabilidade elétrica da estrutura CM2. Em comparação com o valor de tensão crítica disruptiva (U_{50}) da estrutura para a polaridade positiva (130 kV) as coberturas XLPE e HDPE promovem um aumento médio de suportabilidade de 84% e 226%, respectivamente. Para a polaridade negativa (U_{50} igual a 156 kV), esse aumento para os cabos XLPE e HDPE alcança os patamares de 40% e 122%, respectivamente.

Tendo em vista que os ensaios com cabo nu representam uma condição crítica, na qual a cobertura do cabo esteja completamente deteriorada ou que ela inexista no trecho próximo ao isolador, pode-se realizar uma análise mais conservadora. Nesse caso, deve-se levar em consideração não a tensão crítica disruptiva (U_{50}), mas a tensão suportável estatística (U_{10}). Embora esses parâmetros (de natureza estatística) não possam ser diretamente relacionados com as tensões disruptivas relacionadas aos cabos cobertos (de natureza determinística), cabe aqui uma extensão dessa análise mais conservadora. Dessa forma, deve-se também utilizar não a tensão média disruptiva, mas a menor amplitude de tensão impulsiva que tenha sido capaz de provocar uma descarga disruptiva plena. Esses valores são apresentados na Tabela 5.4.

Para impulsos positivos, a menor tensão disruptiva observada na estrutura CM2 com cabos XLPE foi 220 kV. Esse valor é aproximadamente 75% maior que a tensão suportável estatística da estrutura (126 kV). Para cabos HDPE, o ganho de suportabilidade

é ainda maior. A menor tensão disruptiva obtida nos ensaios foi 370 kV, ou seja, aproximadamente 194% maior que o valor de U_{10} .

Tabela 5.4 – Tensões mínimas disruptivas associadas com a estrutura CM2.

Polaridade	Tensão mínima disruptiva (kV)		Variação percentual
	<i>XLPE</i>	<i>HDPE</i>	
Positiva	220	370	68%
Negativa	198	318	60%

O mesmo comportamento foi observado nos ensaios com impulsos negativos. Para essa polaridade, o valor de U_{10} é igual a 151 kV (Tabela 5.2). Já as menores tensões disruptivas obtidas nos ensaios com cabos XLPE e HDPE foram 198 kV e 318 kV, respectivamente. Ou seja, valores aproximadamente 31% e 111% maiores que a tensão suportável estatística da estrutura CM2.

5.2.2.2 Tempo para disrupção

A relação entre o valor de pico da tensão impulsiva responsável pela ocorrência da descarga disruptiva e o instante de tempo para o qual ocorre o colapso da onda de tensão é ilustrada na Figura 5.8. Considerando as descargas ocorridas quando da aplicação de tensões impulsivas positivas, os menores tempos de corte registrados nos ensaios com cabos HDPE e XLPE foram 2,1 μ s e 11,6 μ s, respectivamente. Para ensaios com tensões negativas, os menores instantes de tempo referentes ao colapso da onda de tensão nos cabos HDPE e XLPE são 0,9 μ s e 4,1 μ s, respectivamente.

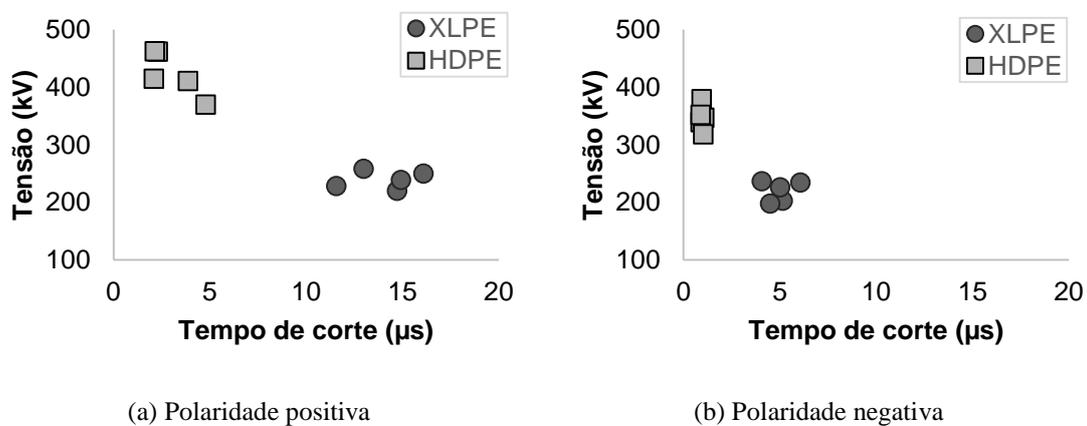


Figura 5.8 – Relação entre a tensão disruptiva e o tempo de corte para os ensaios na estrutura monofásica CM2.

Em relação aos maiores tempos de corte registrados durante os ensaios, percebeu-se que, para ambas as polaridades, os valores referentes às disrupções nos cabos XLPE são superiores aos valores dos cabos HDPE. Para tensões positivas, os maiores tempos de corte foram iguais a 16,1 μs e 4,8 μs considerando cabos XLPE e HDPE, respectivamente. Nos ensaios com tensões negativas, esses valores alcançaram as marcas de 6,1 μs e 1,1 μs , para os cabos XLPE e HDPE, respectivamente.

A Tabela 5.5 resume os intervalos de tempo onde foram registradas as disrupções nos ensaios com cabos cobertos na estrutura monofásica CM2. Para a polaridade positiva, os ensaios com amostras de cabo XLPE apresentaram tempos de corte em uma faixa igual a 4,5 μs . O intervalo de tempo correspondente para as amostras HDPE foi 40% menor (2,7 μs). Para a polaridade negativa, as faixas dos instantes de tempo para disrupção foram mais estreitas. Para cabos XLPE, as disrupções ocorreram em um intervalo de tempo igual a 2,0 μs . Já as amostras de cabo HDPE apresentaram disrupções em uma faixa 90% menor (0,2 μs).

Tabela 5.5 – Intervalo dos tempos de corte referentes às disrupções nos ensaios com cabos cobertos.

Polaridade	Intervalo de tempo de corte (μs)		Diferença percentual
	<i>XLPE</i>	<i>HDPE</i>	
Positiva	11,6–16,1	2,1–4,8	- 40%
Negativa	4,1–6,1	0,9–1,1	- 90%

Esse comportamento deve-se essencialmente aos maiores valores de tensão requeridos para provocar disrupção no cabo com dupla cobertura. Enquanto nos ensaios com o cabo XLPE as descargas disruptivas ocorreram geralmente na cauda da onda, em alguns casos nos ensaios com o cabo HDPE essas disrupções ocorreram na frente da onda de tensão impulsiva, conforme indicado na Figura 5.9.

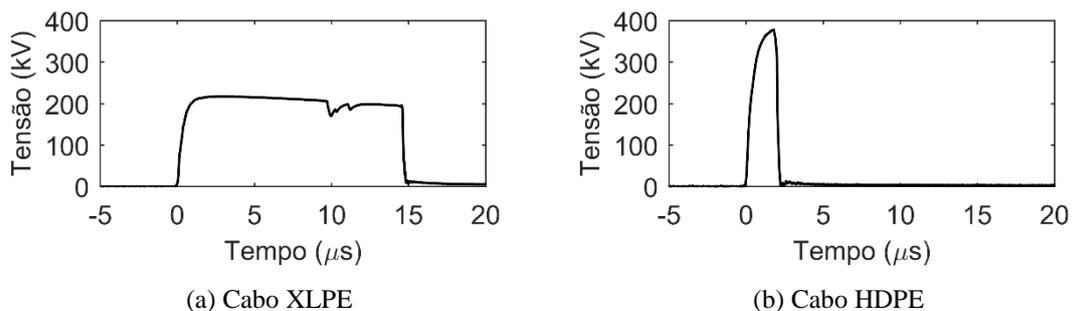


Figura 5.9 – Registro das ondas de tensão durante a disrupção dos cabos testados na estrutura CM2.

Um ponto a ser destacado, porém, consiste na relação entre os menores instantes de tempo de corte, e a amplitude da tensão aplicada. Conforme mostra a Figura 5.8, não há uma clara tendência no sentido de os menores tempos de corte se referirem aos maiores valores de pico das tensões que provocaram a disrupção. Como exemplo, cita-se o caso dos ensaios com cabos XLPE submetidos à polaridade positiva de tensão, no qual observou-se a tensão disruptiva mais elevada (258 kV) correspondendo ao tempo de corte de 13,0 μ s. De forma semelhante, tal comportamento foi observado nos ensaios com esse mesmo tipo de cabo e tensões impulsivas de polaridade negativa. Nesse caso, o maior valor absoluto da tensão disruptiva foi 234 kV com tempo de corte igual a 6,1 μ s.

Já nos ensaios com cabos HDPE e tensões impulsivas de polaridade positiva, o maior valor da tensão disruptiva (454 kV) corresponde ao tempo de corte de 2,3 μ s. Embora este valor não seja o menor instante de tempo observado, é um valor que se aproxima do limite inferior indicado na Tabela 5.5. O único caso no qual o maior valor absoluto da tensão disruptiva (348 kV) coincidiu com o menor tempo de corte (0,90 μ s) foi o ensaio com cabos HDPE e impulsos de polaridade negativa.

5.2.2.2.3 Localização dos furos

A Figura 5.10 ilustra a dispersão dos furos provocados pelas descargas disruptivas plenas ao longo da cobertura dos cabos testados. Quando submetidos a impulsos positivos, as amostras dos cabos apresentaram perfurações nas coberturas de XLPE e HDPE, respectivamente, nas faixas 37–156 cm e 1–380 cm a partir do isolador. Para impulsos negativos, cabos XLPE foram perfurados na distância entre 26 cm e 155 cm e os cabos HDPE apresentaram perfurações localizadas na faixa 4–170 cm a partir do isolador. A Figura 5.11 ilustra as regiões nas quais ocorreram perfurações de acordo com o tipo de cabo e a polaridade da tensão aplicada.

Embora seja esperado que os furos ocorram em distâncias bem próximas ao isolador, os dados obtidos mostram que há uma considerável dispersão deles ao longo de boa parte da extensão dos cabos testados. O motivo desse comportamento é relacionado com o depósito das cargas superficiais ao longo da cobertura dielétrica dos cabos durante a aplicação da tensão de ensaio. Embora essas cargas sejam retiradas após a aplicação da tensão impulsiva, no momento em que o cabo é submetido à solicitação ocorre a distribuição das cargas de forma simétrica em relação ao isolador. Além disso, é possível

que pequenas imperfeições oriundas do próprio processo de fabricação influencie o exato local onde o cabo sofrerá maior dano culminando com a perfuração da cobertura.

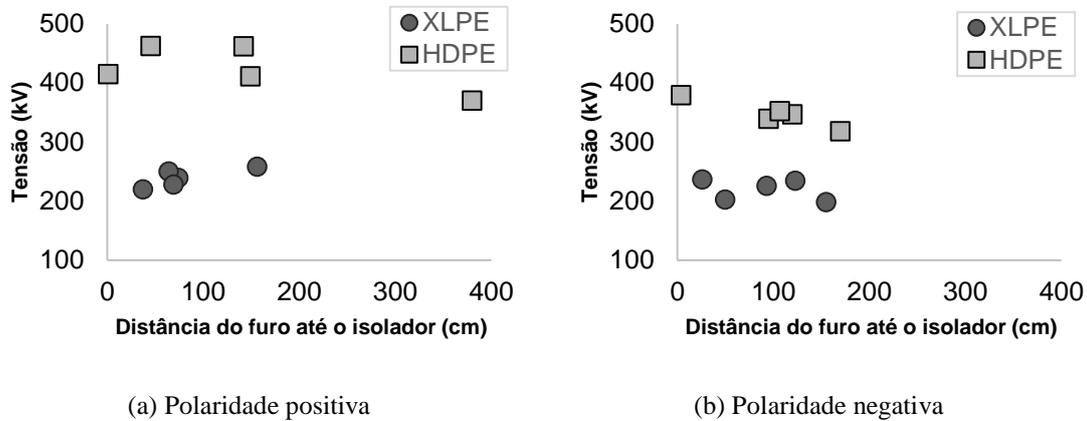


Figura 5.10 – Localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos testados com a estrutura monofásica.

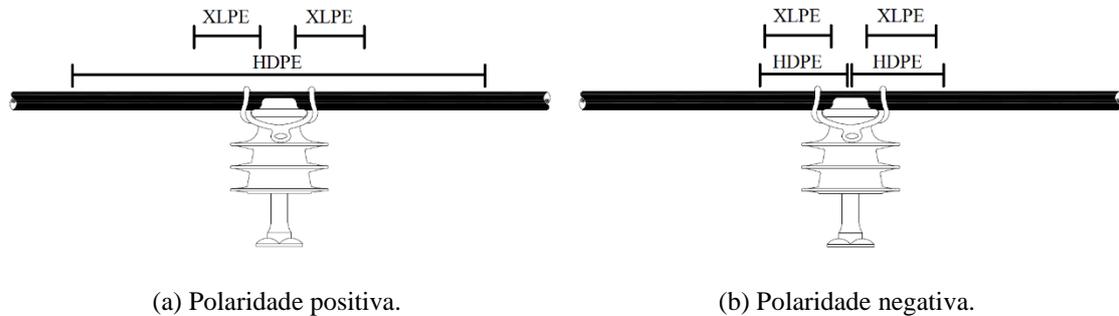


Figura 5.11 – Regiões de ocorrência dos furos ao longo da cobertura dos cabos testados.

Finalmente, é importante destacar que o nível de tensão que levou o arranjo à ruptura aparentemente não apresenta clara relação com a localização da perfuração da cobertura dielétrica do cabo. Embora nos ensaios com tensões negativas os furos mais próximos ao isolador tanto nos cabos XLPE quanto nos HDPE estejam relacionados aos maiores valores de tensão disruptiva, não é possível definir que esse é o padrão esperado para os ensaios. Tal comportamento não foi observado nos ensaios com tensões positivas, sobretudo aqueles referentes aos ensaios com cabos HDPE.

5.2.2.3 Ensaios com cabos danificados

Após a realização dos ensaios de suportabilidade elétrica da estrutura CM2 com cabos cobertos, as amostras perfuradas dos cabos XLPE e HDPE foram novamente utilizadas na realização do ensaio do tipo B. Neste tipo de ensaio, o cabo com a cobertura danificada foi posicionado na estrutura monofásica CM2 e submetido a tensões

impulsivas. A partir do valor da tensão crítica disruptiva (U_{50}), a amplitude da tensão foi elevada em passos de 10 kV até que uma ruptura fosse observada. Em um primeiro momento, foi avaliada a redução do nível de suportabilidade elétrica da estrutura com o cabo perfurado; a seguir, buscou-se estabelecer uma relação entre a tensão disruptiva e a localização do furo.

5.2.2.3.1 Redução da suportabilidade elétrica

Com a cobertura do cabo perfurada, nenhuma descarga para a ponta do cabo foi observada. Todos os arcos elétricos foram estabelecidos entre o furo e a estrutura aterrada. As tensões médias disruptivas para a estrutura CM2 considerando condutores nus e cabos com a cobertura intacta e perfurada são apresentadas nas Tabela 5.6 e Tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Comparação entre as tensões médias disruptivas para os ensaios com cabos XLPE.

Polaridade	Tensões médias disruptivas (kV)		
	<i>Cabo com cobertura XLPE intacta</i>	<i>Cabo com cobertura XLPE perfurada</i>	<i>Cabo sem cobertura (U_{50})</i>
Positiva	239	245	130
Negativa	219	186	156

Tabela 5.7 – Comparação entre as tensões médias disruptivas para os ensaios com cabos HDPE.

Polaridade	Tensões médias disruptivas (kV)		
	<i>Cabo com cobertura HDPE intacta</i>	<i>Cabo com cobertura HDPE perfurada</i>	<i>Cabo sem cobertura (U_{50})</i>
Positiva	424	237	130
Negativa	347	184	156

Conforme observado por (LIMA, 2015) e (GOMES, 2015), as amostras de cabos com a cobertura perfurada apresentam menor suportabilidade às tensões impulsivas em comparação às amostras com a cobertura intacta. Essa expectativa foi confirmada nos ensaios com o cabo HDPE. Para impulsos positivos e negativos a redução média de suportabilidade foi de 44% e 47%, respectivamente.

Já nos ensaios com o cabo XLPE, apenas para impulsos negativos esse comportamento foi observado. Nesse caso, a redução média de suportabilidade foi igual a 15%. Porém, quando submetidos a tensões impulsivas positivas, os condutores cobertos com XLPE apresentam um comportamento anômalo. De forma inesperada, o valor médio

da tensão disruptiva do cabo com a cobertura perfurada foi cerca de 2,5% maior que o valor médio correspondente ao ensaio com a cobertura intacta. Uma explicação para esse comportamento reside no fato de que em três das cinco amostras testadas a tensão que causou a disrupção no cabo com a cobertura perfurada foi maior que a tensão de perfuração. Isso ocorreu nos três casos de maior distância entre o furo e o isolador (49 cm, 74 cm e 156 cm). Nessas ocasiões, a disrupção ocorreu em um nível de tensão (10 kV) acima do nível no qual aconteceu a descarga disruptiva que causou a perfuração. Ou seja, mesmo danificada, a cobertura suportou cinco aplicações de tensão impulsiva com amplitude igual àquela responsável pela perfuração nos casos em que o dano estava mais distante do isolador.

Em comparação com os resultados obtidos nos ensaios com cabos nus, o aumento de suportabilidade elétrica dos cabos cobertos é evidente, mesmo com a cobertura perfurada. Nos ensaios com cabos XLPE, as tensões médias disruptivas para impulsos positivos e negativos foram, respectivamente, 88% e 19% maiores que o valor de U_{50} da estrutura. Já os ganhos médios em suportabilidade promovido pela cobertura HDPE, mesmo perfurada, em relação ao condutor nu para tensões impulsivas padronizadas de polaridade positiva e negativa foram 82% e 18% superiores, respectivamente.

Um importante ponto a ser destacado reside no fato de que as análises apresentadas até aqui buscam retratar uma condição mediana em termos da suportabilidade elétrica para a estrutura com cabos perfurados. Contudo, a análise feita a partir dos valores médios pode mascarar os menores valores de tensão capazes de provocar uma disrupção, os quais devem ser levados em consideração caso deseje-se proceder a uma análise mais conservadora.

Nesse sentido, a Figura 5.12 ilustra os valores mínimos das tensões disruptivas de polaridade positiva referentes aos ensaios realizados com amostras de cabos tanto intactas como perfuradas. Para o cabo XLPE, as menores amplitudes de tensão impulsiva que causaram disrupção em ambas as condições de cabos são coincidentes (220 kV). No entanto, para o cabo HDPE, o valor mínimo da tensão disruptiva com a amostra perfurada é cerca de 62% menor que o valor correspondente à amostra intacta. Credita-se essa redução à ocorrência de um furo a 1 cm do isolador em uma das amostras, conforme indica a Figura 5.10(a). Mesmo assim, o nível de suportabilidade registrado para esse

caso (142 kV) foi 9% superior à tensão crítica disruptiva (130 kV) e 13% superior ao nível básico de isolamento (126 kV) da estrutura.

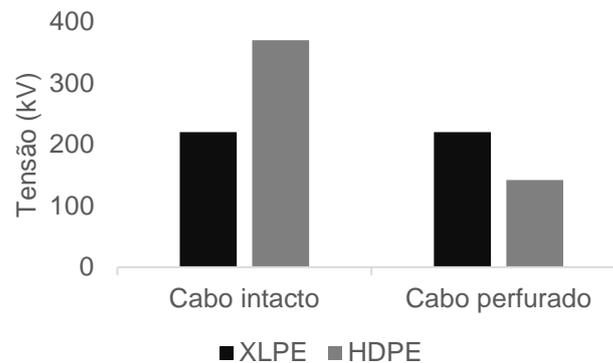


Figura 5.12 – Valores mínimos da tensão disruptiva de polaridade positiva obtidas nos ensaios com cabos intactos e perfurados.

A Figura 5.13 apresenta o comparativo dos valores mínimos de tensão disruptiva para a polaridade negativa. Considerando o cabo XLPE, a redução de suportabilidade observada nos ensaios com amostras perfuradas foi igual a 10%. Para o cabo HDPE, a redução foi mais acentuada, alcançando o patamar de 46%. Novamente, esse comportamento pode ser explicado pelo fato de uma das amostras testadas apresentar um furo muito próximo ao isolador (4 cm), conforme mostra a Figura 5.10(b). Em relação aos níveis de suportabilidade elétrica da estrutura com cabo nu indicados na Tabela 5.2, os valores mínimos da tensão disruptiva de polaridade negativa com as amostras perfuradas foram superiores ao correspondente valor de U_{10} (151 kV) em 18% para os cabos XLPE (178 kV) e em 14% para os cabos HDPE (172 kV).

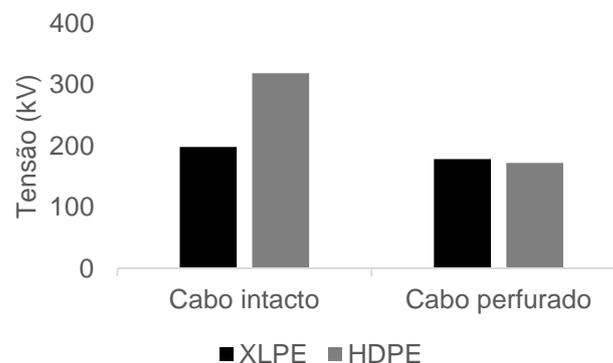


Figura 5.13 – Valores mínimos da tensão disruptiva de polaridade negativa obtidas nos ensaios com cabos intactos e perfurados.

5.2.2.3.2 Relação entre a tensão disruptiva e a distância do furo

Nos ensaios de suportabilidade elétrica da estrutura monofásica, os furos na cobertura dielétrica dos cabos resultantes das descargas disruptivas foram observados ao longo de uma ampla faixa de distância conforme indicam a Figura 5.10 e a Figura 5.11. Além disso, os ensaios com as amostras perfuradas mostraram que os níveis de suportabilidade são influenciados pela localização do dano na cobertura do cabo. A partir desses resultados, buscou-se, então, investigar a relação da distância do furo a partir do isolador com o valor da tensão disruptiva obtida para a situação na qual a cobertura do cabo esteja perfurada. Com objetivo de sistematizar essa análise um novo conjunto de ensaios foi realizado. Conforme indica a Figura 5.14, posicionou-se um cabo com a cobertura de XLPE previamente perfurada na estrutura monofásica CM2 e aplicou-se o mesmo procedimento do ensaio do tipo B, descrito no Capítulo 4.

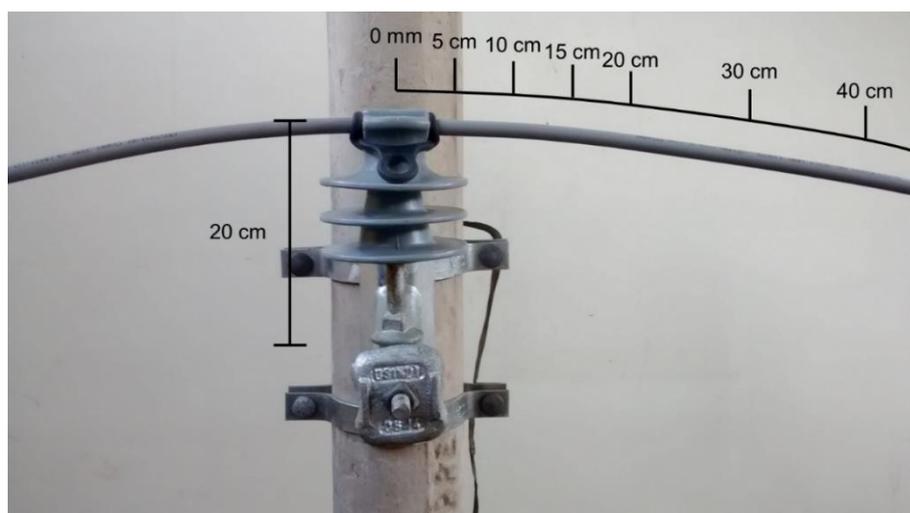
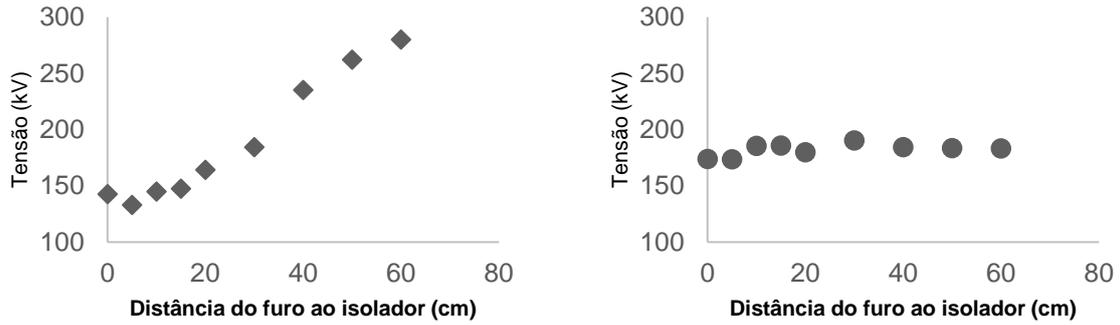


Figura 5.14 – Posicionamento do cabo para ensaios com amostras com cobertura perfurada.

Inicialmente, o cabo foi posicionado de tal forma que o furo estivesse localizado logo acima do isolador. Após a determinação da tensão disruptiva para esta condição, repetiu-se o procedimento de ensaio para a condição na qual a distância entre o furo e o isolador fosse de 5 cm, conforme indicado na Figura 5.14. Este processo foi repetido sucessivamente para posições entre 0 e 60 cm, totalizando as 8 condições de distanciamento ilustradas na Figura 5.14. Para todas essas condições, o cabo foi submetido a tensões impulsivas de ambas as polaridades. A partir dos resultados obtidos, buscou-se estabelecer uma relação entre o valor da tensão disruptiva e a localização do furo na cobertura do cabo. A Figura 5.15 apresenta esses resultados.



(a) Polaridade positiva

(b) Polaridade negativa

Figura 5.15 – Relação entre a tensão disruptiva e a distância do furo ao isolador para os ensaios com cabos previamente perfurados.

De posse desses dados, fez-se uma tentativa de descrever os resultados por meio de uma equação relacionando o valor da tensão disruptiva com a distância entre o furo e o isolador, mesmo considerando o pequeno número de amostras. Tendo em vista a simplicidade de uso, optou-se pela adoção do modelo de regressão⁹ por ajuste linear dado por:

$$u(x) = b_1x + b_0 \tag{5.1}$$

Na determinação dos parâmetros b_1 e b_0 realizou-se o ajuste linear por mínimos quadrados (CAMPOS FILHO, 2007), (GOMES et al., 2015). Nesse ajuste, tais parâmetros são dados por:

$$b_1 = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \tag{5.2}$$

$$b_0 = \frac{\sum y_i - b_1 \sum x_i}{n} \tag{5.3}$$

Onde y_i é o i -ésimo valor da tensão disruptiva correspondente à distância x_i e n é o número de pontos. A qualidade do ajuste obtido pela regressão linear pode ser aferida por dois parâmetros: o coeficiente de determinação r^2 e a variância residual σ^2 . O coeficiente de determinação pode ser visto como a proporção da variação total dos dados em torno da média \bar{y} . Ele é dado por:

⁹ A regressão é utilizada quando se deseja estimar um parâmetro de um modelo semideterminístico e/ou prever um valor dado por esse modelo.

$$r^2 = 1 - \frac{D(b_0, b_1)}{\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2} \quad (5.4)$$

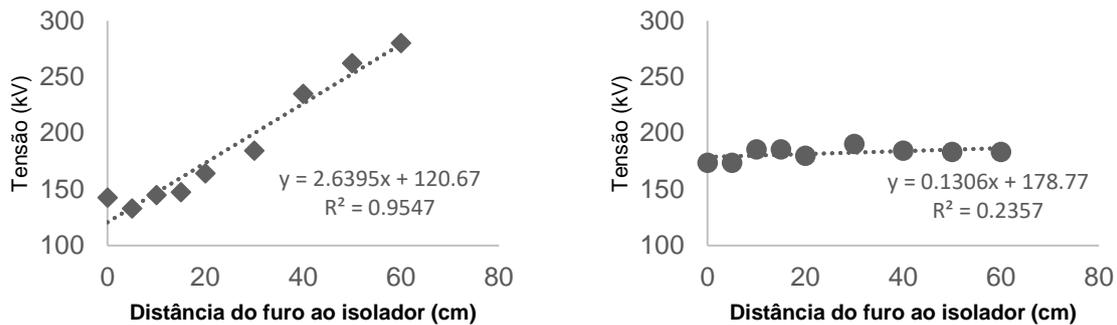
Onde:

$$D(b_0, b_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - u_i)^2 \quad (5.5)$$

Já a variância residual é definida por:

$$\sigma^2 = \frac{D(b_0, b_1)}{n - p} \quad (5.6)$$

Onde $D(b_0, b_1)$ é dado por (5.5), n é o número de pontos e p é o número de parâmetros estimados. No caso da regressão linear simples, tem-se que $p = 2$. As curvas obtidas com a aplicação desse modelo são apresentadas na Figura 5.16.



(a) Polaridade positiva

(b) Polaridade negativa

Figura 5.16 – Tensão disruptiva em função da localização do furo: ajuste linear.

As equações que melhor se ajustam aos pontos provenientes dos ensaios com tensões impulsivas positivas e negativas são dadas por (5.7) e (5.8), respectivamente.

$$V_d^+ = 2,64x + 120,67 \quad (5.7)$$

$$V_d^- = 0,13x + 178,77 \quad (5.8)$$

Ambas as equações de ajuste indicam um crescimento do valor das tensões disruptivas V_d^+ e V_d^- (em kV) com o aumento da distância x do furo ao isolador (em cm). Para a polaridade positiva, esse ajuste apresenta um coeficiente de determinação r^2 igual a 0,95 e um desvio padrão igual a 56 kV. Já a equação de ajuste para a polaridade negativa

(5.8) possui um coeficiente de determinação r^2 igual a 0,24 e desvio padrão igual a 6 kV. Conforme indica a equação (5.4), quanto mais o coeficiente de determinação se aproxima da unidade, melhor é o ajuste. Tendo em vista os valores de r^2 obtidos com a regressão linear, percebe-se que a qualidade do ajuste não foi satisfatória para os dados oriundos dos ensaios com tensões impulsivas de polaridade negativa.

A despeito da tentativa de estabelecimento de uma equação que descreva matematicamente o comportamento da localização dos furos em relação aos níveis de tensão disruptiva, vale a pena destacar alguns aspectos de interesse, sobretudo em relação às tendências observadas. Nos ensaios com tensões impulsivas de polaridade positiva, observou-se que, quanto maior a distância do furo, há um aumento do valor de tensão disruptiva. O valor mínimo da tensão disruptiva ocorreu com o furo na distância 5 cm e foi igual a 133 kV. Esse valor assemelha-se à tensão disruptiva assegurada (U_{90}) da estrutura CM2 com cabo nu (134 kV). Na máxima distância onde o furo foi posicionado (60 cm), o valor da tensão disruptiva foi igual a 280 kV. Um ponto que merece destaque é o valor da tensão disruptiva na distância de 40 cm: 235 kV. Esse valor é superior ao valor da tensão mínima disruptiva para o cabo intacto, conforme mostra a Tabela 5.4. Nesse caso, os cabos com furos localizados em distâncias maiores que 40 cm a partir do isolador estariam sujeitos a sofrer uma nova disrupção plena.

No entanto, os resultados provenientes dos ensaios com tensões impulsivas negativas não apresentam essa tendência de aumento dos valores de tensão disruptiva de forma evidente. De acordo com a Figura 5.16(b), os valores de tensão disruptiva parecem ‘flutuar’ em uma estreita faixa de valores, os quais pouco variam com a distância do furo ao isolador. O valor mínimo de tensão disruptiva foi 173 kV e foi obtido quando o furo estava na distância 5 cm. Já o maior valor de tensão disruptiva registrado para a polaridade negativa foi 190 kV na distância 30 cm. Ou seja, a variação percentual entre os valores mínimo e máximo foi de apenas 10%. Ressalta-se ainda que nas três maiores distâncias onde o furo estava posicionado, as tensões disruptivas ficaram praticamente no mesmo patamar (183–184 kV).

Esse comportamento está associado à localização das cargas depositadas ao longo do cabo durante a aplicação da tensão impulsiva. Conforme (DARVENIZA, 2000) e (GOMES, 2015), cargas de polaridade negativa (decorrentes da aplicação de tensões

positivas) se acumulam de forma mais intensa nas proximidades do isolador por apresentarem grande mobilidade. Dessa forma, o campo elétrico resultante da aplicação da tensão impulsiva será fortemente atenuado nessa região. Assim, na medida em que a distância do furo aumenta, o nível da tensão aplicada para que o campo elétrico resultante seja capaz de provocar uma descarga disruptiva também aumenta, conforme indica a Figura 5.16(a). Por outro lado, cargas positivas (decorrentes da aplicação de tensões negativas) apresentam menor mobilidade e, por conta disso, não se deslocam da mesma forma que as negativas em direção à região mais próxima ao isolador. Essas cargas se distribuem em uma maior faixa de extensão ao longo do cabo. Como resultado, a atenuação do campo elétrico ocorre de maneira mais uniforme, o que reflete o comportamento observado na Figura 5.16(b).

5.3 Estrutura trifásica CE2

De forma semelhante aos testes de suportabilidade elétrica realizados na estrutura monofásica, o primeiro conjunto de ensaios com a estrutura trifásica foi realizado utilizando cabos nus posicionados nos três isoladores da estrutura CE2 (Figura 4.5). Em seguida, foram realizados ensaios com cabos cobertos com XLPE e HDPE. Os resultados são apresentados nas seções a seguir.

5.3.1 Cabos nus

Os ensaios para determinação dos valores das tensões suportáveis U_{10} , U_{50} e U_{90} da estrutura trifásica CE2 foram realizados de acordo com o procedimento previsto na norma NBR IEC 60060-1 (ABNT, 2013). A Tabela 5.8 indica as condições ambientais aferidas durante a realização dos ensaios. Os resultados dos ensaios com tensões positivas e negativas são apresentados na Tabela 5.9 e na Tabela 5.10, respectivamente. Todos os valores foram corrigidos para as condições ambientais de referência.

Tabela 5.8 – Condições atmosféricas no momento de realização do ensaio de acréscimo e decréscimo para a determinação de U_{50} da estrutura monofásica CE2 (polaridades positiva e negativa).

Temperatura	$t = 24,5 \text{ °C}$
Pressão barométrica	$p_0 = 699 \text{ mmHg}$
Umidade absoluta	$h_0 = 8,36 \text{ g/m}^3$

Tabela 5.9 – Valores absolutos das tensões suportáveis de polaridade positiva para a estrutura trifásica CE2 com cabo nu.

Isolador	Tensões suportáveis (kV)		
	U_{10}	U_{50}	U_{90}
A	104	107	109
B	105	108	111
C	105	109	112

Para a determinação das tensões suportáveis de polaridade positiva, foram aplicadas 21, 20 e 26 tensões impulsivas aos isoladores das posições A, B e C, respectivamente. A tensão inicial foi de 98 kV e adotou-se um passo de 2 kV. Os resultados indicam uma proximidade dos valores, especialmente se o desvio-padrão for levado em consideração. Para os isoladores A, B e C, os desvios-padrão são iguais a 1,9%, 1,9% e 2,2%, respectivamente. Dessa forma, não é possível definir com clareza a posição mais crítica do ponto de vista da suportabilidade elétrica da estrutura CE2 com cabos nus para tensões impulsivas de polaridade positiva.

Tabela 5.10 – Valores absolutos das tensões suportáveis de polaridade negativa para a estrutura trifásica CE2 com cabo nu.

Isolador	Tensões suportáveis (kV)		
	U_{10}	U_{50}	U_{90}
A	165	171	177
B	158	164	170
C	121	125	130

Por outro lado, os ensaios com polaridade negativa indicaram que o isolador C corresponde à posição mais crítica por apresentar os menores valores absolutos de tensão suportável. Em relação ao valor da tensão crítica disruptiva (U_{50}), a posição C apresenta um valor de U_{50} cerca de 27% e 24% menor que os valores para os isoladores nas posições A e B, respectivamente. Para os isoladores A, B e C, os desvios-padrão dos ensaios com tensões negativas são iguais a 2,7%, 2,8% e 2,7%, respectivamente. Além disso, os valores absolutos das tensões suportáveis para impulsos negativos foram superiores aos valores registrados para tensões impulsivas positivas.

5.3.2 Ensaio com cabos cobertos

Os ensaios considerando cabos cobertos posicionados nos isoladores da estrutura trifásica CE2 constituíram-se um desafio para a sua realização. Como os níveis de suportabilidade são maiores que aqueles obtidos para a estrutura monofásica CM2, houve um número significativo de ocorrência de descargas superficiais, indesejáveis para o resultado final dos experimentos. Contudo, com um maior comprimento das amostras de cabo utilizadas (10 m) foi possível realizar os testes e alcançar os resultados de interesse. Esses resultados são apresentados a seguir.

5.3.2.1 Cabos XLPE

Em virtude da elevada ocorrência de descargas superficiais, nenhum registro de descargas disruptivas parciais foi feito para ensaios com a estrutura trifásica. Com relação à ocorrência de descargas disruptivas plenas, os resultados são apresentados em termos dos valores de pico das tensões impulsivas que causaram disrupções no arranjo isolante. Os valores médios para os ensaios realizados com o cabo XLPE são apresentados na Tabela 5.11. Foram utilizadas cinco amostras para o cálculo das tensões médias e mínimas.

Tabela 5.11 – Tensões médias disruptivas associadas com a estrutura CE2 com cabos XLPE.

Polaridade	Tensão média disruptiva (kV)		
	<i>Isolador A</i>	<i>Isolador B</i>	<i>Isolador C</i>
Positiva	329	278	283
Negativa	278	289	300

Para a polaridade positiva, a tensão média disruptiva do isolador B foi menor que os valores alcançados pelas demais posições. A diferença para os isoladores A e C foi igual a 16% e 2%, respectivamente. Em relação à polaridade negativa, a posição que apresentou o pior desempenho foi o isolador A. O valor médio da tensão disruptiva para essa posição foi aproximadamente 4% menor que o valor para a posição B e cerca de 7% menor que o valor para a posição C.

As menores amplitudes de tensão impulsiva que provocaram disrupção nos ensaios com a estrutura trifásica considerando cabos XLPE são apresentadas na Tabela

5.12. Esses resultados indicam que a posição mais crítica considerando a tensão mínima disruptiva foi o isolador B para ambas as polaridades.

Tabela 5.12 – Tensões mínimas disruptivas associadas com a estrutura CE2 com cabos XLPE.

Polaridade	Tensão mínima disruptiva (kV)		
	<i>Isolador A</i>	<i>Isolador B</i>	<i>Isolador C</i>
Positiva	305	222	271
Negativa	245	227	268

5.3.2.2 Cabos HDPE

Por apresentar dupla camada dielétrica, espera-se que os valores médios de tensão disruptiva da estrutura trifásica CE2 com cabo HDPE sejam superiores aos valores obtidos nos ensaios com cabos XLPE. Conforme indicam os resultados da Tabela 5.11, as posições mais críticas na estrutura trifásica com esse tipo de cabo correspondem aos isoladores B (para a polaridade positiva) e A (para a polaridade negativa), considerando os valores médios da tensão disruptiva. Essa constatação foi importante para o planejamento e execução dos ensaios seguintes.

Por conta das dificuldades intrínsecas à realização de ensaios com tensões muito elevadas, optou-se por não realizar testes com cabos HDPE posicionados no isolador C. Dentre essas dificuldades citam-se (i) as dimensões do laboratório, que não permitiriam o posicionamento adequado do arranjo experimental respeitando-se as distâncias de segurança e (ii) a redução de rendimento do gerador quando as tensões disruptivas elevam-se muito. Nesse sentido, poderia haver uma alteração no comportamento do arranjo isolante uma vez que o valor da tensão aplicada ao corpo de teste deve ser muito maior que aquele normalmente empregado caso o rendimento fosse próximo da unidade, como nos testes anteriores.

Dessa forma, os ensaios com cabos HDPE posicionados na estrutura trifásica CE2 foram executados apenas nos isoladores A e B, os quais corresponderam às posições críticas de suportabilidade elétrica nos testes anteriores (com cabos XLPE). Os valores da tensão média disruptiva para esses ensaios são indicados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Tensões médias disruptivas associadas com a estrutura CE2 com cabos HDPE.

Polaridade	Tensão média disruptiva (kV)	
	<i>Isolador A</i>	<i>Isolador B</i>
Positiva	492	395
Negativa	376	317

Os resultados obtidos indicam que a posição crítica da estrutura trifásica CE2 com cabos HDPE corresponde ao isolador B. Os valores médios absolutos da tensão disruptiva para essa posição foram em média 20% e 16% menores que os valores da posição A para as polaridades positiva e negativa, respectivamente. O mesmo comportamento é observado quando são consideradas as tensões mínimas disruptivas (Tabela 5.14).

Dessa forma, a posição B correspondeu ao caso mais crítico nos ensaios com cabos cobertos, com exceção do ensaio com tensões impulsivas de polaridade negativa aplicadas aos cabos XLPE. Esse comportamento pode ser explicado pela menor distância de arco entre o cabo e a estrutura aterrada nessa posição, conforme indica a Figura 4.5.

Tabela 5.14 – Tensões mínimas disruptivas associadas com a estrutura CE2 com cabos HDPE.

Polaridade	Tensão média disruptiva (kV)	
	<i>Isolador A</i>	<i>Isolador B</i>
Positiva	437	354
Negativa	364	268

Com relação ao material empregado na cobertura dos condutores, a performance dos cabos HDPE nos ensaios de suportabilidade elétrica da estrutura trifásica CE2 mostrou-se superior àquela dos cabos XLPE, conforme indica a Figura 5.17. Com as amostras posicionadas no isolador A, os valores absolutos médios da tensão disruptiva do cabo HDPE foram 50% e 35% maiores que os valores correspondentes ao cabo XLPE para as polaridades positiva e negativa, respectivamente. Para a posição B, as tensões disruptivas dos cabos HDPE foram 42% e 10% maiores que os valores alcançados pelos cabos XLPE quando submetidos a tensões impulsivas de polaridade positiva e negativa, respectivamente.

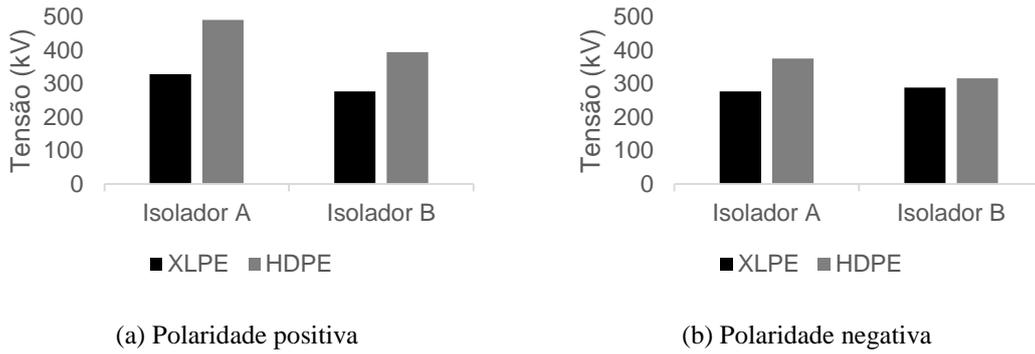


Figura 5.17 – Valores médios das tensões disruptivas associadas à estrutura CE2: cabos XLPE e HDPE.

Com relação à dispersão dos furos ao longo da cobertura dos cabos, o mesmo padrão observado nos ensaios com a estrutura monofásica CM2 se repete nos ensaios com a estrutura trifásica CE2. Os furos decorrentes das disrupções na cobertura HDPE espalham-se em uma faixa de ocorrência mais ampla que aquela resultante dos ensaios com cabos XLPE.

A título de ilustração, a Figura 5.18 mostra a relação entre as tensões disruptivas e a localização dos furos para os ensaios com os cabos posicionados no isolador A. Quando submetidos a tensões impulsivas positivas, a cobertura XLPE apresentou perfurações bem próximas ao isolador, principalmente em distâncias inferiores a 12 cm. Somente uma disrupção foi observada além dessa faixa, na distância 58 cm. Já os ensaios com cabos HDPE apresentaram descargas disruptivas plenas na faixa de distância entre 1 e 344 cm a partir do isolador. Testes com tensões impulsivas de polaridade negativa levaram à formação de perfurações na cobertura dielétrica nas faixas 28–171 cm e 0–159 cm nos cabos XLPE e HDPE, respectivamente.

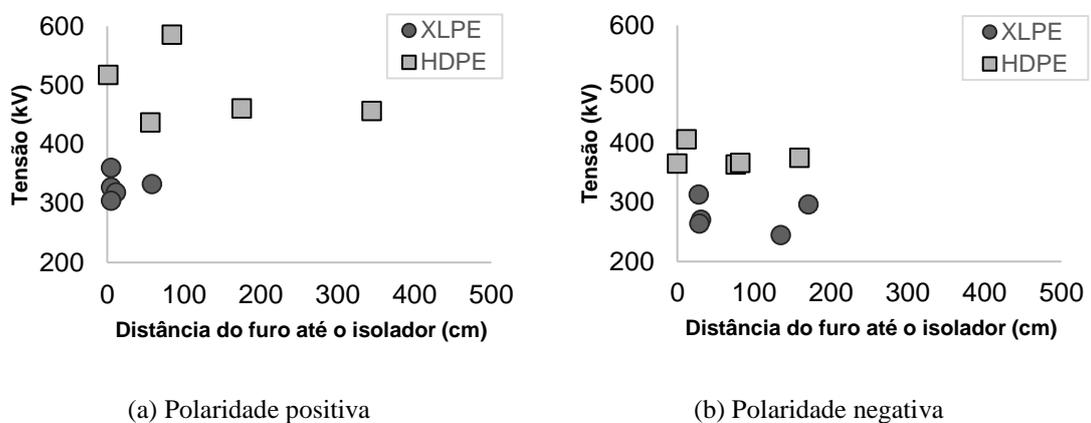


Figura 5.18 – Localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos posicionados no isolador A da estrutura trifásica CE2.

A relação ‘tensão disruptiva *versus* localização dos furos’ nas amostras de cabo posicionadas no isolador B é apresentada na Figura 5.19. Para tensões impulsivas positivas, as descargas disruptivas plenas causaram danos entre 6 cm e 150 cm nos cabos XLPE e entre 9 cm e 290 cm nos cabos HDPE. Já as amostras submetidas a tensões impulsivas negativas apresentaram perfurações nas faixas 0–136 cm para a cobertura XLPE e 53–422 cm para a cobertura HDPE.

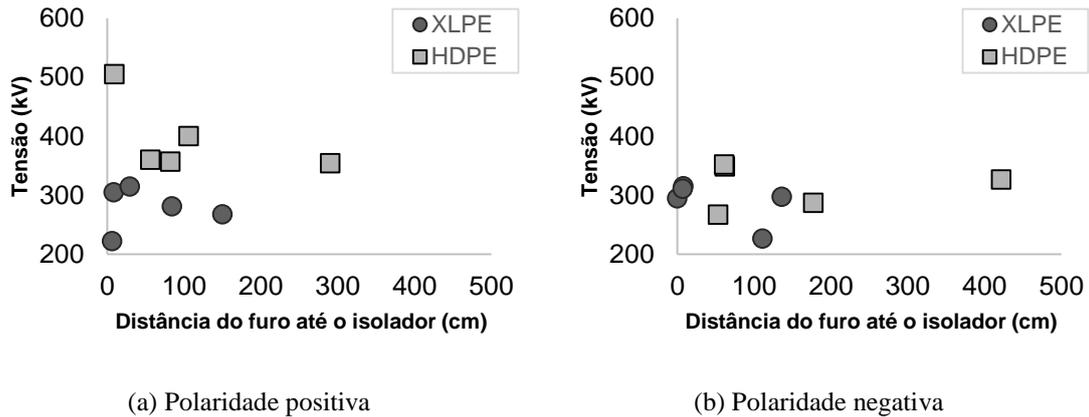


Figura 5.19 – Localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos posicionados no isolador B da estrutura trifásica CE2.

Finalmente, a Figura 5.20 apresenta os valores da tensão disruptiva em função da localização para os ensaios realizados com os cabos XLPE posicionados no isolador C. Para tensões impulsivas positivas, os furos se distribuíram ao longo da faixa 21–152 cm. Já as perfurações resultantes da aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa se concentraram principalmente na faixa 4–13 cm e apenas uma descarga disruptiva plena foi observada na distância de 126 cm a partir do isolador.

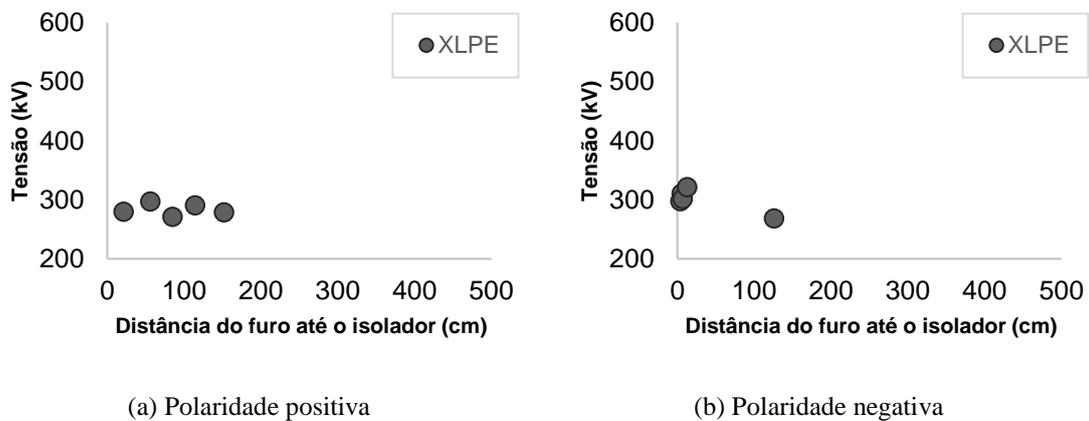


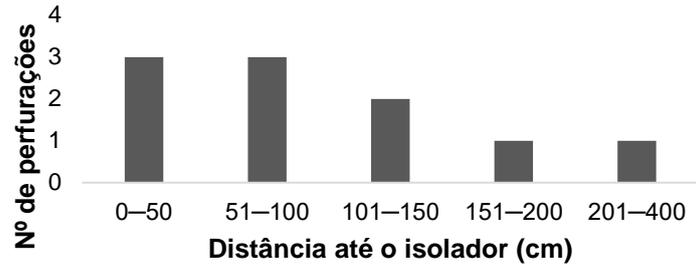
Figura 5.20 – Localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos posicionados no isolador C da estrutura trifásica CE2.

5.4 Comentário final

Embora as estruturas monofásicas e trifásicas apresentem diferenças, especialmente com relação às distâncias de arco, é oportuno estabelecer uma comparação entre os níveis mínimos de suportabilidade elétrica obtidos nos ensaios realizados. Para o cabo XLPE submetido a tensões impulsivas de polaridade positiva, o nível mínimo de suportabilidade elétrica do isolador B na estrutura trifásica (222 kV) assemelhou-se àquele obtido nos ensaios com a estrutura monofásica (220 kV). Frente a tensões impulsivas negativas, o valor mínimo da tensão disruptiva deste mesmo isolador na estrutura CE2 (227 kV) foi cerca de 15% superior ao valor registrado para a estrutura CM2 (198 kV).

No entanto, esse comportamento não foi observado nos ensaios com cabos HDPE. Comparando o valor mínimo de tensão que levou à disrupção de uma amostra desse tipo de cabo na estrutura trifásica (isolador B) com aquele registrado para a estrutura monofásica, percebe-se que, para a polaridade positiva, o nível mínimo de suportabilidade da estrutura CE2 (354 kV) foi 4% menor que o valor obtido nos ensaios com a estrutura CM2 (370 kV). Nos ensaios com tensões impulsivas de polaridade negativa, o valor mínimo da tensão disruptiva da estrutura CE2 (268 kV) foi 16% menor que o valor correspondente da estrutura CM2 (318 kV).

A Figura 5.21 apresenta o histograma correspondente à distribuição das perfurações observadas ao longo da cobertura de todas as amostras utilizadas nos ensaios com a estrutura monofásica CM2 (cabos XLPE e HDPE). Para a polaridade positiva, 60% das perfurações foram observadas nas distâncias 0–50 cm e 51–100 cm, com três ocorrências em cada faixa. Já para a polaridade negativa, as faixas de distâncias que apresentaram o maior número de perfurações foram 0–50 cm e 101–150 cm. Em cada uma dessas faixas foram registradas 30% do total de ocorrências.



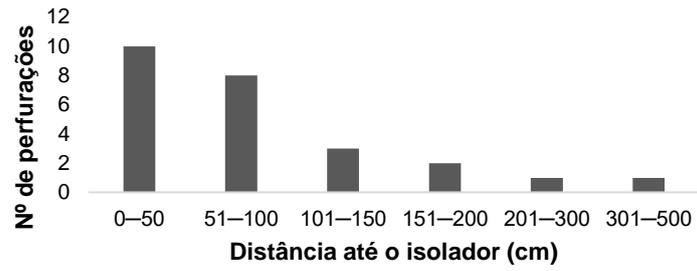
(a) Polaridade positiva



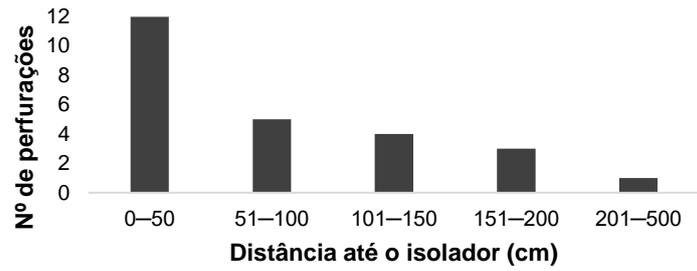
(b) Polaridade negativa

Figura 5.21 – Distribuição dos furos ao longo da cobertura dos cabos considerando todos os ensaios na estrutura monofásica CM2.

A Figura 5.22 mostra o histograma de ocorrências das perfurações observadas nos ensaios com a estrutura trifásica CE2. De forma geral, observou-se que a região mais propensa à formação de furos na camada isolante dos cabos é aquela mais próxima ao isolador. Para a polaridade positiva, 72% das descargas disruptivas plenas foram estabelecidas a uma distância menor que um metro do isolador, sendo que a faixa até 50 cm é responsável por 40% de todas as ocorrências. Já a frequência de perfurações observadas na faixa 0–50 cm nos ensaios com tensões impulsivas negativas alcança a marca de 48% do total.



(a) Polaridade positiva



(b) Polaridade negativa

Figura 5.22 – Distribuição dos furos ao longo da cobertura dos cabos considerando todos os ensaios na estrutura trifásica CE2.

6 Aspectos de interesse para a modelagem dos efeitos associados à falha de isolamento dos cabos cobertos

6.1 Considerações iniciais

O Capítulo 5 apresenta os resultados dos ensaios realizados nas estruturas monofásica CM2 e trifásica CE2 com cabos nus e cobertos em termos dos valores de tensão que provocaram descargas disruptivas. Apesar da reduzida quantidade de dados, esses resultados dão importantes subsídios para o conhecimento do comportamento dos cabos cobertos e indicam os níveis de suportabilidade das estruturas frente a tensões impulsivas. No entanto, para a compreensão dos efeitos associados à falha de isolamento dos cabos cobertos, alguns fatores de destacada importância devem ser considerados. Este capítulo dedica-se à abordagem de três deles: (i) a influência da presença de cargas estáticas ao longo da cobertura dos cabos nos valores da tensão disruptiva; (ii) o impacto do número de amostras considerado nas análises estatísticas e (iii) o efeito do tempo de serviço dos cabos nos valores de suportabilidade frente a tensões impulsivas padronizadas.

Para isso, foram considerados apenas os resultados obtidos nos ensaios com a estrutura monofásica CM2. Como este capítulo é dedicado à abordagem dos efeitos de diferentes parâmetros na suportabilidade elétrica do arranjo isolante, a consideração apenas dos resultados da estrutura mais simples possibilita um maior controle das variáveis envolvidas, sendo, portanto, suficiente para as análises.

6.2 Efeito das cargas superficiais

Todos os resultados apresentados neste texto até este ponto foram obtidos a partir de ensaios que consideraram a remoção das cargas estáticas da cobertura dielétrica dos cabos. Com isso, buscou-se garantir a independência estatística entre cada aplicação de tensão impulsiva nas amostras testadas. No entanto, tal cenário pode não refletir situações de campo, nas quais a rede pode ser submetida a diversas solicitações em sequência – em caso de tempestades com intensa atividade elétrica nas proximidades da linha, por exemplo. Nesse caso, as cargas presentes na cobertura dos cabos poderiam influenciar os níveis de suportabilidade elétrica das estruturas. Dessa forma, foi realizado um novo conjunto de ensaios com o intuito de se avaliar a influência da presença de cargas estáticas ao longo da cobertura do cabo no valor das tensões disruptivas.

Os ensaios sem remoção de cargas foram realizados de modo muito semelhante aos ensaios descritos anteriormente nos Capítulos 4 e 5. A metodologia dos ensaios consistiu na aplicação de cinco tensões impulsivas por nível de tensão em amostras de cabo XLPE posicionadas na estrutura monofásica CM2. O nível inicial foi de 200 kV e o passo de tensão adotado foi de 10 kV. Neste ensaio, no entanto, não foi realizada a limpeza das cargas estáticas presentes na superfície no cabo em nenhum momento até a ruptura.

6.2.1 Tensões impulsivas de polaridade positiva

Nos ensaios com tensões impulsivas positivas foram utilizadas cinco amostras de cabo coberto com comprimento igual a 5 m. A Figura 6.1 apresenta os resultados dos ensaios realizados com e sem remoção de cargas. Os dados dos ensaios com remoção de cargas são os mesmos utilizados nas análises anteriores.

O ensaio sem remoção de cargas apresentou algumas particularidades que merecem ser destacadas. Em comparação com os resultados oriundos dos ensaios com remoção de cargas, no cabo carregado foram observadas perfurações localizadas mais próximas ao isolador. Para a polaridade positiva, duas amostras apresentaram furos em uma distância inferior a 4 cm. Além disso, a máxima distância onde ocorreu uma perfuração foi 87 cm. Para os ensaios com remoção de cargas, os furos foram observados entre 37 cm e 156 cm.

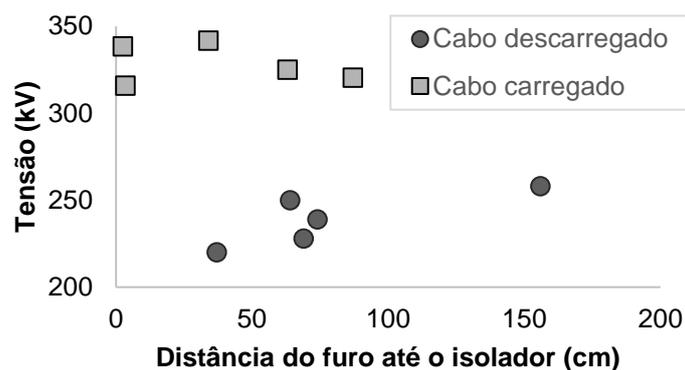


Figura 6.1 – Relação entre a tensão disruptiva e a localização dos furos ao longo da cobertura de cabos com e sem cargas estáticas para ensaios com polaridade positiva.

A Tabela 6.1 apresenta os valores médios da tensão disruptiva para ensaios com cabos intactos e perfurados nos casos em que a cobertura estava carregada e descarregada. Nos ensaios com o cabo intacto, a presença de cargas na cobertura elevou a tensão média disruptiva em 37%. Conforme discutido em (DARVENIZA, 2000), a carga estática sobre a camada XLPE do cabo é fonte de um campo elétrico que se opõe ao campo elétrico resultante da tensão aplicada ao condutor. Portanto, quando a remoção de cargas não é feita, esse campo de oposição é intensificado por conta do volume maior de cargas acumuladas ao longo de todo o ensaio. O efeito desse acúmulo é elevar o valor médio da tensão disruptiva.

Tabela 6.1 – Valores médios absolutos da tensão disruptiva para cabos com cobertura XLPE carregada e descarregada para ensaios com polaridade positiva.

Cobertura XLPE	Tensão disruptiva (kV)	
	<i>Cabo intacto</i>	<i>Cabo perfurado</i>
Descarregada	239	245
Carregada	328	221
Variação percentual	37%	-10%

Conforme indica a Figura 6.1, dois pontos referentes aos ensaios sem remoção de cargas correspondem à ocorrência de disrupções com perfuração da camada de XLPE do cabo a menos de 4 cm de distância a partir do isolador. Nos ensaios realizados com os cabos previamente perfurados e, de igual modo, sem remoção de cargas, essas duas amostras apresentaram valores de tensão disruptiva bem inferiores às demais. Além disso, a amostra com furo mais distante teve um comportamento diferente das demais. Especificamente nesse ensaio, o arco elétrico não foi estabelecido no mesmo ponto onde estava localizado o furo proveniente do ensaio anterior (87 cm). Um novo furo foi observado a uma distância de 53 cm do isolador no lado oposto ao furo original. Por conta desses fatores, ao contrário do que se esperava, o valor médio da tensão disruptiva do ensaio com cabos perfurados e cobertura carregada foi cerca de 10% menor que o valor correspondente ao ensaio com a cobertura descarregada.

A Tabela 6.2 mostra os valores mínimos da tensão disruptiva dos cabos XLPE obtidos nos ensaios com e sem remoção de cargas considerando a polaridade positiva. Com a cobertura intacta e carregada, o nível mínimo de suportabilidade elevou-se em 44% em comparação com o valor obtido no ensaio com remoção de cargas. Considerando os ensaios realizados com as amostras perfuradas, observou-se uma redução do nível mínimo de suportabilidade na condição de cobertura carregada. Nesse caso, o valor mínimo da tensão disruptiva foi 40% menor que aquele correspondente à cobertura descarregada. Essa forte redução é creditada à amostra cujo furo foi localizado à distância de 2,5 cm do isolador. Contudo, mesmo desconsiderando as duas amostras com furo muito próximo ao isolador (Figura 6.1), o valor mínimo da tensão disruptiva obtido nos ensaios sem remoção de cargas (204 kV) foi 7% menor que aquele registrado nos ensaios com a cobertura descarregada.

Tabela 6.2 – Valores mínimos absolutos da tensão disruptiva para cabos com cobertura XLPE carregada e descarregada para ensaios com polaridade positiva.

Cobertura XLPE	Tensão disruptiva (kV)	
	<i>Cabo intacto</i>	<i>Cabo perfurado</i>
Descarregada	220	220
Carregada	316	132
Varição percentual	44%	-40%

6.2.2 Tensões impulsivas de polaridade negativa

O ensaio com polaridade negativa e sem remoção de cargas apresentou o recorrente problema da ocorrência de descargas superficiais ao longo do cabo. Essa dificuldade impossibilitou a realização do ensaio em uma das cinco amostras disponíveis para os testes, mesmo adotando um comprimento de 10 m para os cabos testados. Os resultados desse conjunto de ensaios bem como dos ensaios com remoção de cargas podem ser vistos na Figura 6.2.

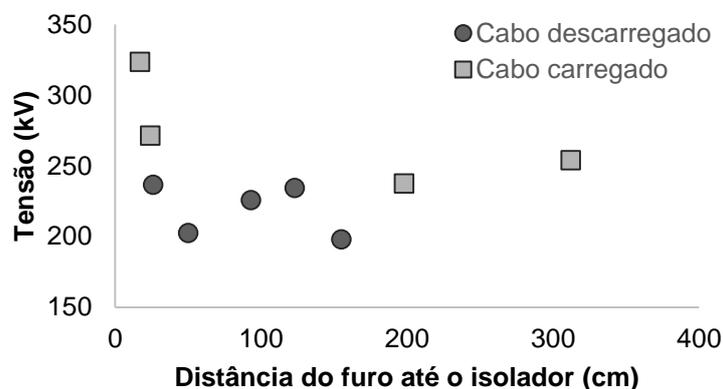


Figura 6.2 – Relação entre a tensão disruptiva e a localização dos furos ao longo da cobertura de cabos com e sem cargas estáticas para ensaios com polaridade negativa.

Para a polaridade negativa, as amostras sofreram perfurações ao longo de maiores distâncias medidas a partir do isolador nos ensaios sem remoção de cargas. A faixa de ocorrência indica furos entre 17 cm e 312 cm. Já no ensaio com remoção de cargas, os furos foram observados até a distância máxima de 155 cm do isolador.

A Tabela 6.3 mostra os valores médios absolutos da tensão disruptiva para cabos cobertos intactos e perfurados considerando ensaios com tensões impulsivas negativas nas condições com e sem remoção de cargas da cobertura XLPE. Com o cabo intacto, a presença das cargas superficiais elevou o valor médio da tensão disruptiva em 24%. Já para o cabo perfurado, a diferença observada não foi significativa. Para esse caso, o valor médio da tensão disruptiva com a cobertura carregada foi apenas 2% superior ao valor correspondente para ensaios com a cobertura sem cargas superficiais.

Tabela 6.3 – Valores médios absolutos da tensão disruptiva para cabos com cobertura XLPE carregada e descarregada para ensaios com polaridade negativa.

Cobertura XLPE	Tensão disruptiva (kV)	
	<i>Cabo intacto</i>	<i>Cabo perfurado</i>
Descarregada	219	186
Carregada	272	189
Varição percentual	24%	2%

Os resultados considerando os valores mínimos absolutos da tensão disruptiva associados aos ensaios com e sem remoção de cargas são apresentados na Tabela 6.4. A presença de cargas estáticas na superfície do cabo foi responsável por elevar o nível mínimo de suportabilidade das amostras intactas em 28%. Já para as amostras perfuradas, o aumento não foi tão significativo: apenas 3%.

Tabela 6.4 – Valores mínimos absolutos da tensão disruptiva para cabos com cobertura XLPE carregada e descarregada para ensaios com polaridade negativa.

Cobertura XLPE	Tensão disruptiva (kV)	
	<i>Cabo intacto</i>	<i>Cabo perfurado</i>
Descarregada	198	178
Carregada	254	184
Varição percentual	28%	3%

6.2.3 Comentário final

Com base nos resultados apresentados tanto para a polaridade positiva quanto para a polaridade negativa, percebe-se uma tendência de aumento de suportabilidade elétrica frente a tensões impulsivas quando a cobertura XLPE do cabo intacto possui cargas superficiais. Já o comportamento das amostras perfuradas mostrou-se fortemente dependente da distância dos furos em relação ao isolador. No caso dos ensaios com tensões impulsivas positivas, duas amostras apresentaram perfurações bem próximas ao isolador, as quais foram responsáveis por reduzir o valor médio da tensão disruptiva em comparação com o valor obtido nos ensaios com remoção de cargas. Já a suportabilidade dos cabos perfurados frente a tensões impulsivas negativas na situação onde a cobertura XLPE apresentava cargas superficiais foi muito semelhante àquela onde a cobertura estava descarregada.

Comparando os valores da tensão suportável U_{10} associados aos ensaios com cabos nus com os valores mínimos da tensão disruptiva obtidos nos ensaios com e sem remoção de cargas e com as amostras perfuradas, percebe-se que houve um aumento da suportabilidade elétrica da estrutura quando da utilização de cabos cobertos, mesmo estes tendo sua cobertura perfurada. Os aumentos percentuais dos valores mínimos das tensões disruptivas positivas são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Valores mínimos absolutos da tensão disruptiva positiva para cabos nus e cobertos com a camada XLPE perfurada para ensaios com e sem remoção de cargas.

Cobertura XLPE	Tensão disruptiva (kV)		Variação percentual
	<i>Cabo nu (U_{10})</i>	<i>Cabo perfurado</i>	
Descarregada	126	220	75%
Carregada		132	5%

Quando submetidos a tensões impulsivas de polaridade positiva, o valor mínimo da tensão disruptiva do cabo perfurado com a cobertura descarregada é cerca de 75% maior que o valor de U_{10} referente ao cabo nu. Vale destacar que o furo correspondente a esse valor de tensão estava localizado a uma distância de 37 cm em relação ao isolador. Por outro lado, o aumento do valor mínimo da tensão disruptiva com o cabo perfurado tendo sua cobertura carregada foi de 5% em relação ao valor de U_{10} . Nesse caso, o furo estava situado a apenas 2,5 cm de distância do isolador.

A Figura 6.3 mostra a relação entre a tensão disruptiva e a distância do furo ao isolador para ensaios realizados de forma sistematizada com o furo posicionado nas mesmas distâncias indicadas na Figura 5.14. De modo semelhante à análise realizada em 5.2.2.3.2, o valor da tensão disruptiva de polaridade positiva eleva-se na medida em que a distância do furo em relação ao isolador aumenta, indicando que quanto mais distante o furo, maior a suportabilidade do arranjo frente a tensões impulsivas. Contudo, a presença de cargas estáticas sobre a cobertura dielétrica aparentemente não contribui para um significativo aumento do valor da tensão disruptiva quando o cabo está perfurado. Apenas para a maior distância avaliada (60 cm) registrou-se uma nítida diferença entre os valores da tensão disruptiva. Com o furo posicionado nesse ponto, o cabo carregado apresentou uma suportabilidade 7% maior que o cabo descarregado. Em todas as demais posições, a diferença observada foi inferior a esse percentual. Dessa forma, a localização dos furos

destaca-se como um fator mais determinante para a suportabilidade do cabo frente a tensões impulsivas positivas do que a presença de cargas superficiais na cobertura do cabo, quando este já se encontra perfurado.

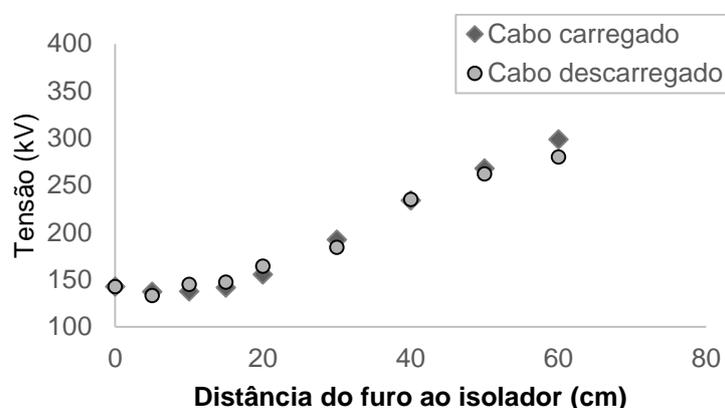


Figura 6.3 – Relação entre a tensão disruptiva e a distância do furo ao isolador para os ensaios com cabos previamente perfurados: ensaios com e sem remoção de cargas (polaridade positiva).

A Tabela 6.6 apresenta a comparação dos valores mínimos da tensão disruptiva negativa para cabos nus e cabos cobertos tendo a camada XLPE perfurada. Com a amostra descarregada, o menor valor da tensão disruptiva está associado a um furo distante 155 cm do isolador. Esse valor de tensão é 18% superior ao valor de U_{10} para o cabo nu. Já com a amostra carregada, o valor mínimo da tensão disruptiva é 22% superior ao valor de U_{10} . Nesse caso, a amostra utilizada apresentava um furo a 17 cm do isolador. Apesar da grande diferença observada entre as distâncias onde ocorreram os menores valores da tensão disruptiva, as variações percentuais foram semelhantes. Além disso, conforme indica a Tabela 6.4, a presença de cargas também pouco influencia nos níveis mínimos de suportabilidade do cabo com a cobertura de XLPE perfurada frente a tensões impulsivas de polaridade negativa.

Tabela 6.6 – Valores mínimos absolutos da tensão disruptiva negativa para cabos nus e cobertos com a camada XLPE perfurada para ensaios com e sem remoção de cargas.

Cobertura XLPE	Tensão disruptiva (kV)		Variação percentual
	Cabo nu (U_{10})	Cabo perfurado	
Descarregada	151	178	18%
Carregada		184	22%

Os resultados dos ensaios realizados de forma sistemática com as amostras perfuradas submetidas a tensões impulsivas negativas nas condições de cobertura XLPE (i) carregada e (ii) descarregada são apresentados na Figura 6.4. Ao contrário do observado nos ensaios com tensões positivas, neste caso a partir da distância de 15 cm é possível constatar que os valores da tensão disruptiva são levemente superiores para o cabo carregado. Nesse ponto, a diferença é igual a 4% e alcança o patamar de 10% quando o furo foi posicionado a 50 cm do isolador. Conforme indicam os resultados da Figura 6.4 e a análise realizada em 5.2.2.3.2, a localização dos furos nos ensaios com tensões negativas aparentemente não atua com o mesmo impacto nos resultados como observado para a aplicação de tensões impulsivas positivas. Contudo, para tensões impulsivas negativas, a presença de cargas na superfície da cobertura perfurada atua de maneira mais relevante no sentido de aumentar a suportabilidade frente a tensões impulsivas.

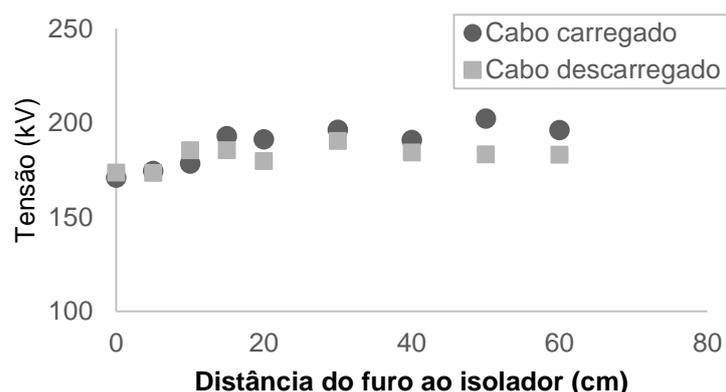


Figura 6.4 – Relação entre a tensão disruptiva e a distância do furo ao isolador para os ensaios com cabos previamente perfurados: ensaios com e sem remoção de cargas (polaridade negativa).

Durante a realização dos ensaios, percebeu-se pelo ruído audível no momento da retirada das cargas depositadas na superfície do cabo uma maior concentração de cargas negativas na região próxima ao isolador (aplicação de impulso positivo). Já as cargas positivas aparentemente estavam mais espalhadas ao longo do cabo quando da aplicação de impulso negativo. Esse padrão de concentração de cargas é condizente com a localização dos furos resultantes das disrupções plenas na cobertura dos cabos. As maiores distâncias onde os furos ocorreram para tensões impulsivas positivas e negativas foram, 87 cm e 320 cm, respectivamente.

Os ensaios sem remoção de cargas não foram realizados utilizando cabos HDPE devido à maior suportabilidade elétrica desse material (Tabela 5.3). Desse modo, os valores das tensões disruptivas das amostras de cabo HDPE com a cobertura carregada seriam ainda superiores, o que poderia colocar em risco a segurança da equipe e a integridade dos equipamentos envolvidos nos testes.

6.3 Efeito da polaridade

Os ensaios com tensões impulsivas de polaridade positiva correspondem a uma condição representativa das tensões induzidas associadas a descargas atmosféricas descendentes negativas em redes de distribuição (SILVEIRA, 2006). Embora esse tipo de solicitação normalmente receba maior atenção em trabalhos que abordam o desempenho de linhas de distribuição, é importante pontuar que a rede também está sujeita a solicitações diversas, dentre as quais surtos de tensão atmosférica com polaridade negativa. Dessa forma, nesta seção, objetiva-se realizar uma análise do efeito da polaridade nos níveis de suportabilidade da estrutura monofásica CM2 com cabos nus e cobertos.

Os valores médios absolutos das tensões disruptivas obtidos com os ensaios realizados na estrutura em questão são apresentados na Tabela 6.7. De acordo com esses resultados, observou-se que, nos ensaios com cabos cobertos, o comportamento do valor médio da tensão disruptiva depende da polaridade da tensão impulsiva aplicada. Considerando condutores nus, a suportabilidade para tensões impulsivas negativas é 20% superior em relação à polaridade positiva. Contudo, para condutores cobertos, a suportabilidade do arranjo frente a tensões impulsivas negativas é menor em comparação com os resultados referentes à polaridade positiva de tensão. Considerando o cabo XLPE, o valor médio da tensão disruptiva negativa é cerca de 8% menor que o valor correspondente para a tensão positiva. Para o cabo HDPE, essa redução é de aproximadamente 18%. Esse comportamento também foi reportado por (NAKAMURA et al., 1986).

Esse mesmo comportamento foi observado considerando os valores mínimos das tensões disruptivas, conforme indica a Tabela 6.8. Para o condutor nu, o valor absoluto de U_{10} associado à polaridade negativa é 20% superior em relação ao valor

correspondente para a tensão positiva. Nos ensaios com cabos cobertos, os valores mínimos das tensões disruptivas para a polaridade negativa foram inferiores em comparação com a polaridade positiva. Para cabos XLPE e HDPE, esses valores foram 10% e 14% menores, respectivamente.

Tabela 6.7 – Valores médios absolutos das tensões disruptivas para o condutor nu e para o condutor coberto com XLPE obtidos nos ensaios com a estrutura monofásica CM2.

Polaridade	Valor de U_{50} – cabos nus (kV)	Tensão disruptiva (kV)	
		Cobertura XLPE	Cobertura HDPE
Positiva	130	239	424
Negativa	156	219	347
Variação percentual	20%	-8%	-18%

Tabela 6.8 – Valores mínimos absolutos das tensões disruptivas para o condutor nu e para o condutor coberto com XLPE obtidos nos ensaios com a estrutura monofásica CM2.

Polaridade	Valor de U_{10} – cabos nus (kV)	Tensão disruptiva (kV)	
		Cobertura XLPE	Cobertura HDPE
Positiva	126	220	370
Negativa	151	198	318
Variação percentual	20%	-10%	-14%

Uma possível explicação para esse efeito pode ser creditada à presença da camada isolante sobre o condutor. Com o dielétrico sólido, o processo disruptivo nas proximidades da interface entre condutor e ar é alterado. Quando uma tensão negativa é aplicada no condutor coberto, cargas de polaridade positiva se distribuem ao longo da superfície do cabo. Esse efeito é semelhante ao que acontece quando é aplicada uma tensão positiva no cabo nu. Nesse caso, tanto o condutor nu quanto o condutor coberto (e com cargas positivas se acumulando em sua superfície) atrairão os elétrons resultantes do processo de ionização do ar que ocorre na região próxima ao cabo e ao pino aterrado do isolador. Devido à sua maior mobilidade, os elétrons são prontamente arrastados em direção ao cabo enquanto os íons positivos permanecem nessa região. Essa carga espacial causa um aumento no campo elétrico ampliando a região de ionização e pode ser capaz de iniciar um *streamer* em direção à estrutura aterrada causando o estabelecimento do arco disruptivo.

Por outro lado, quando uma tensão positiva é aplicada no condutor coberto, cargas de polaridade negativa são distribuídas ao longo da superfície do cabo. Nesse caso, os elétrons são repelidos para longe do condutor coberto e a ionização diminui na região próxima ao cabo e ao pino aterrado do isolador. Para superar esse efeito e provocar disrupção, é requerida, portanto, uma tensão de maior módulo quando a polaridade é positiva para condutores cobertos e negativa para condutores nus (KUFFEL et al., 2000).

6.4 Efeito do número de amostras

Com relação aos ensaios com cabos cobertos, todos os resultados foram obtidos considerando cinco amostras de cabo para cada caso analisado. Naturalmente, com um número reduzido de dados, as análises estatísticas podem ficar comprometidas, uma vez que os parâmetros de interesse são fortemente dependentes do tamanho amostral. Nesse sentido, buscou-se avaliar, neste capítulo, o impacto do aumento do número de amostras nos resultados obtidos e apresentados anteriormente.

Para proceder à avaliação tomou-se como caso base os ensaios realizados na estrutura monofásica CM2 com cabos cobertos com XLPE e tensões impulsivas de polaridade positiva. Inicialmente, assumiu-se que o valor de tensão disruptiva (V_d) poderia ser modelado como uma variável aleatória normalmente distribuída, com valor esperado μ e desvio padrão σ . Essa consideração é importante, pois a determinação do tamanho da amostra (n) depende do grau de confiança desejado, da margem de erro pretendido e do desvio-padrão populacional (σ). No entanto, a aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que se pode rejeitar a hipótese de normalidade dos dados com 99% de confiança (MASSEY, 1951).

Dessa forma, adotou-se um total de 20 amostras para a análise do impacto desse aumento no valor médio da tensão disruptiva. O valor esperado μ foi estimado como a média simples dos valores das tensões disruptivas ($\overline{V_d}$) obtidas nos ensaios e o desvio padrão populacional σ como o desvio-padrão amostral s , dado por:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(V_{di} - \overline{V_d})^2}{n - 1}} \quad (6.1)$$

No total, cabos XLPE 15 kV de três diferentes fabricantes foram utilizados nos ensaios com cabos XLPE na estrutura monofásica CM2 para tensões positivas. Suas características são apresentadas na Tabela 6.9. Essa mudança de fabricantes foi decorrente da indisponibilidade de estoque dos fornecedores no momento da compra de novas amostras. Os resultados apresentados na Tabela 5.3 foram obtidos com $n = 5$ amostras de cabos do fabricante X. O valor médio da tensão disruptiva foi igual a 239 kV. Utilizando (6.1), o desvio-padrão amostral para esses ensaios foi calculado como 15 kV.

Tabela 6.9 – Características dos cabos XLPE fornecidas pelos fabricantes.

Fabricante	Seção nominal (mm²)	Diâmetro do condutor (mm)	Espessura da cobertura (mm)
X	50	8,2	3,0
Y	50	9,3	3,0
Z	50	8,2	5,5

De forma a avaliar o impacto do número de amostras no valor médio da tensão disruptiva, foram realizados dois novos conjuntos de ensaios. O primeiro deles foi feito com cinco amostras de cabos do fabricante Y. Em seguida, dez amostras de cabos do fabricante Z foram utilizados. Os resultados individualizados em relação a cada fabricante são apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Resultados dos ensaios com cabos cobertos com XLPE na estrutura monofásica CM2.

Fabricante	Nº de amostras	Tensão média disruptiva (kV)	Desvio-padrão amostral (kV)
X	5	239	15
Y	5	258	10
Z	10	273	22

Em relação aos primeiros testes com os cabos do fabricante X, o segundo conjunto de ensaios – com cabos do fabricante Y – resultou em um valor médio da tensão disruptiva aproximadamente 8% maior. Além disso, esse conjunto de dados apresentou um menor desvio-padrão.

Considerando agora as dez amostras conjuntamente – fabricantes X e Y –, o valor médio da tensão disruptiva foi igual a 249 kV com desvio-padrão amostral de 16 kV. Em uma comparação com os resultados obtidos com apenas cinco amostras, o aumento para dez amostras resultou na elevação do valor médio da tensão disruptiva em 4%.

A seguir, dez amostras – do fabricante Z – foram testadas. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 6.10. Considerando agora todos os cenários avaliados com relação ao número de amostras, a Tabela 6.11 indica os valores de tensão disruptiva em função do número de amostras testadas bem como o desvio-padrão percentual associado a cada situação. Percebe-se uma tendência de aumento do valor médio da tensão disruptiva com o aumento do número de amostras. Esse aumento pode ser creditado aos diferentes fabricantes empregados nos ensaios. Conforme indica a Tabela 6.10, o valor médio de tensão disruptiva dos cabos do fabricante Z é superior aos demais e, como metade das vinte amostras são deste fabricante, a influência desses cabos foi determinante na elevação da tensão disruptiva. Além disso, também é possível notar o aumento percentual do desvio-padrão com o aumento do número de amostras testadas na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Tensões disruptivas em função do número de amostras.

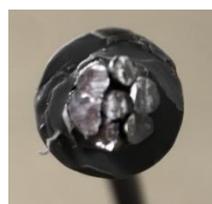
Nº de amostras	Tensão média disruptiva	Desvio-padrão percentual
5 (X)	239	6%
10 (X+Y)	249	6%
20 (X+Y+Z)	261	9%

6.5 Ensaios com cabos cobertos retirados de serviço

Uma importante questão que também deve ser abordada diz respeito ao estado de conservação dos cabos. Até o presente momento, as análises foram realizadas a partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados com cabos novos. Com isso, foi possível estabelecer um maior controle sobre fatores que poderiam influenciar os resultados. Contudo, buscou-se também determinar qual seria o efeito de utilizar nos ensaios cabos que já estiveram em serviço na rede elétrica.

Dessa forma, dois novos conjuntos de ensaios foram realizados de forma a avaliar o impacto da utilização desses cabos nos valores de suportabilidade frente a tensões impulsivas padronizadas. Os cabos fornecidos pela concessionária foram por ela utilizados ao longo de dois anos e meio, aproximadamente. Esses cabos são substituídos periodicamente ou por motivos diversos, como manutenção não programada, acidentes envolvendo abalroamento, etc.

Os cabos recebidos pela concessionária e utilizados nos ensaios são apresentados na Figura 6.5(a). Eles possuem seção transversal igual a 150 mm², sendo esta, portanto, maior que a seção dos cabos até então adotados nos ensaios, conforme indica a Figura 6.5(b). Os quadros comparativos com as características construtivas e elétricas dos cabos de 50 mm² e 150 mm² são apresentados na Tabela 6.12 e na Tabela 6.13, respectivamente.



(a) Seção de 150 mm²

(b) Seção de 50 mm².

Figura 6.5 – Comparação entre os cabos XLPE utilizados nos ensaios.

Tabela 6.12 – Características construtivas dos cabos XLPE fornecidas pelos fabricantes.

Fabricante	Seção nominal (mm ²)	Diâmetro do condutor (mm)	Espessura da cobertura (mm)	Número de fios
X	50	8,2	3,0	6
W	150	14,2	3,0	15

Tabela 6.13 – Características elétricas dos cabos XLPE fornecidas pelos fabricantes.

Fabricante	Seção nominal (mm ²)	Reatância Indutiva (Ω/km)	Resistência (Ω/km)	Capacidade de Corrente (A)
X	50	0,2682	0,822	248
W	150	0,2417	0,264	504

Visando estabelecer condições semelhantes para a comparação dos resultados obtidos nos ensaios com cabos retirados de serviço, testou-se também um conjunto de amostras novas do cabo XLPE de 150 mm². O procedimento de ensaio adotado foi o

mesmo utilizado anteriormente e descrito no Capítulo 4. Os ensaios foram realizados apenas com tensões impulsivas positivas. Os cabos foram posicionados na estrutura monofásica CM2 (Figura 5.1). As condições ambientais aferidas no momento de realização dos testes com os cabos de 150 mm² estão na Tabela 6.14. Todos os resultados foram corrigidos para as condições ambientais de referência.

Tabela 6.14 – Condições atmosféricas no momento de realização do ensaio de acréscimo e decréscimo para a determinação de U_{50} da estrutura monofásica CM2 (polaridades positiva e negativa).

Temperatura	$t = 27^{\circ}\text{C}$
Pressão barométrica	$p_0 = 699 \text{ mmHg}$
Umidade absoluta	$h_0 = 16,6 \text{ g/m}^3$

A Figura 6.6 apresenta os resultados dos ensaios realizados com as amostras de cabos XLPE de 150 mm² novas e aquelas que foram retiradas de serviço. De acordo com esses resultados, a tensão média disruptiva para as amostras novas foi igual a 224 kV, um valor aproximadamente 6% menor que aquele obtido nos ensaios com o cabo de menor seção transversal (239 kV). Já a tensão média disruptiva relacionada às amostras já utilizadas pela concessionária (217 kV) foi apenas 3% menor que o valor obtido com as amostras novas. Esses valores estão resumidos na Tabela 6.15.

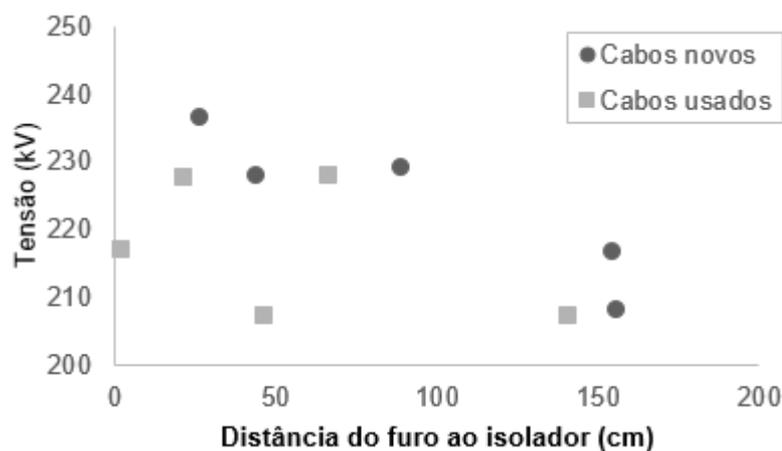


Figura 6.6 – Relação entre a tensão disruptiva e a localização dos furos ao longo da cobertura dos cabos XLPE de 150 mm² testados na estrutura monofásica CM2.

Conforme indica a Figura 6.6, os valores mínimos da tensão disruptiva obtidos com as amostras novas e retiradas de serviço são iguais a 208 kV e 207 kV, respectivamente; ou seja, praticamente não houve diferença (Tabela 6.16). Vale ressaltar

que nos cabos já utilizados pela concessionária nenhum dano aparente na cobertura dielétrica foi visto a olho nu em uma minuciosa inspeção.

Ainda de acordo com a Figura 6.6, nos ensaios com cabos novos, o máximo valor da tensão disruptiva (236 kV) foi relacionado à menor distância entre o furo e o isolador (27 cm). Para esse mesmo ensaio, a maior distância onde um furo foi localizado (156 cm) correspondeu ao menor valor de tensão disruptiva (208 kV). Já nos ensaios com os cabos usados na rede, esse comportamento não foi observado. Os furos foram localizados entre 2,5 cm e 141 cm. Contudo, a maior e a menor tensões disruptivas foram relacionadas a disrupções que ocorreram a 67 cm e a 47 cm do isolador, respectivamente.

Tabela 6.15 – Valores médios das tensões disruptivas para cabos XLPE de 50 mm² e 150 mm² obtidos nos ensaios com a estrutura monofásica CM2.

Seção (mm ²)	Tensão disruptiva (kV)	
	<i>Cabos novos</i>	<i>Cabos retirados de serviço</i>
50	239	–
150	224	217

Tabela 6.16 – Valores mínimos das tensões disruptivas para cabos XLPE de 50 mm² e 150 mm² obtidos nos ensaios com a estrutura monofásica CM2.

Seção (mm ²)	Tensão disruptiva (kV)	
	<i>Cabos novos</i>	<i>Cabos retirados de serviço</i>
50	220	
150	208	207

Nos ensaios com as amostras retiradas de serviço nenhuma descarga disruptiva parcial foi observada. Já nos ensaios com as amostras novas, duas descargas desse tipo foram registradas. As tensões que provocaram esses eventos foram 207 kV e 217 kV.

Dessa forma, para a condição avaliada não houve diferenças significativas entre os resultados obtidos com cabos novos e os resultados relacionados aos cabos que já estiveram em uso na rede de distribuição. Há que se levar em consideração, porém, o bom estado de conservação desses cabos. Espera-se que os cabos que tenham sofrido os efeitos de deterioração devido a um longo período de uso não apresentem o mesmo desempenho dos cabos utilizados nos ensaios de suportabilidade elétrica realizados neste trabalho.

7 Conclusões

7.1 Considerações iniciais

Em virtude de exigências cada vez maiores no que diz respeito à qualidade do fornecimento de energia elétrica, as empresas do setor têm buscado nos últimos anos implementar melhorias em seus sistemas. Em relação ao desempenho dos sistemas elétricos de potência, as descargas atmosféricas constituem a principal causa de desligamentos não programados de linhas de transmissão e distribuição. Especificamente para as linhas de distribuição em média tensão, a incidência de descargas próximas é fator chave para o seu desempenho tendo em vista o estabelecimento de surtos de tensões induzidas que podem resultar em falha de isolamento.

No sentido de minimizar ocorrências dessa natureza, o uso de redes de distribuição compactas tem-se difundido em virtude de um melhor desempenho em comparação às redes convencionais. Nesse contexto, o presente trabalho teve como foco, em um primeiro momento, a observação dos efeitos associados à falha de isolamento em estruturas monofásicas e trifásicas de redes compactas. Como consequência, esta tese provê elementos para uma melhor compreensão do desempenho desse tipo de rede frente a tensões impulsivas.

7.2 Conclusões

A partir da necessidade de um melhor conhecimento relativo ao processo disruptivo em cabos cobertos, foi realizada uma investigação experimental com o objetivo de avaliar o comportamento de estruturas comumente empregadas em redes de distribuição compactas frente a tensões de impulso atmosférico padronizado (1,2/50 μ s). Para isso, foram realizados ensaios utilizando cabos nus e cabos cobertos com materiais dielétricos sólidos (XLPE e HDPE) posicionados na estrutura monofásica CM2 e na

estrutura trifásica CE2. Os resultados obtidos compõem um conjunto de fatores de grande interesse para a modelagem dos efeitos associados a falha de isolamento desses arranjos isolantes: (i) valores mínimos e médios da tensão disruptiva; (ii) o tempo para a disrupção e (iii) os eventos relacionados ao processo disruptivo – acúmulo de cargas, descargas disruptivas parciais e perfuração da camada dielétrica dos cabos cobertos.

7.2.1 Estrutura monofásica CM2

Nos ensaios com cabos nus, adotou-se o método de acréscimo e decréscimo descrito na norma NBR IEC 60060-1 para a determinação das tensões disruptivas (ABNT, 2013). Os ensaios foram realizados utilizando tensões impulsivas positivas e negativas. Já nos ensaios com cabos cobertos, a metodologia consistiu na aplicação de cinco tensões de impulso atmosférico padronizado a cada nível de tensão que era elevado em passos de 10 kV até que se observasse uma descarga disruptiva com perfuração da cobertura do cabo. Considerando cabos cobertos, diferentes eventos relacionados ao processo disruptivo foram observados: as descargas disruptivas parciais e plenas.

As **descargas disruptivas parciais** ocorrem quando a magnitude do campo elétrico excede a rigidez dielétrica do ar. Esse tipo de evento é caracterizado por um arco elétrico estabelecido entre a superfície externa da cobertura do cabo e a estrutura aterrada (normalmente, a base do isolador). Essa descarga, contudo, **não é capaz de provocar perfuração na camada protetora dos condutores**. Tipicamente, as ondas de tensão medidas durante ocorrências dessa natureza apresentam uma queda de tensão da ordem de algumas dezenas de kV com rápida recuperação da sua amplitude após a extinção do arco elétrico. Na estrutura CM2, as descargas disruptivas parciais **ocorreram apenas nos ensaios com cabos XLPE**. Quando submetidos a tensões positivas, elas ocorreram a partir do nível **200 kV**. Para a polaridade negativa, essas descargas foram observadas a partir de um nível inferior: **170 kV**.

Considerando as **descargas disruptivas plenas**, para ambas as polaridades, a suportabilidade da estrutura monofásica CM2 mostrou-se **superior quando foram utilizados cabos cobertos com polietileno de alta densidade (HDPE)** ao invés de cabos cobertos com polietileno reticulado (XLPE). Os **valores médios** da tensão disruptiva obtidos com a **cobertura HDPE** foram **superiores** aos valores relacionados à XLPE em **77% e 58%** para tensões positivas e negativas, respectivamente. De forma semelhante,

os **valores mínimos** da tensão disruptiva associados à **cobertura HDPE** se mostraram superiores aos valores registrados nos ensaios com cabos XLPE em, no mínimo, **60%**. A definição dos valores relativos a este parâmetro é uma importante contribuição relativa à modelagem dos efeitos associados à falha de isolamento em cabos cobertos de redes de distribuição compacta e permite o estabelecimento de critérios para a realização de análises de desempenho desse tipo de rede.

Em relação ao **efeito da polaridade**, os resultados indicaram uma mudança de comportamento do arranjo isolante em função da presença da cobertura dos cabos. Nos ensaios realizados com a estrutura monofásica CM2 utilizando **condutores nus**, o valor absoluto da **tensão U_{50} para a polaridade negativa foi 20% superior** em relação ao valor de U_{50} correspondente à polaridade positiva. Por outro lado, **os condutores cobertos apresentaram maior suportabilidade frente a tensões impulsivas positivas**. Os valores médios da tensão disruptiva considerando a polaridade negativa foram menores que os valores associados à polaridade positiva em **8% e 18%** para os cabos XLPE e HDPE, respectivamente. O comparativo considerando os valores mínimos da tensão disruptiva também indicou o mesmo comportamento. Nesse caso, os valores de U_{50} para a polaridade negativa obtidos com cabos XLPE e HDPE foram, respectivamente, **10% e 14%** menores que os valores correspondentes para a polaridade positiva. Esses resultados, sobretudo os relacionados aos cabos XLPE, confirmam os resultados obtidos em pesquisas anteriores realizadas no LRC/UFMG (LIMA, 2015), (GOMES, 2015).

Em relação ao **tempo de corte** nas ondas de tensão registrado durante os ensaios, percebeu-se que, **para ambas as polaridades, os instantes do tempo requerido para a ocorrência de disrupção nos cabos XLPE foram superiores** aos instantes registrados para os cabos HDPE. Tipicamente, nos ensaios com o cabo XLPE, as descargas disruptivas ocorreram na cauda da onda de tensão impulsiva (tempos de corte entre 4,1–16,1 μ s). Nos ensaios com o cabo HDPE, porém, foram observados, colapsos de tensão na frente da onda, em alguns casos (tempos de corte entre 0,9–4,8 μ s). O conhecimento do comportamento deste parâmetro, bem como dos resultados apresentados na Tabela 5.5, consistem em uma importante contribuição da tese para o desenvolvimento de projetos de proteção e coordenação de sistemas de distribuição.

Com relação à distribuição dos furos ao longo do cabo, **o valor da tensão aplicada aparentemente não apresenta clara relação com a localização do furo** resultante da descarga disruptiva. Embora nos ensaios com tensões negativas tenha sido observada a tendência de os furos mais próximos ao isolador estarem relacionados aos maiores valores de tensão disruptiva, tanto nos cabos XLPE quanto nos cabos HDPE, esse padrão não foi obtido nos ensaios com tensões positivas, sobretudo aqueles referentes aos ensaios com cabos HDPE. Considerando as distâncias de todos os furos obtidos nos ensaios realizados com a estrutura CM2, percebe-se que **a região mais propícia para ocorrência de perfuração está localizada na faixa 38 – 127 cm a partir do isolador, onde foram observadas 50% das ocorrências**. A identificação de distribuição da localização dos furos é outra relevante contribuição da tese e tem impacto na proposição de soluções que garantam um melhor desempenho do sistema.

Ainda utilizando a estrutura CM2, foram realizados outros dois tipos de ensaios. Um deles buscou investigar o efeito das cargas estáticas na suportabilidade do arranjo isolante; o outro teve como objetivo avaliar o impacto da utilização de cabos cobertos previamente perfurados.

Conforme esperado, a presença de cargas estáticas sobre a cobertura dielétrica dos cabos influencia significativamente o valor da tensão disruptiva. Nos ensaios sem remoção de cargas realizados utilizando cabos XLPE, os resultados indicaram que **a presença de cargas na cobertura elevou o valor médio da tensão disruptiva em 37% e 24% para as polaridades positiva e negativa, respectivamente**. Esses valores foram iguais a 328 kV para tensões positivas e 272 kV pra tensões negativas. Contudo, quando o cabo já estava perfurado, **a distância do furo em relação ao isolador mostrou-se um fator de significativa influência para a suportabilidade**, sendo difícil estabelecer o quanto a presença de cargas efetivamente contribuiu para o aumento da tensão disruptiva, especialmente para a polaridade positiva.

Utilizando amostras de cabos perfurados, foram realizados ensaios posicionando os furos a distâncias previamente estabelecidas em relação ao isolador. Com esse tipo de ensaio, foi possível perceber que, de forma geral, os valores da tensão disruptiva das amostras de cabos com a cobertura perfurada foram menores que os valores correspondentes às amostras com a cobertura intacta. Contudo, **mesmo com a cobertura**

perfurada, permanece o aumento de suportabilidade elétrica da estrutura em comparação com os resultados obtidos nos ensaios com cabos nus.

Além disso, os ensaios com as amostras perfuradas mostraram que o valor da tensão disruptiva é influenciado pela localização do furo na cobertura do cabo. Nos ensaios com tensões impulsivas de polaridade positiva, observou-se a **tendência de crescimento do valor de tensão disruptiva com o aumento da distância do furo em relação ao isolador**. Por outro lado, os resultados obtidos a partir dos ensaios com tensões impulsivas negativas indicam que essa tendência de aumento é menos evidente para essa polaridade.

É importante pontuar que todos os resultados foram obtidos considerando cinco amostras de cabo para cada caso analisado. Evidentemente, com um número reduzido de dados, as conclusões apresentadas não são definitivas, embora apontem importantes tendências e confirmem algumas hipóteses levantadas ao longo da realização do trabalho. Todavia, houve uma tentativa de se avaliar o impacto do aumento do número de amostras nos resultados obtidos nos ensaios realizados na estrutura monofásica CM2 com cabos XLPE submetidos a tensões impulsivas de polaridade positiva. A análise realizada mostrou que **o aumento do número de amostras promoveu uma elevação no valor médio da tensão disruptiva**. Considerando cinco amostras, a tensão média disruptiva foi igual a 239 kV. Dobrando-se o número de amostras para dez, a tensão disruptiva elevou-se para 249 kV. Por fim, utilizando vinte amostras, o valor médio foi 261 kV. Contudo, o fato de diferentes fabricantes terem sido utilizados nos ensaios deve ser levado em consideração.

O último conjunto de ensaios realizados com estrutura monofásica CM2 avaliou o comportamento de cabos cobertos que já estiveram em serviço na rede de distribuição elétrica da CEMIG por aproximadamente dois anos e meio. Do ponto de vista da suportabilidade elétrica, o **comportamento dos cabos usados foi muito semelhante àquele apresentado pelos cabos novos**. Considerando os valores mínimos de tensão para disrupção, praticamente não houve diferença: 208 kV para cabos novos e 207 kV para cabos retirados de serviço. Em relação aos valores médios, a tensão disruptiva dos cabos usados foi igual a 217 kV, um valor apenas 3% inferior ao valor médio correspondente aos cabos novos (224 kV).

7.2.2 Estrutura trifásica CE2

Os ensaios realizados com a estrutura trifásica CE2 buscaram identificar os isoladores nas posições mais críticas do ponto de vista da suportabilidade do arranjo isolante frente a tensões de impulso atmosférico padronizado (1,2/50 μ s). Utilizando condutores nus, os testes indicaram que, **para a polaridade positiva, os valores da tensão de descarga disruptiva a 50% (U_{50}) foram praticamente os mesmos para todas as posições**, estando em uma faixa de 107 kV a 109 kV. Para a polaridade negativa, contudo, o **isolador mais afastado em relação ao poste** (posição C da Figura 4.5) apresentou o **pior desempenho**. Para essa posição, a tensão U_{50} foi igual a 125 kV, um valor 27% menor que a tensão U_{50} do isolador A (171 kV) e 24% menor que a tensão U_{50} correspondente ao isolador B (164 kV). Como esperado, **os valores de U_{50} para tensões negativas foram maiores que os valores obtidos com tensões positivas**. Considerando as posições A, B e C, os valores para tensões impulsivas negativas foram, respectivamente, 60%, 52% e 15% maiores que os valores correspondentes à polaridade positiva.

Ensaio com condutores cobertos com XLPE foram realizados em todas os isoladores da estrutura CE2. **Considerando os valores mínimos, a pior performance foi relacionada à posição B** (tensões disruptivas para as polaridades positiva e negativa iguais a 222 kV e 227 kV, respectivamente). Todavia, considerando-se os valores médios, apenas para a polaridade positiva o isolador B permanece como o de pior desempenho. Frente a tensões impulsivas negativas, o menor valor médio da tensão disruptiva foi registrado no conjunto cabo/isolador que estava localizado na posição A. Curiosamente, em ambos os casos, o valor absoluto da tensão média disruptiva foi igual: 278 kV.

A partir desses resultados, ensaios com cabos HDPE foram realizados nas posições A e B. Para ambas as polaridades, **o isolador B apresentou os menores valores de tensão disruptiva**. Considerando os valores mínimos (354 kV para impulsos positivos de tensão e 268 kV para impulsos negativos), a suportabilidade desse isolador em relação ao isolador A foi 19% inferior para a polaridade positiva e 26% inferior para a polaridade negativa. Da mesma forma que na estrutura CM2, a performance dos cabos HDPE foi superior à dos cabos XLPE.

Comparando-se os resultados obtidos a partir dos ensaios com as estruturas monofásica e trifásica, percebe-se que o nível mínimo de suportabilidade foi semelhante para o cabo XLPE frente a tensões impulsivas positivas: 220 kV (CM2) e 222 kV (CE2 – isolador B). Submetido a tensões negativas, esse mesmo cabo apresentou uma performance cerca de 15% superior quando posicionado na estrutura trifásica: 198 kV (CM2) e 227 kV (CE2 – isolador B).

Já o desempenho do cabo HDPE posicionado na estrutura trifásica foi inferior àquele obtido com a estrutura monofásica, sobretudo considerando a polaridade negativa: 318 kV (CM2) e 268 kV (CE2 – isolador B), ou seja, uma diferença de 16%. Para a polaridade positiva, essa diferença foi menor: 4%, sendo os valores mínimos da tensão disruptiva iguais a 370 kV (CM2) e 354 kV (CE2 – isolador B).

7.3 Propostas de continuidade

As realizações apresentadas nesta tese indicam uma série de desdobramentos relativos ao tema analisado. Dentre eles, propõe-se a realização de um grande número de testes em uma mesma estrutura de forma a aumentar a base de dados disponível para análises estatísticas mais robustas.

Todavia, o aumento do número de testes e o conseqüente aumento da base de dados envolve questões relacionadas à disponibilidade de recursos, como mão de obra qualificada, tempo requerido para a realização dos ensaios, além dos custos para a obtenção dos insumos necessários para os testes. Nesse contexto, uma alternativa consiste na utilização de metodologias que sejam capazes de obter os valores mínimos da tensão disruptiva para as estruturas da rede compacta a partir de um número reduzido de dados. Esse tipo de realização vem sendo proposta em trabalhos como (LIMA; CONTI, DE; et al., 2017)

No que tange à representatividade das ondas de tensão induzida em redes de distribuição, poder-se-iam realizar ensaios com ondas de tensão diferentes da tensão de impulso atmosférico padronizado (1,2/50 μ s). Nesses ensaios, o objetivo seria a verificação do comportamento do arranjo isolante quando submetido a ondas com tempo de frente e cauda mais curtos (0,5/10 μ s, por exemplo).

A realização de ensaios com tensões impulsivas negativas constitui-se ainda um grande desafio, tendo em vista as dificuldades enfrentadas com o necessário aumento do comprimento das amostras para minimizar as ocorrências de descargas superficiais. Nesse sentido, uma investigação mais aprofundada é requerida.

No trabalho de (SOUZA, 2015), foram propostas duas modificações físicas na estrutura trifásica CE2: (i) a inversão da calha do braço C na parte superior do suporte metálico e (ii) o aumento de 5 cm na distância entre o isolador inferior e a calha superior. Essas modificações proporcionaram, segundo o autor, um ganho na suportabilidade do isolador inferior (posição A) a partir dos ensaios com cabos nus. Nesta tese, porém, verificou-se que a posição crítica para os ensaios com cabos cobertos corresponde ao isolador superior mais próximo ao poste (posição B). Apenas nos ensaios com cabos XLPE submetidos a tensões impulsivas negativas é que o isolador A apresentou o pior desempenho. Cabe, então, verificar em uma futura investigação se a modificação proposta pelo autor na estrutura seria suficiente para melhorar de fato o desempenho do arranjo no contexto das redes de distribuição compactas com cabos cobertos.

Um tópico que também merece um estudo mais aprofundado refere-se ao efeito do acúmulo de carga superficial. Tem-se a expectativa de que medições da corrente de descarga utilizando transdutor de corrente abririam a possibilidade de se estimar a carga acumulada no cabo.

Finalmente, propõe-se a realização de uma avaliação relativa à aplicação dos valores de tensão disruptiva obtidos nesta tese para a realização de simulações computacionais da análise de desempenho desse tipo de rede frente aos efeitos de descargas atmosféricas. Em um trabalho dedicado a essa proposta, poderia ser avaliado, por exemplo, o impacto dos distintos parâmetros do fenômeno na performance de redes de distribuição compactas.

Referências Bibliográficas

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR IEC 60060-1: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão - Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

BLENNOW, H. J. M.; SJOBERG, M. L. A.; LEIJON, M. A. S.; GUBANSKI, S. M. Electric field reduction due to charge accumulation in a dielectric-covered electrode system. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 7, n. 3, p. 340–345, 2000.

CAMPOS FILHO, F. F. **Algoritmos Numéricos.** 2nd ed. Belo Horizonte: LTC Editora, 2007.

CEMIG. **ND 2.9: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Compactas.** Belo Horizonte, 2012.

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química.** 11th ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CIGRE. **Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines.** WG01 SC33, 1991.

DARVENIZA, M. Electrical breakdown of air between insulated conductors. Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. **Anais...** v. 2, p.615–620, 2000. Xi'an.

DAS-GUPTA, D. K. Polyethylene: structure, morphology, molecular motion and dielectric behavior. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 10, n. 3, p. 5–15, 1994. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/285418/>>.

EINSTEIN, A. On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light. **Annalen der Physik**, v. 17, n. 6, p. 132–148, 1905.

ELEKTRO. **ND 12: Redes Protegidas Compactas - Critérios para Projetos e Padronização de Estruturas.** Campinas, 2014.

GILL, J.; STYS, R.; SEELY, R. Impulse Characteristics of Aerial Spacer Cable. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-86, n. 3, p. 369–373, 1967. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4073286/>>.

GOMES, R. M. **Estudo do Comportamento de Cabos com Cobertura Isolante de Redes de Distribuição Compactas Frente a Sobretensões Impulsivas Padronizadas,** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

GOMES, R. M.; LIMA, G. S.; CONTI, A. DE; et al. Volt-time curve measurements of 15-kV distribution line polymeric insulators and estimation of DE parameters. Proceedings of the 2015 Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL). **Anais...** p.937–941, 2015. Nagoya.

GULMINE, J. V. **Processos de envelhecimento e correlações estruturais de propriedades do XLPE,** 2004. Universidade Federal do Paraná.

- HARPER, C. A. **Plastics**. McGraw-Hill, 1999.
- KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering**. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- LEE, R. E.; FRITZ, D. E.; STILLER, P. H.; SHANKLE, D. F. Prevention of Covered Conductor Burndown on Distribution Circuits - Arcing Protection Devices. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-101, n. 8, p. 2434–2438, 1982.
- LIMA, G. S. **Avaliação da Suportabilidade de Estruturas Monofásicas de Redes de Distribuição Aéreas Compactas Frente a Impulsos Atmosféricos Padronizados**, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.
- LIMA, G. S.; CONTI, A. DE; SOUZA, R. E.; et al. Test of statistical procedures for determining the impulse withstand voltage of a three-phase compact line structure considering bare cables. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). **Anais...** . p.49–52, 2017. Natal: IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8116898/>>. .
- LIMA, G. S.; GOMES, R. M.; SOUZA, R. E.; et al. Influence of XLPE-covered cables on the impulse withstand voltage of a single-phase structure used in compact distribution lines. 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA). **Anais...** . p.260–263, 2015. Balneário Camboriú: IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7339287>>. .
- LIMA, G. S.; GOMES, R. M.; SOUZA, R. E.; et al. Impulse withstand voltage of single-phase compact distribution line structures considering bare and XPLE-covered cables. **Electric Power Systems Research**, v. 153, p. 88–93, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779616304217>>. .
- LOPES, I. J. S.; NOLASCO, J. F. Coordenação de isolamento. Seminário Avançado em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica - SALTEE. **Anais...** . p.1–14, 1996.
- MARX, E. Deutsches Reichspatent. , 1923. Alemanha.
- MASSEY, F. J. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit Table of Percentage Points of Kolmogorov. **Journal of the American Statistical Association**, v. 46, n. 253, p. 68–78, 1951.
- MEEK, J. M. A theory of spark discharge. **Physical Review**, v. 57, n. 8, p. 722–728, 1940.
- NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. **High Voltage Engineering**. 2nd ed. McGraw-Hill, 1996.
- NAKAMURA, K.; MCKENNY, P. J.; HAMMAM, M. S. A. A.; et al. Impulse Breakdown Characteristics of 13.2 kV Covered Conductor Insulator/Tie Configurations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. PWRD-1, n. 4, p. 250–258, 1986. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5527619>>. .
- NÓBREGA, A. M. **Análise da isolamento em XLPE dos cabos cobertos utilizados nas redes de média tensão**, 2013. Universidade Federal de Itajubá.

PEEK, F. W. **Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering**. 1st ed. New York: McGraw-Hill, 1915.

POWELL, R. W.; THWAITES, H. L.; STYS, R. D. Estimating Lightning Performance of Spacer-Cable Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 84, n. 4, p. 315–319, 1965.

RAETHER, H. The electron avalanche and its development. **Applied Scientific Research**, v. 5, n. 1, p. 23–33, 1956.

REZENDE, S. M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2nd ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

ROCHA, R. C. C.; BERRÊDO, R. C.; BERNIS, R. A. O.; et al. New technologies, standards, and maintenance methods in spacer cable systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 2, p. 562–568, 2002.

SEKIOKA, S.; MIYAZAKI, T.; OKABE, S. Measured results of flashover characteristics of distribution line insulators for sustaining insulated cable. Proceedings of the 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. **Anais...** . p.301–304, 2008. Cardiff.

SILVEIRA, F. H. **Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas**, 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

SOUZA, R. E.; GOMES, R. M.; LIMA, G. S.; et al. A Study on the Impulse Breakdown Behavior of Covered Cables of Compact Distribution Lines. Proceedings of the 2016 International Conference on Grounding and Earthing & 7th International Conference on Lightning Physics and Effects. **Anais...** . p.138–141, 2016a. Porto de Galinhas.

SOUZA, R. E.; GOMES, R. M.; LIMA, G. S.; et al. Preliminary analysis of the impulse breakdown characteristics of XLPE-covered cables used in compact distribution lines. 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). **Anais...** . p.1–6, 2016b. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7791387/>>. .

SOUZA, R. E.; GOMES, R. M.; LIMA, G. S.; et al. Analysis of the impulse breakdown behavior of covered cables used in compact distribution lines. **Electric Power Systems Research**, , n. In Press, 2017. Elsevier B.V.

SOUZA, R. E.; SILVEIRA, F. H.; GOMES, R. M.; et al. Influence of cable insulating material on the impulse withstand voltage of a single-phase compact distribution line structure. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). **Anais...** . p.152–156, 2017. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8116916/>>. .

SOUZA, W. A. **Estudo do Comportamento de Estruturas de Redes de Distribuição Compactas Frente A Sobretensões Impulsivas**, 2015. MSc. Dissertation (in Portuguese), Graduate Program in Electrical Engineering, Federal University of Minas Gerais, Brazil.

SOUZA, W. A.; SILVA, F. A. M.; DIAS, L. F.; et al. A discussion on the electrical performance of compact distribution overhead lines. Proceedings of the 2014 International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on

Lightning Physics and Effects. **Anais...** . p.288–292, 2014. Manaus.

SZE, S. M.; LEE, M. K. **Semiconductor Devices: Physics and Technology**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.

TOWNSEND, J. S. **Electricity in Gases**. Oxford Press, 1915.

VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

Anexos

A) Trabalhos publicados durante a realização deste trabalho

A.1 Periódicos

SOUZA, R. E.; GOMES, R. M.; LIMA, G. S.; SILVEIRA, F. H.; DE CONTI, A.; VISACRO, S. Analysis of the impulse breakdown behavior of covered cables used in compact distribution lines. **Electric Power Systems Research**, In Press, Elsevier, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.024>>. Acesso em 25 jan. 2018.

LIMA, G. S.; GOMES, R. M.; SOUZA, R. E.; DE CONTI, A.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. Impulse withstand voltage of single-phase compact distribution line structures considering bare and XPLE-covered cables. **Electric Power Systems Research**, v. 153, p. 88–93, Elsevier, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.024>>. Acesso em 25 jan. 2018.

A.2 Congressos

SOUZA, R. E.; SILVEIRA, F. H.; GOMES, R. M.; LIMA, G. S.; DE CONTI, A.; VISACRO, S. Influence of cable insulating material on the impulse withstand voltage of a single-phase compact distribution line structure. Proceedings of the **International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)** p.152–156, Natal, 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8116916/>>. Acesso em 25 jan. 2018.

LIMA, G. S.; CONTI, A.; SOUZA, R. E.; GOMES, R. M.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S.; SOUZA, W. A. Test of statistical procedures for determining the impulse withstand voltage of a three-phase compact line structure considering bare cables. Proceedings of **International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)** p.49–52, Natal, 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8116898/>>. Acesso em 25 jan. 2018.

SOUZA, R. E.; GOMES, R. M.; LIMA, G. S.; SILVEIRA, F. H.; DE CONTI, A.; VISACRO, S. Preliminary analysis of the impulse breakdown characteristics of XLPE-

covered cables used in compact distribution lines. Proceedings of **33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)**. p.1–6, Estoril, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7791387/>>. Acesso em 25 jan. 2018.

SOUZA, R. E.; GOMES, R. M.; LIMA, G. S.; SILVEIRA, F. H.; DE CONTI, A.; VISACRO, S. A Study on the Impulse Breakdown Behavior of Covered Cables of Compact Distribution Lines. Proceedings of the **2016 International Conference on Grounding and Earthing & 7th International Conference on Lightning Physics and Effects**, p.138–141, Porto de Galinhas, 2016.

LIMA, G. S.; GOMES, R. M.; SOUZA, R. E.; DE CONTI, A.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S.; SOUZA, W. A. Influence of XLPE-covered cables on the impulse withstand voltage of a single-phase structure used in compact distribution lines. Proceedings of **International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)**. p.260–263, Balneário Camboriú, 2015: Disponível em: < <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2015.7339287>>. Acesso em 25 jan. 2018.

B) Premiação recebida em congresso

Premiação recebida durante a 33ª Conferência Internacional sobre Proteção contra Descargas Atmosféricas (*33rd International Conference on Lightning Protection – ICLP*, Estoril, Portugal, 2016) pelo comitê científico do evento devido à qualidade da apresentação do artigo *Preliminary analysis of the impulse breakdown characteristics of XLPE-covered cables used in compact distribution lines* e devido às contribuições no campo da proteção de sistemas elétricos contra descargas atmosféricas.

**The Scientific Committee of the
International Conference on Lightning Protection
(ICLP)**

DIPLOMA

presented to

Ronaldo Engenheiro de Souza Filho

for his/her high quality presentation of a paper or poster
entitled

*Preliminary analysis of the repetitive breakdown
characteristics of XLPE-covered cables and its impact
distribution and.*

at the International Conference on Lightning Protection
and his/her notable contributions to the field of lightning research
and lightning protection

**33rd International Conference on Lightning Protection
ICLP 2016
Estoril, PORTUGAL
25-30 September 2016**

Vernon Cooray
Vernon COORAY
President

Joan Montanya Marek Loboda István Berta
Joan Montanya Marek Loboda István Berta
ICLP Awards Committee

Maria Teresa Correia de Barros
Maria Teresa Correia de Barros
33rd ICLP Chairwoman