

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CABOS COM
COBERTURA ISOLANTE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO
COMPACTAS FRENTE A SOBRETENSÕES IMPULSIVAS
PADRONIZADAS**

RAFAEL MAIA GOMES

DATA DA DEFESA: 10/12/2015

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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CABOS COM
COBERTURA ISOLANTE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO
COMPACTAS FRENTE A SOBRETENSÕES IMPULSIVAS
PADRONIZADAS**

RAFAEL MAIA GOMES

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

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

Orientador: Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira

**Co-orientadores: Prof. Dr. Alberto Resende De Conti
Prof. Dr. Silvério Visacro Filho**

BELO HORIZONTE
DEZEMBRO–2015

*Dedico este trabalho a minha noiva,
Bárbara, a meus pais, Fernando e Soraia,
e a minha irmã, Cynara.*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida.

Agradeço ao meu orientador Dr. Fernando Henrique Silveira pelo apoio técnico, ensinamentos de vida e persistência, fatores com os quais pude crescer tanto profissionalmente como pessoalmente.

Ao professor Dr. Alberto de Conti por seus conselhos e encaminhamentos, sempre de prontidão para sanar quaisquer dúvidas.

Agradeço também aos professores, Dr. Silvério Visacro e Dra Maria Helena, pelo conhecimento transmitido.

Aos companheiros de laboratório, Guilherme da Silva, Felipe Cota, Ronaldo Eugênio, Miguel Guimarães e Listz.

Aos meus familiares, pelo incentivo, apoio, reconhecimento e suporte incondicionalmente oferecidos.

Por fim, agradeço a minha noiva Bárbara pela ajuda e companheirismo; por entender meus momentos de ausência e pelo incentivo nessa longa caminhada de pesquisa e busca de conhecimento.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo investigar a influência da camada polimérica isolante de cabos cobertos de redes de distribuição aéreas compactas na suportabilidade frente a sobretensões impulsivas de estruturas monofásicas tipicamente empregadas no Brasil. O desenvolvimento desse trabalho compreendeu a realização de ensaios em laboratório de alta tensão, considerando a aplicação de impulsos de tensão contidos na norma ABNT (2003), com forma de onda dupla exponencial (1,2/50 μ s), característicos de sobretensões de origem atmosférica, na estrutura monofásica denominada CM2 da CEMIG. Os mecanismos de falha que surgem inerentemente ao uso de cabos cobertos quando submetidos a impulsos de tensão são apresentados, como por exemplo, o acúmulo de cargas e a ocorrência de descargas parciais.

A fim de se comparar o ganho obtido com a introdução de uma camada isolante em cabos foram realizados ensaios empregando-se cabos cobertos e cabos nus, sendo o último caso conduzido de forma a representar uma situação na qual a cobertura isolante encontra-se totalmente degradada. Além disso, com o intuito de se avaliar a influência do acúmulo de cargas na suportabilidade de cabos cobertos, dois procedimentos de ensaio foram adotados. O primeiro, denominado Grupo 1, considerou a remoção de cargas acumuladas na superfície externa do cabo após cada aplicação de tensão impulsiva. O segundo procedimento, denominado Grupo 2, não considerou a remoção de cargas.

Com base nos resultados obtidos, foi possível determinar o menor nível de tensão para o qual se verifica a presença de descarga disruptiva em cada amostra de cabo, sendo este evento responsável pela perfuração da cobertura isolante e definido como "tensão suportável" ao longo de todo o texto. Tal valor, determinado pela média da tensão perfurante de todas as amostras, é igual a 239 kV e 219 kV para impulsos de tensão de polaridades positiva e negativa, respectivamente, quando desconsiderado o acúmulo de cargas. Ensaios realizados com cabos nus indicaram tensão de descarga disruptiva assegurada (U_{90}) de 133 kV e 161 kV, respectivamente para as polaridades positiva e negativa, apresentando assim, a maior suportabilidade de cabos com cobertura isolante. Os ensaios considerando o acúmulo de cargas apresentaram como resultado uma suportabilidade superior àquela obtida sem a remoção de cargas, com tensões suportáveis médias de 328 kV e 272 kV para polaridades positiva e negativa, respectivamente. Por fim, comprovou-se a menor suportabilidade de cabos cobertos perfurados em comparação com cabos novos, indicando reduções na tensão suportável de até 28,9%, dependendo da distância entre o furo e a estrutura suporte do cabo.

Abstract

The main purpose of this work is to investigate the influence of the polymeric insulation layer of covered cables on the impulse withstand voltage of a typical single phase structure used in compact distribution lines in Brazil. The development of this work includes experimental tests performed in a single-phase structure named CM2 of CEMIG, a Brazilian power utility, by applying the standardized double exponential voltage waveform (1.2/50 μ s) characteristic of lightning overvoltage events. The disruption mechanisms that happen inherent to the use of covered cable such as partial discharge and charge accumulation were also presented.

In order to compare the effect of the presence of the cable insulation layer, tests using bare cable were also performed to represent a critical situation that happens when the cable insulation layer is totally damaged. Besides that, two sets of tests were adopted in this work aiming the evaluation of surface charge accumulation on the impulse voltage withstand of covered cable. In the first procedure, named group 1, after each impulse application a conductive earthed brush is used to remove charges on cable insulation layer. In the second procedure, named group 2, no charge removal was performed. Based on tests results, the lowest disruptive voltage responsible for the cable puncture was calculated as an average of breakdown voltage achieved in each sample. The mean voltage withstand using covered cable on CM2 structure is 239 kV and 219 kV respectively for positive and negative impulse voltage and disregarding the stored charges on the cable insulation. Experimental tests with bare cable provided a 90% disruptive discharge voltage around 133 kV and 161 kV with positive and negative polarity respectively, indicating a higher supportability provided by covered cables. Also, tests performed without the removal of stored charges indicated an increase on the voltage impulse withstand (mean voltages of 328 kV and 272 kV for positive and negative polarity respectively). Finally, it was proved the lower supportability of punctured cables compared with new cables, indicating a reduction on voltage withstand up to 28.9% , depending on the distance between the puncture and the support structure of the cable.

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Relevância da investigação	1
1.2	Objetivo	5
1.3	Metodologia de desenvolvimento.....	5
1.4	Organização do texto	6
2	Fundamentos da Falha de Isolamento	8
2.1	Introdução	8
2.2	Tipos de isolamento	8
2.3	Mecanismos de Disrupção em gases	10
2.3.1	Considerações Iniciais	10
2.3.2	Ionização.....	11
2.3.3	Formação de streamers	14
2.3.4	Formação de corona.....	16
2.4	Disrupção em sólidos.....	18
2.4.1	Disrupção Intrínseca	20
2.4.2	Disrupção Térmica	21
2.4.3	Processos de erosão e envelhecimento	23
2.5	Considerações Finais	25
3	Comportamento de Cabos com Cobertura Isolante Frente a Sobretensões Impulsivas: Estado da arte.....	26
3.1	Introdução	26
3.2	Processos físicos envolvidos na falha de isolamento em cabos cobertos	27
3.2.1	Propagação do arco elétrico e fusão de condutores.....	27
3.2.2	Descargas parciais e acúmulo superficial de cargas.....	28

3.2.3	Influência da polaridade da tensão na suportabilidade de estruturas com cabos cobertos	30
3.3	Trabalhos experimentais envolvendo cabos com cobertura isolante no contexto desta dissertação.....	31
3.3.1	Lee et al. (1982).....	31
3.3.2	Nakamura et al. (1986).....	33
3.3.3	Darveniza (2000).....	38
3.3.4	Sekioka et al. (2008).....	40
3.4	Comentários Finais	41
4	Ensaio para o Estudo do Comportamento Impulsivo de Cabos Cobertos de Redes de Distribuição Compactas	43
4.1	Introdução	43
4.2	Estruturas e acessórios característicos da rede de distribuição compacta monofásica	44
4.2.1	Introdução.....	44
4.2.2	Definição da estrutura foco do trabalho	44
4.2.3	Principais acessórios utilizados na estrutura avaliada	45
4.3	Ambiente de Realização dos Ensaio	47
4.3.1	Gerador de tensão impulsiva	47
4.3.2	Divisor de tensão	52
4.3.3	Controlador e analisador de dados	54
4.3.4	Condições ambientais	55
4.4	Conceitos e parâmetros normalizados associados às ondas de tensão impulsivas utilizadas em ensaios para caracterização de suportabilidade frente a impulsos atmosféricos.....	56
4.4.1	Conceitos e parâmetros de interesse associados à onda de tensão impulsiva normalizada	56

4.4.2	Definição e caracterização de atrasos envolvidos na disrupção elétrica	58
4.5	Descrição dos ensaios realizados	59
4.5.1	Cabo nu	60
4.5.2	Cabo coberto	66
5	Resultados e Análises	72
5.1	Introdução	72
5.2	Ensaio com cabo nu	73
5.2.1	Introdução	73
5.2.2	Parâmetros de suportabilidade - U_{10} , U_{50} e U_{90}	73
5.2.3	Curva U_{xt}	75
5.3	Ensaio com cabos cobertos	77
5.3.1	Grupo 1 de ensaios - com remoção de cargas estáticas	77
5.3.2	Grupo 2 de ensaios - sem remoção de cargas estáticas	85
5.3.3	Comparação entre os resultados obtidos para os grupos 1 e 2 de ensaios: Efeito do acúmulo de cargas na cobertura isolante dos cabos	88
5.4	Efeito da cobertura isolante na suportabilidade elétrica do cabo: Uma comparação com dados referentes ao cabo nu	90
5.5	Comentários e discussões	92
5.5.1	Acúmulo de carga	92
6	Conclusões e Propostas de Continuidade	100
6.1	Considerações iniciais	100
6.2	Conclusões	101
6.3	Propostas de Continuidade	103
	Referências Bibliográficas	105

1 Introdução

1.1 Relevância da investigação

Os efeitos associados à ocorrência de descargas atmosféricas são capazes de causar danos importantes aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, resultando em falhas em sua operação, desligamentos não programados, danos a equipamentos e, conseqüentemente, prejuízos econômicos para as concessionárias de energia elétrica e seus consumidores.

Tais efeitos consistem, basicamente, na incidência direta de descargas sobre o sistema, que é responsável por injetar correntes na estrutura atingida, gerando sobretensões de amplitudes elevadas, e nas tensões induzidas pela incidência de descargas nuvem-solo próximas ao sistema elétrico. Neste último caso, os campos eletromagnéticos associados ao fluxo da corrente de retorno ao longo do canal de descarga são responsáveis pela indução de tensões no sistema de intensidade inferior aos surtos relativos às descargas diretas. Todavia, os distúrbios relativos às tensões induzidas apresentam uma frequência de ocorrência maior em sistemas de distribuição de energia, objeto de estudo desta dissertação (VISACRO, 2005; SILVEIRA, 2006).

De acordo com Souza (2015), no âmbito da concessionária CEMIG as principais causas de falhas no sistema de distribuição foram identificadas como sendo aquelas provocadas por descargas atmosféricas, por falhas em equipamentos e por contato da rede com árvores. A interrupção do fornecimento de energia resulta em prejuízos para consumidores e também em multas para as concessionárias.

Diante disso, o estudo do comportamento das redes de distribuição aéreas frente a descargas atmosféricas é matéria das mais relevantes ao proporcionar subsídios que possam contribuir para o estabelecimento de um fornecimento de energia de melhor qualidade por parte das concessionárias de energia elétrica.

O sistema de distribuição de energia primeiramente adotado no Brasil, e ainda presente, é composto basicamente por condutores aéreos nus, dispostos em isoladores

tipo pino ou pilar e fixados em cruzetas, tipicamente de madeira. Neste tipo de rede, conhecida como 'rede convencional', o condutor normalmente empregado é de alumínio e os isoladores são constituídos por vidro ou porcelana. Os condutores são espaçados de forma a se evitar o contato e formação de arco elétrico entre as fases. Configurações típicas desse tipo de rede são ilustradas nas Figuras 1.1 e 1.2.



Figura 1.1 Isolador tipo pino em uma rede de distribuição convencional.

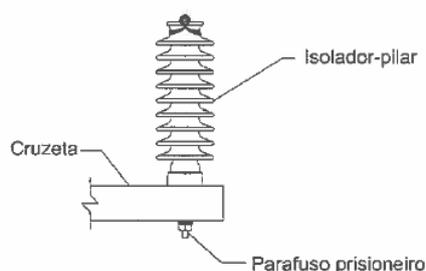


Figura 1.2 Isolador tipo pilar montado em cruzeta (NBR 15688, 2012).

Este tipo de rede, no entanto, apesar de sua vasta aplicação, apresenta um menor nível de confiabilidade no fornecimento de energia. Trata-se de um padrão que se encontra estagnado tecnologicamente, dificultando a sua expansão atual.

Desde meados da década de 1990, as concessionárias brasileiras vêm instalando em seus sistemas padrões de redes que consideram a substituição dos condutores nus por cabos com cobertura isolante, geralmente de polietileno reticulado - XLPE (ROCHA, 2002). Além disso, tais cabos são sustentados por espaçadores no formato de losango. Tais redes apresentam a denominação de redes de distribuição protegidas ou, mais recentemente, redes de distribuição compactas¹.

¹ Vale salientar que o termo "rede protegida" foi primeiramente empregado com o intuito de distinguir as redes de distribuição convencionais das redes nas quais os condutores apresentavam uma camada de proteção.

Apesar do maior custo de implantação das redes de distribuição compactas em relação ao padrão convencional, tais redes apresentam um custo global inferior, pois exibem menores custos de manutenção e operação. Além disso, segundo Rocha (2002), a utilização do padrão de redes compactas promove diminuição do número de desligamentos da linha, principalmente por proporcionar uma convivência mais harmoniosa com a arborização das cidades, em contraste com as redes convencionais. Todos esses aspectos têm tornado as redes de distribuição compactas uma opção atrativa para as concessionárias de energia elétrica.

O crescente uso das redes de distribuição compactas é exemplificado com dados da companhia energética de Minas Gerais (CEMIG), onde de um total de 36.300 km de linhas de distribuição urbana instaladas, 28% consistem em redes compactas (SOUZA, 2015).

A Figura 1.3 ilustra a rede compacta, bem como o condutor utilizado nessas redes.



a) Rede Compacta

b) Condutor protegido. (NTD, 2009)

Figura 1.3 Estrutura e condutor utilizados em redes compactas.

As redes aéreas compactas são caracterizadas pela utilização de condutores em alumínio envoltos por uma camada polimérica isolante, dispostos em isoladores e espaçadores. Os espaçadores também são formados por materiais poliméricos, geralmente polietileno reticulado ou polietileno de alta densidade (HDPE). Os espaçadores e cabos são sustentados por cabo de aço zincado, chamado cabo mensageiro.

Devido à presença de uma cobertura isolante é possível diminuir o espaçamento entre condutores, bem como reduzir a ocorrência de faltas devidas ao contato mecânico entre o condutor e árvores. Entretanto, não há um total confinamento do campo elétrico porque os condutores não são blindados. Nesse caso, é possível o fluxo de cargas no caso de contato com estruturas aterradas, o que pode levar à degradação da cobertura isolante com falha na cobertura do condutor a curto ou longo prazo. De acordo com Bouford (2008), a introdução de uma camada semicondutiva em cabos (normalmente utilizada em redes de tensão superior a 25 kV) proporciona um aumento da vida útil da cobertura, mesmo quando em contato com estruturas aterradas.

A avaliação do comportamento das redes aéreas frente às descargas atmosféricas requer o conhecimento e a caracterização da resposta dos seus componentes frente às sobretensões de natureza impulsiva. Os mecanismos de falha de isolamento em redes aéreas estão relacionados às características estruturais das redes (como materiais dos componentes, distâncias entre condutores e estruturas aterradas, etc.) e ao tipo de isolamento existente entre os condutores energizados.

Apesar de os mecanismos de falha de isolamento em redes dotadas de condutores nus serem bem conhecidos, a literatura não apresenta o mesmo grau de detalhamento em relação a redes que utilizam cabos com cobertura isolante, o que sugere a necessidade de uma melhor fundamentação a esse respeito. Dessa forma, com a crescente aplicação e utilização de redes de distribuição compactas, há uma necessidade de estudos dedicados à investigação do comportamento de estruturas que utilizam cabos com cobertura isolante frente às sobretensões impulsivas. Este estudo ganha importância ainda maior quando se considera que fenômenos não verificados em estruturas que utilizam cabos nus são presenciados quando empregados cabos cobertos, dentre os quais é possível destacar: ocorrência de descargas parciais, acúmulo de cargas estáticas na superfície externa do condutor, danos e perfurações à camada isolante (HE, 2008; SEKIOKA, 2008; NAKAMURA, 1986; LEE, 1982). É neste contexto que se insere essa dissertação de mestrado.

Em trabalhos anteriores, algumas estruturas de redes de distribuição compacta adotadas no Brasil já foram ensaiadas, avaliando-se a suportabilidade de cada uma dessas frente a impulsos de tensão. O projeto de pesquisa no qual a presente dissertação

de mestrado foi baseada proporcionou também a publicação de dois artigos (GOMES, 2015; LIMA, 2015b) e duas dissertações de mestrado relacionadas ao tema. Mais especificamente, Souza (2015) aborda o histórico de implantação das redes compactas no Brasil, visando ao estudo do comportamento de redes de distribuição compacta frente a impulsos de tensão, com a apresentação de melhorias em uma estrutura trifásica específica. Já o trabalho de Lima (2015a) objetiva avaliar a suportabilidade de estruturas monofásicas relevantes frente a impulsos de tensão de polaridade positiva e negativa. Além disso, Lima (2015a) também realiza ensaios de suportabilidade em cabos novos (não degradados) e cabos perfurados em razão de solicitações superiores à sua suportabilidade.

1.2 Objetivo

O objetivo fundamental desta dissertação de mestrado consiste no estudo do comportamento de cabos com cobertura isolante de redes de distribuição aéreas compactas frente a sobretensões impulsivas, buscando avaliar o papel desempenhado pela cobertura isolante no nível de isolamento dos cabos e seu impacto no desempenho de estruturas de redes de distribuição compactas em condições de aplicação no Brasil.

1.3 Metodologia de desenvolvimento

O desenvolvimento deste trabalho se iniciou com a pesquisa bibliográfica relativa aos fundamentos relacionados à falha de isolamento em meios isolantes de natureza gasosa e sólida. Além disso, buscou-se investigar na literatura trabalhos dedicados ao tema relativo à avaliação da suportabilidade de estruturas que utilizam cabos com cobertura isolante frente a sobretensões impulsivas. Este conjunto de desenvolvimentos iniciais forneceu subsídios relevantes para a realização de ensaios com ondas de tensão impulsivas características de sobretensões atmosféricas em cabos nus e cobertos. Os cabos são posicionados em estruturas de rede de distribuição compacta a fim de avaliar o comportamento e a influência da camada dielétrica nos níveis de suportabilidade da rede. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios e Desenvolvimento de Produtos (LCRExt) no prédio do LRC (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas) da UFMG.

Como referência para comparações, foram realizados inicialmente ensaios em estruturas com cabos nus utilizando-se procedimentos previstos na norma ABNT (2003) para obtenção de parâmetros como tensão disruptiva suportável (U_{10}), tensão de descarga disruptiva a 50% (U_{50}) e tensão de descarga disruptiva assegurada (U_{90}). Já os ensaios considerando estruturas com cabo coberto buscaram determinar a tensão suportável pela estrutura, considerando cabos com cobertura isolante com ou sem perfuração através de procedimentos de ensaio propostos pelo autor.

Vale destacar que as realizações desta dissertação de mestrado fazem parte de um projeto de pesquisa entre a CEMIG e o LRC/UFMG. Esse projeto, além de se propor a criação de um novo condutor, objetiva a determinação da suportabilidade de condutores e estruturas tipicamente empregadas em redes de distribuição compactas adotadas no país frente a sobretensões de origem atmosférica. Neste contexto, duas dissertações de mestrado já foram defendidas (SOUZA, 2015; LIMA, 2015a) e encontram-se em fase de conclusão a presente dissertação de mestrado e uma tese de doutorado.

1.4 Organização do texto

O texto desta dissertação de mestrado é dividido em 5 capítulos, incluindo a presente *Introdução*. No **Capítulo 2**, são apresentados fundamentos relativos aos mecanismos de falha de isolamento em meios isolantes gasosos e sólidos, a fim de se fornecer um panorama das diversas falhas às quais as redes compactas estão expostas.

No **Capítulo 3**, é apresentada uma revisão bibliográfica relativa à avaliação da suportabilidade de estruturas que empregam cabos com cobertura isolante. Busca-se também apresentar os principais fenômenos associados ao processo de disrupção em cabos cobertos.

No **Capítulo 4**, são apresentadas as estruturas e os acessórios característicos da rede de distribuição compacta monofásica, além da descrição do ambiente de realização dos ensaios, incluindo detalhes do gerador de impulso e das condições ambientais referentes aos ensaios realizados no contexto dessa dissertação de mestrado. Em seguida, são apresentados conceitos e parâmetros associados às ondas de tensão

impulsiva adotadas nos ensaios de suportabilidade. Este capítulo também apresenta uma descrição dos ensaios desenvolvidos para o estudo do comportamento impulsivo de cabos cobertos de redes de distribuição compactas.

Os resultados dos ensaios e análises de sensibilidade são apresentados no **Capítulo 5**

Por fim, o **Capítulo 6** apresenta as conclusões e propostas de continuidade deste trabalho.

2 Fundamentos da Falha de Isolamento

2.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos relativos à ocorrência de falhas de isolamento em meios gasosos e sólidos. Os fundamentos destes processos são descritos com vistas a prover elementos que possam subsidiar as análises referentes ao comportamento de cabos com cobertura isolante expostos a impulsos de origem atmosférica.

2.2 Tipos de isolamento

Os meios isolantes podem existir nos estados sólido, líquido ou gasoso. A suportabilidade dielétrica de um meio isolante é caracterizada por sua rigidez dielétrica, que se refere ao campo elétrico máximo suportável pelo meio isolante antes que ele se torne condutor. Quando um meio isolante é submetido a este valor de campo elétrico crítico, ocorre a chamada falha de isolamento. Esta falha pode ser presenciada como uma falha plena, na qual ocorre uma descarga disruptiva capaz de provocar um curto-circuito em partes energizadas, reduzindo-as praticamente à tensão zero, ou uma falha parcial do isolamento na qual ocorrem as descargas não-disruptivas e a tensão entre os condutores e as partes aterradas não é reduzida a zero. Como exemplos de falhas parciais têm-se: efeito corona (verificado em razão de uma intensificação do campo elétrico em meios gasosos), o fenômeno de arborescência (que acomete o interior de dielétricos sólidos), o trilhamento elétrico (oriundo de impurezas presentes superficialmente ao dielétrico sólido), as descargas parciais, dentre outros (KUFFEL, 2000 ; ABNT, 2013).

Basicamente, uma isolação pode ser classificada em externa ou interna. Um exemplo de isolação externa consiste no próprio ar situado externamente ao

equipamento ou sistema. A isolação externa é normalmente submetida a condições de intempéries, tais como raios ultravioletas (UV), chuva, variações térmicas, umidade, etc. A isolação do tipo interna é assim denominada em razão do seu confinamento no interior de equipamentos, reduzindo interferências atmosféricas. Este tipo de isolação pode ser sólida, líquida ou gasosa (HILEMAN, 1999).

Dentre as isolações do tipo gasosas, o ar é considerado um bom isolante, sendo também classificado como um meio autorregenerativo, ou seja, após a ocorrência de uma disrupção suas características elétricas não são alteradas. Em algumas aplicações, o ar é substituído por hexafluoreto de enxofre (SF_6), cuja principal característica é apresentar elevada eletroafinidade. No SF_6 , um elétron livre é rapidamente atraído por moléculas do gás evitando que o mesmo adquira energia suficiente para provocar uma disrupção no material.

Isolações sólidas são empregadas em situações nas quais se deseja uma maior capacidade de isolamento em conjunto com a necessidade de sustentação mecânica de cabos, tal como em redes aéreas de energia. Porcelana, vidro, plástico e polímeros são exemplos de materiais empregados nesse tipo de isolação. Além disso, os isolantes sólidos apresentam isolação não autorrecuperante, ou seja, na formação de uma descarga disruptiva nesses materiais sua composição é alterada em razão da elevada temperatura ou devido à transformação de elementos constituintes do material, podendo conduzi-lo à carbonização.

Como exemplo de isolação líquida pode-se citar a utilização de óleo no interior de transformadores que, além da função isolante, age como líquido de refrigeração circulante.

Em virtude do estudo desta dissertação de mestrado objetivar a determinação da suportabilidade de estruturas nas quais os meios dielétricos constituintes são sólidos (XLPE) e gasosos (ar), dar-se-á na próxima seção enfoque aos diferentes mecanismos de disrupção em meios gasosos e sólidos.

2.3 Mecanismos de Disrupção em gases

2.3.1 Considerações Iniciais

O desenvolvimento teórico relacionado à formação de descargas disruptivas em gases é mais bem documentado na literatura em relação aos processos que ocorrem em outros meios. As considerações tomadas para análise dos processos que ocorrem em meios gasosos consideram estes como sendo formados por moléculas esféricas de mesma massa, em um movimento contínuo e totalmente aleatório. As colisões entre tais moléculas são consideradas como elásticas, sendo a distância média entre as moléculas superior ao seu diâmetro. Nesta análise, desprezam-se as forças que possam surgir da interação entre as moléculas e as fronteiras da região analisada (KUFFEL, 2000).

Considerando a teoria cinética dos gases, uma colisão entre partículas pode ser elástica (na qual ocorre apenas a transferência de energia cinética) ou inelástica (na qual além da transferência de energia cinética ocorre a transferência de energia potencial) podendo resultar em processos de ionização, fotoionização e/ou deionização por ligação ou por recombinação. Esses processos são discutidos mais adiante no contexto deste trabalho, mas, de antemão, pode-se citar o processo de ionização através de colisão eletrônica como o mais propício a desencadear o mecanismo de avalanche e disrupção elétrica no meio gasoso.

Devido aos diferentes tamanhos dos átomos, íons, moléculas e elétrons, consideram-se dois tipos de colisões. A primeira, entre dois íons, e a segunda, entre um elétron e um íon, de forma a representar uma colisão entre duas partículas de elevada massa e a outra entre partículas de massas bem distintas, respectivamente. Tomando-se por base a relação desenvolvida em (KUFFEL, 2000, p. 293), na qual se relaciona a energia média transferida em função das massas das partículas envolvidas na colisão, verifica-se que, ao serem consideradas colisões elásticas entre partículas, apenas uma pequena parcela da energia cinética do elétron é convertida em energia cinética no íon. Em virtude da colisão, o elétron quase não apresenta alteração de sua velocidade. Em contrapartida, uma grande parcela de energia cinética é transferida ao se colidirem íons.

Já nas colisões inelásticas, quase a totalidade da energia cinética de um elétron pode ser convertida em energia potencial ao atingir uma partícula de maior massa. Caso a energia transferida seja superior ao potencial de ionização² (eV_i) do átomo ou molécula atingida, poderá ocorrer uma ionização.

Não se considera que todos os elétrons que possuam energia superior ao potencial de ionização da partícula atingida provoquem ionização. Por se tratar de um processo estatístico, pontua-se que o elétron que apresenta elevada energia tem maior probabilidade de ionizar o meio em questão.

A seguir são apresentados os processos relevantes na disrupção elétrica em gases, sendo eles a ionização, formação de *streamers* e o efeito corona.

2.3.2 Ionização

Considerando um gás submetido a um campo elétrico uniforme, os elétrons sofrerão influência desse campo, percorrendo um caminho livre médio³ na direção desse campo e eventualmente colidindo com partículas neutras. Caso haja uma transferência de energia superior ao potencial de ionização, o processo de ionização ocorrerá. Contudo, não havendo ionização, o elétron pode apenas excitar a partícula atingida, levando-a a um nível mais elevado de energia (KUFFEL, 2000).

Sendo instável esse estado mais energético da partícula, ela retornará ao seu estado inicial liberando energia na forma de fótons. Se a energia liberada através do fóton for suficiente para a ionização de outra partícula neutra, ocorre o processo chamado *fotoionização*. Entretanto, se a transferência de energia pelo fóton for inferior à necessária para ionização, ocorre o processo de *fotoexcitação* (KUFFEL, 2000).

Outros processos secundários de ionização podem ocorrer, tais como interação com metaestáveis⁴ e termo-ionização. O primeiro pode levar à ionização do meio

² Energia necessária para transformar um átomo neutro em um íon, despreendendo um elétron nessa transformação.

³ Distância média estatística correspondente à distância que uma partícula percorre entre colisões sucessivas. Essa distância é denominada caminho livre médio ($\bar{\lambda}$) e cada partícula apresenta uma distância diferente, dependente da concentração (N), raio e massa das partículas (KUFFEL, 2000).

⁴ Átomos metaestáveis são elementos que apresentam elétrons em elevados níveis de energia, apresentando energia potencial capaz de ionizar partículas neutras. Esse estado energético apresenta duração de poucos segundos e é conhecido como estado metaestável (KUFFEL, 2000).

gasoso após longos períodos de excitação e o segundo apenas torna-se significativo em temperaturas superiores a 1000 K (KUFFEL, 2000).

Objetivando identificar o processo de ionização em meios gasosos, conforme pontuado por Kuffel (2000), Townsend (1914) aplicou diversos valores de tensão entre um par de eletrodos planos e paralelos imersos em um gás e mediu a corrente resultante nos eletrodos. Em cada aplicação de tensão, estabeleceu-se um campo elétrico uniforme no meio gasoso. O comportamento medido relacionado à tensão aplicada e à corrente resultante é ilustrado na Figura 2.1.

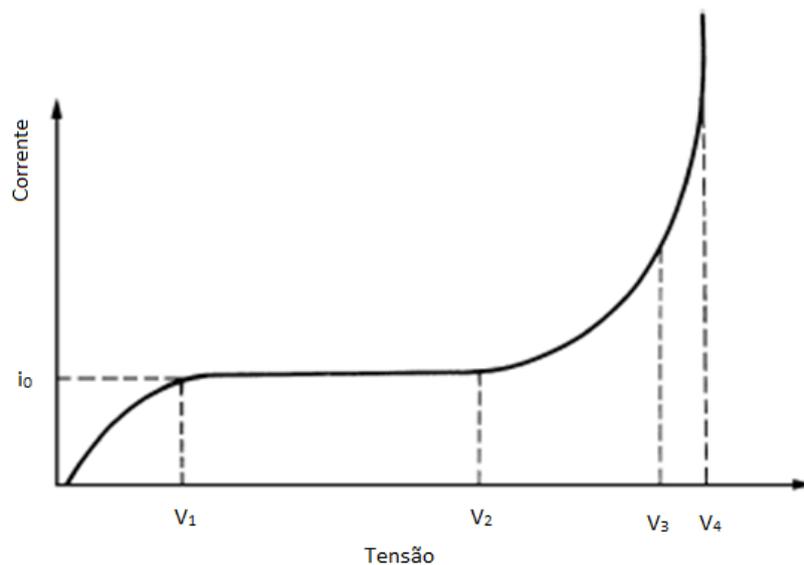


Figura 2.1 Relação tensão-corrente entre os eletrodos [Adaptado de (KUFFEL, 2000)].

Com base na Figura 2.1, entre a origem e o nível de tensão V_1 é observada uma relação quase proporcional entre tensão e corrente. No entanto, a elevação de tensão para o nível V_2 não promove aumento significativo de corrente, indicando um efeito de saturação (WADHWA, 2007). O aumento de tensão a partir de V_2 torna o campo elétrico intenso e os elétrons adquirem elevados níveis energéticos, refletindo um crescimento exponencial na relação tensão x corrente. Townsend (1914) associou esse crescimento à ionização do meio gasoso.

Considerando um número inicial de elétrons (n_0) imersos em um meio gasoso, ao serem submetidos a um campo elétrico uniforme estes são acelerados. Caso percorram a distância correspondente ao caminho livre médio de ionização (λ_i), ao colidirem com outras partículas podem causar ionização, fenômeno que resulta na liberação adicional

de elétrons. Após sucessivas colisões e ao percorrer uma distância total d , o número final de elétrons que atinge o anodo é equivalente a n_x . Esse processo é ilustrado na Figura 2.2 (KUFFEL, 2000).

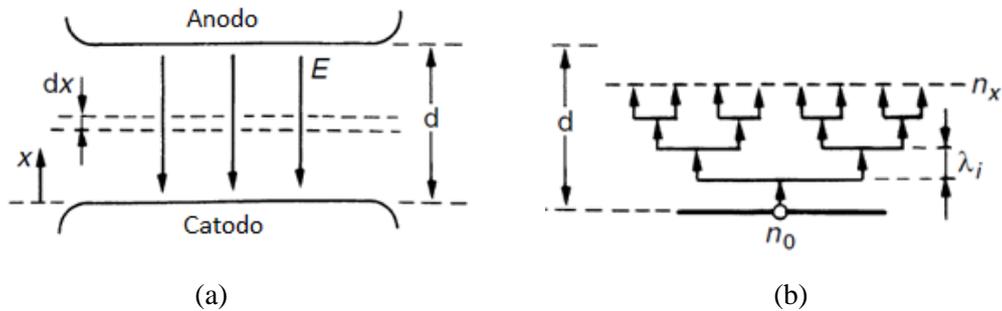


Figura 2.2 Avalanche eletrônica no meio gasoso. Configuração do gap imerso em um meio gasoso (a); Processo de avalanche eletrônica (b) [Adaptado de (KUFFEL, 2000)].

Sendo assim, o número de elétrons que percorre todo o meio gasoso, do catodo ao anodo, é calculado pela equação (2.1).

$$n_x = n_0 \cdot e^{\alpha d} \tag{2.1}$$

onde α é a constante conhecida como primeiro coeficiente de Townsend.

Em termos de corrente, considerando como I_0 a corrente que sai do catodo, a equação(2.1) torna-se:

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha d} \tag{2.2}$$

O termo $e^{\alpha d}$ é chamado de avalanche eletrônica e corresponde ao número total de elétrons produzidos por um único elétron ao viajar do catodo ao anodo.

O critério de ruptura dado por Townsend também classifica uma disrupção elétrica em não autossustentável (quando a interrupção da corrente inicial I_0 cessa a condução de corrente no meio) ou autossustentável (a interrupção da corrente I_0 não extingue o fluxo de corrente no meio) (KUFFEL, 2000).

A colisão do elétron com partículas neutras pode gerar íons de diferentes polaridades. Quando bombardeado por íons positivos, o catodo pode liberar uma

quantidade adicional de elétrons para o meio gasoso, contribuindo ainda mais para o processo de avalanche. Sendo assim, o catodo apresenta um importante papel na formação de descargas em meios gasosos, sendo fornecedor de elétrons para inicialização do processo disruptivo (KUFFEL, 2000).

Da mesma maneira que um elétron acelerado por um campo elétrico pode colidir com uma partícula neutra, ionizando-a, ele pode também ser atraído por cátions ou elementos eletronegativos. Quando o elétron é recombinado com átomos eletronegativos, o processo de recombinação é chamado *deionização por anexação (attachment)*. O processo de anexação de um elétron com cátions é chamado *deionização por recombinação*. A taxa de recombinação de um elétron é ponderada por um coeficiente de ligação (η), como pontuado por Kuffel (2000).

Vale ressaltar que os processos secundários de ionização desempenham também um papel fundamental no mecanismo de avalanche. Tais processos, além de considerar a energia necessária para a retirada de um elétron de um eletrodo e introduzi-lo em um meio gasoso, garantem a disponibilidade de elétrons livres de forma a contribuir para novos processos de avalanche. Sendo assim, além dos elétrons produzidos por ionização no meio gasoso, os elétrons retirados do anodo e a taxa de recombinação dos elétrons devem ser considerados no cálculo da corrente que flui através do gás (KUFFEL, 2000).

2.3.3 Formação de streamers

O mecanismo de avalanche proposto por Townsend não considera a modificação do campo elétrico no material isolante decorrente da presença de partículas carregadas. Representando as partículas carregadas por esferas, quando um elevado número dessas partículas está presente no meio, o campo elétrico por elas produzido afeta o campo elétrico resultante no material isolante, conforme ilustrado na Figura 2.3 (KUFFEL, 2000).

Na extremidade de uma avalanche eletrônica, o campo elétrico devido às partículas carregadas negativamente é intensificado em razão da maior concentração de elétrons. Com o maior acúmulo de cargas negativas, o campo elétrico nas proximidades do catodo é também intensificado, reforçando a ideia de que o catodo desempenha um papel importante na formação da descarga (KUFFEL, 2000).

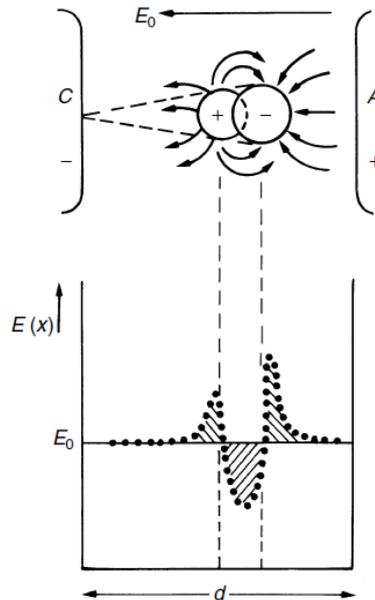


Figura 2.3 Influência de partículas carregadas imersas em um meio gasoso submetido a um campo elétrico externo E_0 (KUFFEL, 2000 p.326).

Considerando um pequeno número de partículas carregadas, a intensificação de campo é dada apenas em regiões próximas a essas partículas. Com o aumento dessas partículas, o campo elétrico por elas produzido é aumentado a ponto de se igualar ao campo aplicado externamente. Quando isso ocorre, é dado início o processo de formação de *streamers* (KUFFEL, 2000).

Streamers são, basicamente, canais ionizados que levam rapidamente à ruptura elétrica no material. O mecanismo que rege a formação de *streamers*, segundo Raether (1964), Loeb e Meek (1940) e descrito por Kuffel (2000), consiste na presença de um canal de avalanche com um elevado nível de ionização que precede a ocorrência de uma descarga elétrica.

Quando há a recombinação de elétrons e íons positivos, ocorre a liberação de fótons, sendo estes capazes de ionizar outras partículas, acelerando novos elétrons e liberando mais fótons. Como fótons se deslocam na velocidade da luz, esse processo é rapidamente desenvolvido e cria-se um caminho de condução entre as extremidades do canal ionizado.

A transição de avalanche para *streamer* é um processo complexo e pode ser baseado em dois mecanismos. O primeiro devido à velocidade de propagação de

elétrons e o segundo através da fotoionização resultante da avalanche (KUNHARDT e TZENG, 1988).

2.3.4 Formação de corona

Considerando-se a intensificação do campo elétrico associada à aplicação de uma tensão alternada, contínua ou impulsiva, verifica-se o aparecimento de regiões de intensa ionização nas quais são acumuladas cargas elétricas. Este fenômeno é denominado efeito corona (GOLDMAN e SIGMOND, 1982). O efeito corona ocorre em meios gasosos e constitui uma forma de descarga parcial⁵. Juntamente com o acúmulo de carga, normalmente dado em forma aureolar, outros efeitos se manifestam na presença de corona, como a emissão de luz, a geração de som audível e também de ruído na faixa de radiofrequência.

Em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, o efeito corona é observado localmente em regiões nas quais o campo elétrico é tão intenso que se torna capaz de romper a rigidez dielétrica do ar. A presença de pontas possui um papel importante na distorção e intensificação de linhas de campo elétrico. Normalmente, o brilho característico do efeito corona é observado com maior clareza em locais onde existe uma maior intensidade e/ou distorção desse campo.

O efeito corona é classificado levando-se em conta a forma da excitação que o gera, podendo ser impulsivo, alternado ou contínuo. Dependendo da polaridade da excitação aplicada, ocorrem variações nos eventos que antecedem a falha de isolamento. Coronas gerados por sinais impulsivos e contínuos são divididos em positivos (quando formados a partir de um anodo) ou negativos (formado nas proximidades do catodo) (TRINH e JORDAN, 1968).

Em coronas positivos, pequenas descargas se propagam radialmente em direção ao catodo, através dos chamados *onset streamers* ou *burst pulses* (GOLDMAN e SIGMOND, 1982). Essa evolução é transitória e caracterizada pela formação de um grande número de ramificações. Com a intensificação do campo elétrico, esses pequenos canais evoluem em passos a partir de extremidades presentes nos canais de

⁵ Descarga parcial é uma descarga elétrica localizada que envolve apenas parcialmente o isolante entre condutores e que pode ou não ocorrer entre condutores adjacentes. (IEC 60270, 2000)

descarga previamente formados. Terminada a atividade transitória, há o surgimento de um brilho nas proximidades do anodo, caracterizando o *glow* corona (KUFFEL, 2000; TRINH e JORDAN, 1968). Caso haja uma evolução do *streamer*, conectando o anodo ao outro eletrodo, ocorrerá uma ruptura total do meio, com transferência de carga entre as duas extremidades do canal de descarga. A Figura 2.4 mostra as etapas que antecedem a ruptura do meio dielétrico em uma configuração hemisfério-plano e relaciona a tensão em que os efeitos foram presenciados em função do espaçamento entre eletrodos ao se aplicar uma excitação contínua (KUFFEL, 2000).

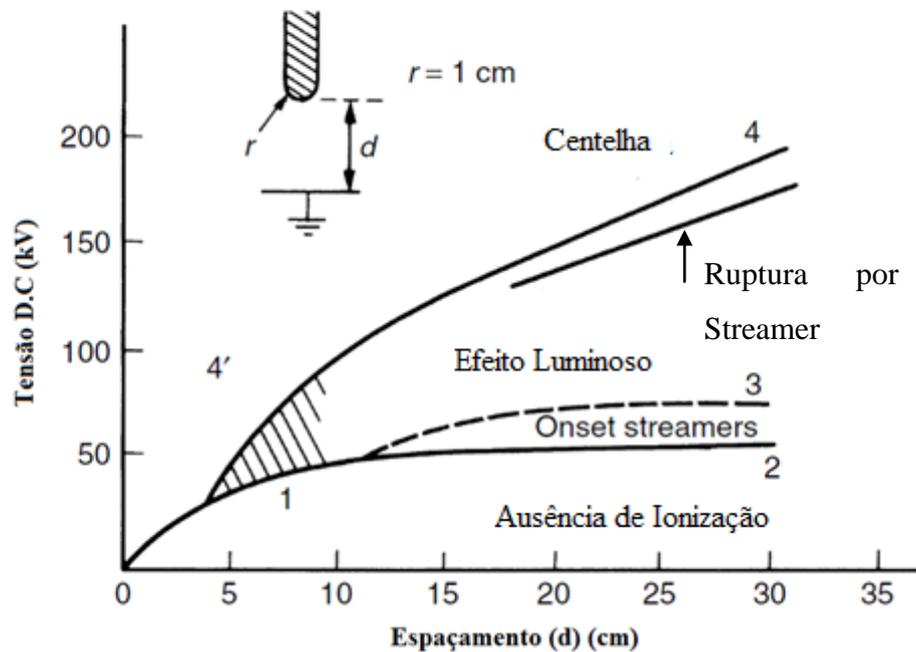


Figura 2.4. Etapas na evolução do corona positivo ao se aplicar tensão DC positiva em uma configuração plano-hemisfério [Adaptado de (KUFFEL, 2000)].

Coronas negativos são caracterizados pela presença de pulsos de corrente que antecedem o *glow* corona, nomeados pulsos Trichel devido ao seu descobridor. A frequência dos pulsos é determinada pela geometria do eletrodo, pela pressão ambiente e pela amplitude da excitação. Elevando-se a amplitude do sinal de excitação, verifica-se uma extinção dos trens de pulso e a formação de um brilho nas proximidades do catodo. Prosseguindo o aumento de tensão, é formado um *streamer* negativo que consiste na forma anterior à descarga elétrica. Trinh e Jordan (1968) afirmam que esse *streamer* apresenta uma componente contínua sobreposta por pulsos, de tempo de frente de aproximadamente 0,5 μ s. A Figura 2.5 ilustra as formações que antecedem a

disrupção do meio isolante em uma configuração esfera-plano, quando considerado um corona negativo.

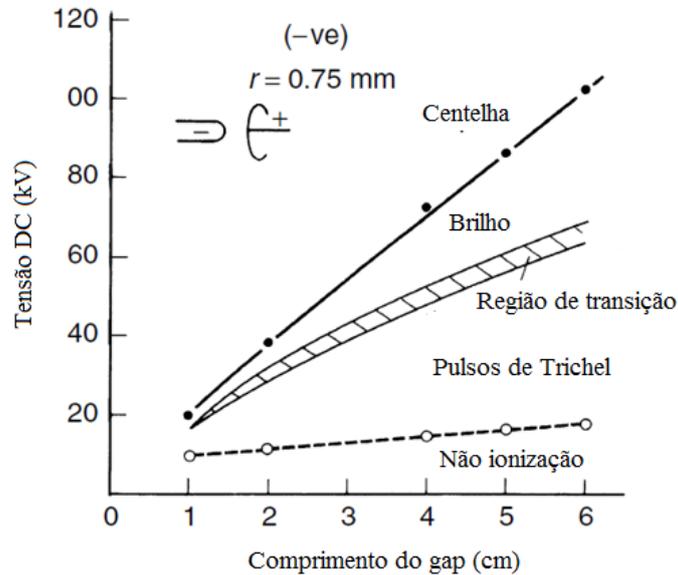


Figura 2.5 Etapas na evolução do corona negativo ao se aplicar tensão DC negativa em uma configuração plano-hemisférico [Adaptado de (KUFFEL, 2000)].

Diante do exposto, verifica-se uma relação entre a polaridade do impulso de tensão no qual um meio isolante é solicitado com eventos antecedentes à falha de isolamento. Tais eventos, seja na forma de brilho ou pulsos de tensão, proveem indicativos de que o meio isolante encontra-se próximo do limiar suportável pelo ar. Sendo assim, os processos de ionização no ar ajudam a explicar o efeito da polaridade da tensão na suportabilidade de estruturas de rede compacta quando ensaiadas com o emprego de cabos nus (meio autorregenerativo).

2.4 Disrupção em sólidos

No contexto da transmissão e distribuição de energia elétrica, materiais dielétricos sólidos são normalmente empregados para elevar o nível de isolamento entre as partes energizadas de um sistema, além de fornecer sustentação mecânica para os condutores. Considerando em específico as linhas de distribuição compactas, isoladores, espaçadores e a própria cobertura isolante do cabo constituem isolações sólidas imersas em um meio gasoso (ar). Com isso, torna-se essencial o conhecimento de mecanismos

capazes de provocar a disrupção elétrica de meios sólidos, além daqueles verificados em meios gasosos.

Quando se considera o ar como meio isolante, a disrupção não produz modificações nas propriedades elétricas e dielétricas do meio devido à sua abundância e ao constante deslocamento. Isso faz com que as características isolantes do ar permaneçam inalteradas após a ocorrência de uma disrupção. Entretanto, em isolamentos sólidos a disrupção elétrica leva a modificações em sua estrutura, provocando derretimento e/ou evaporação do material, contribuindo para a redução de sua suportabilidade. Desta forma, meios isolantes sólidos são caracterizados como não autorregenerativos (HILEMAN, 1999; O'DWYER, 1982).

Os mecanismos de falha que levam à disrupção elétrica em meios gasosos são bem definidos e consagrados (avalanche eletrônica e/ou formação de *streamers*). Entretanto, os processos que levam à disrupção em meios sólidos não estão muito bem consolidados na literatura. Apesar de existirem teorias capazes de explicar os mecanismos de disrupção em meios sólidos, essa área do conhecimento ainda está em processo de evolução e desenvolvimento. A maior dificuldade enfrentada na avaliação de falha em meios isolantes sólidos é justificada pelo envelhecimento e degradação que, inerentemente acometem tais dielétricos. Além disso, a presença da chamada corrente de polarização, que surge em razão da orientação de dipolos constituintes do material, impossibilita que instrumentos de medição convencionais diferenciem a corrente de condução e a corrente de polarização.

A disrupção elétrica em um dielétrico sólido está associada a diversos mecanismos, tais como disrupção intrínseca, eletromecânica, térmica, eletroquímica, trilhamento elétrico, arborescência e/ou descargas internas. Fatores como temperatura, umidade, duração e forma de onda de excitação, presença de impurezas, bolhas de ar, etc, influenciam no valor de suportabilidade do meio e devem ser analisados na condução do ensaio do material (WADWA, 2007; KUFFEL; 2000; RAJKUMAR, 2015). Nas próximas seções, apresenta-se uma discussão fundamental de alguns mecanismos que provocam a ruptura de dielétricos sólidos bem com a causa e efeito de cada um deles.

2.4.1 *Disrupção Intrínseca*

Do ponto de vista microscópico, o que difere um material condutor de um isolante é a presença de uma camada ou região proibida de energia, que exige dos elétrons elevados níveis de energia para migrar da banda de valência para a banda de condução (HAYT, 2003). Em um dielétrico puro, homogêneo, e em condições controladas de ensaio⁶, o nível de tensão suportável é dependente da composição do material e da temperatura à qual este está submetido. Tal nível de tensão está associado à disrupção intrínseca do material (RAJKUMAR, 2015; WADWA, 2007; KUFFEL; 2000). Entretanto, o nível de tensão característico de disrupção intrínseca é dificilmente atingido em condições normais de operação. Isso se deve ao fato de outros mecanismos de falha provocarem a ruptura do material antes da ocorrência da falha intrínseca (LUCAS, 2001).

A disrupção intrínseca, também chamada de puramente eletrônica, ocorre para a aplicação de tensões de curta duração (da ordem de 10^{-8} s) podendo ser provocada por dois mecanismos (RAJKUMAR, 2015; KUFFEL, 2000):

- Mecanismo puramente eletrônico: Submetendo-se o material isolante a campos elétricos intensos, caso o elétron adquira energia suficiente para migrar da banda de valência para a banda de condução, haverá um aumento do número de elétrons livres, podendo ocasionar uma disrupção elétrica no material.
- Avalanche ou *streamer*: De forma semelhante aos gases, elétrons livres são acelerados e, ao colidirem podem ser capazes de provocar ionização de outras partículas, liberando mais e mais elétrons até o ponto em que os processos sucessivos de avalanche ultrapassem um determinado valor crítico, resultando em uma falha de isolamento.

Em isolantes sólidos, é também possível a ocorrência da denominada disrupção eletromecânica. Com a aplicação de um campo elétrico externo, devido à polarização resultante no material, surgem forças eletrostáticas capazes de comprimi-lo, de forma a

⁶ Tensões de curta duração e maior estresse elétrico nas porções centrais do material em relação às bordas.

reduzir sua espessura. Caso a força de compressão seja superior à máxima compressão suportável pelo material, poderá ocorrer a ruptura mecânica do material (WADWA, 2007).

A Figura 2.6 ilustra os diferentes mecanismos de ruptura em função dos tempos típicos de ocorrência (KUFFEL, 2000).

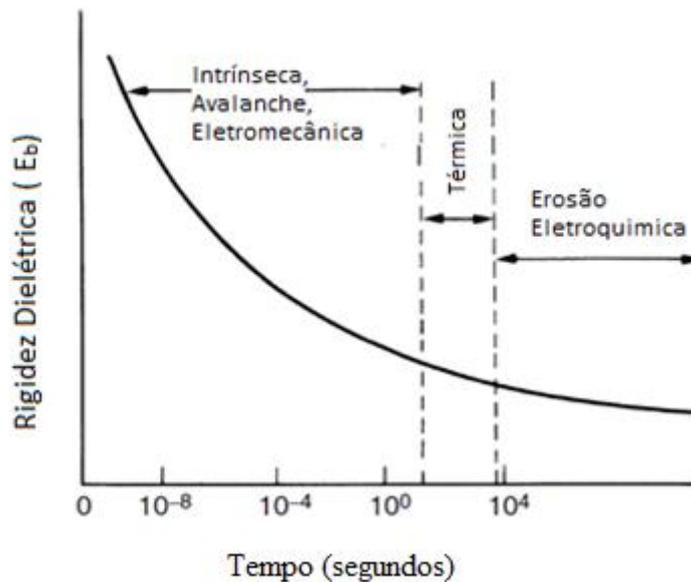


Figura 2.6 Mecanismos de falha em um isolante sólido [Adaptado de (KUFFEL, 2000)].

2.4.2 Disrupção Térmica

Devido à inexistência de dielétricos perfeitos (sempre há uma pequena corrente de condução e perdas devidas à polarização do material), quando dielétricos sólidos são submetidos a um campo elétrico, uma pequena corrente de condução é presenciada nesses meios. Com o movimento de elétrons fluindo pelo material, os mesmos colidem com estruturas maiores (moléculas constituintes do sólido). Essas colisões são capazes de elevar a temperatura e aumentar a condutividade do material (O'DWYER, 1982). Logo, a energia absorvida pelos elétrons em razão do campo externo é transferida para o material na forma de elevação de temperatura devido a perdas dielétricas e, caso a taxa de transferência de energia elétron-estrutura seja superior à taxa de dissipação do material para o meio externo (condutiva e radiativa), a temperatura do material é constantemente elevada a ponto de provocar uma ruptura térmica no material (RAJKUMAR, 2015; LUCAS, 2001).

Parâmetros elétricos como resistividade e ângulo de perdas caracterizam os materiais dielétricos. Entretanto, tais parâmetros podem sofrer variações em razão das condições físicas do dielétrico, principalmente em função da temperatura do material. A Figura 2.7 ilustra a ruptura elétrica em um material dielétrico como consequência do efeito térmico. Nessa figura, o calor cedido para o ambiente é representado por uma reta e o calor gerado no próprio material em virtude da aplicação de um campo externo (E) é representado por uma curva (justificada pela alteração da resistividade e ângulo de perdas com a temperatura), resultando em maior geração de calor dado o aumento da temperatura (LUCAS, 2001).

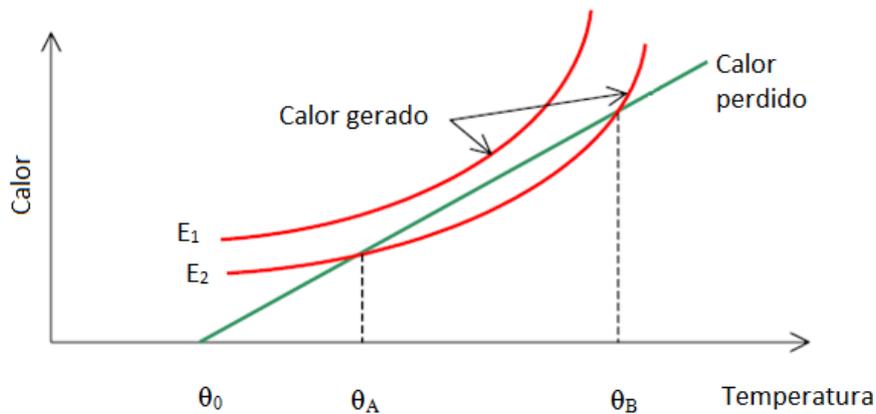


Figura 2.7 Ruptura térmica [adaptado de (LUCAS, 2001)].

Verifica-se que, ao ser aplicado um campo externo E_2 , a uma dada temperatura θ_A atinge-se o equilíbrio entre calor gerado e dissipado. Entretanto, acima da temperatura θ_B o calor gerado é superior ao calor dissipado, o que causa instabilidade térmica no material e o conduz à ruptura térmica. Aplicando-se campos elétricos de maior intensidade (E_1) não existe equilíbrio entre calor gerado e dissipado, sendo a temperatura do material elevada até que a ruptura ocorra.

Em se tratando de cabos característicos de uma rede compacta, a tensão máxima suportável pelo dielétrico não pode ser aumentada indefinidamente apenas com o aumento da espessura dielétrica. Existe um limite no qual, devido à condutividade térmica do material, camadas próximas ao condutor não são capazes de conduzir calor para regiões mais externas, provocando a elevação de temperatura do material. Por outro lado, se a espessura da camada isolante for muito fina, não haverá o isolamento requerido pelo sistema. No Brasil, a espessura mínima da camada isolante em função da classe de tensão em cabos cobertos por XLPE é exemplificada na Tabela 1.

Tabela 2.1 Espessura mínima da cobertura isolante XLPE (CEMIG, 2008).

Classe de tensão (kV)	Espessura da cobertura (mm)
15	3,0
25	4,0
35	7,6

2.4.3 Processos de erosão e envelhecimento

2.4.3.1 Descargas internas: Arborescência (treeing)

No processo de fabricação de estruturas isolantes, é passível a ocorrência de bolhas de ar no interior do material, como ilustrado na Figura 2.8. Essas bolhas podem facilitar o processo de ruptura dielétrica, o que pode ser melhor compreendido com o auxílio da Figura 2.9, que apresenta o circuito equivalente de um capacitor cujo dielétrico sólido contém uma cavidade contendo ar.

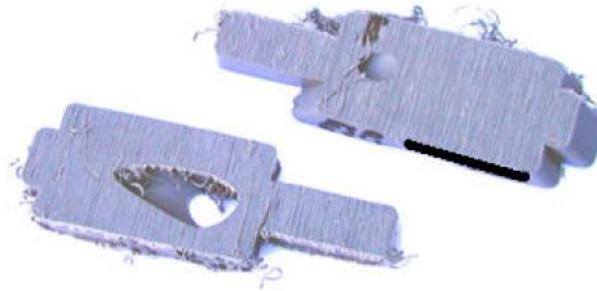


Figura 2.8 Bolhas no interior de um espaçador polimérico [adaptado de (FAGUNDES, 2008)].

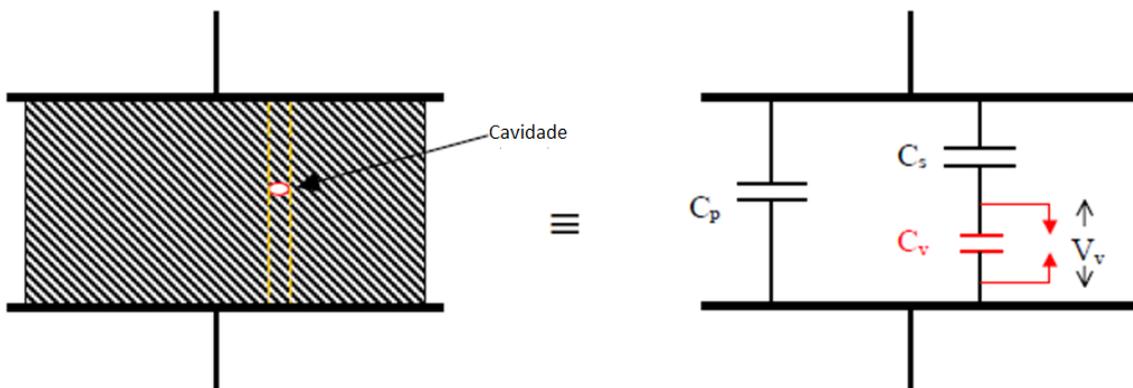


Figura 2.9 Circuito equivalente representativo de cavidades em dielétricos sólidos [adaptado de (LUCAS, 2001)].

Analisando o ramo série do circuito equivalente é possível se obter uma relação entre o campo elétrico entre os diferentes meios dielétricos (ar e sólido). De forma simplificada, considerando um capacitor de placas planas e paralelas e constantes dielétricas ϵ_s e ϵ_0 para a isolação sólida e para o ar, respectivamente, calcula-se a relação entre os campos elétricos existente nos dois meios como sendo:

$$E_{ar} = \epsilon_r \cdot E_{sólido} \quad (2.3)$$

onde E_{ar} é o campo elétrico na cavidade, $E_{sólido}$ é o campo elétrico no meio sólido, e ϵ_r é a permissividade relativa do meio sólido. Percebe-se, portanto, que o campo elétrico na cavidade de ar é mais intenso que o campo elétrico no sólido. Quando o campo elétrico no interior da cavidade for superior a um valor crítico, ocorrerão descargas no interior da cavidade, provocando uma elevação de temperatura em regiões vizinhas, levando a uma degradação do dielétrico sólido. Em condições normais de operação, o processo de degradação provoca redução da espessura do isolante, ocasionando a ruptura em dias ou até anos, dependendo da tensão à qual os cabos são submetidos (LUCAS, 2001; KUFFEL, 2000).

A arborescência é definida como um evento que antecede a falha de isolamento e sua evolução assemelha-se aos ramos de uma árvore. Esse fenômeno, pronunciado em isolamentos poliméricos, ocorre devido às regiões de maior estresse elétrico (impurezas ou cavidades presentes no volume dielétrico), que provocam a formação de descargas parciais (EICHHORN, 1990). Na ocorrência de uma descarga, estruturas que compõem o material são quebradas, criando um canal permanente que se propaga paralelamente ao campo externo aplicado. Essas descargas provocam erosão e redução da vida útil do dielétrico e consistem em um tipo de descarga parcial.

2.4.3.2 Descargas superficiais: Trilhamento elétrico (*Tracking*)

Quando expostos a intempéries, materiais dielétricos apresentam deposições de impurezas em sua superfície externa que, na presença de um gradiente de tensão, podem levar ao surgimento de uma corrente superficial. O fluxo dessa corrente pode ocasionar o aquecimento da cobertura isolante e a redução da condutividade no canal de condução (devido à evaporação local pelo aquecimento). Devido à descontinuidade provocada por esse canal de menor condutividade, ocorrerem descargas sucessivas capazes de

danificar a superfície dielétrica (RAJKUMAR, 2012; FAGUNDES, 2008). Em dielétricos orgânicos, tal como o XLPE, descargas superficiais provocam a carbonização do material, criando caminhos condutivos permanentes (LUCAS, 2001; PARKMAN, 1961). Esse fenômeno é conhecido como trilhamento elétrico.

Falhas por trilhamento não ocorrem somente na presença de tensões elevadas. Em alguns casos, o trilhamento é também presenciado com a aplicações de tensões de algumas dezenas de volts (PARKMAN, 1961). Além da presença de impurezas, outro mecanismo que pode contribuir para o trilhamento elétrico consiste na incompatibilidade dielétrica, ou seja, quando dois materiais dielétricos de permissividades distintas são empregados em conjunto e em contato. Devido à diferente distribuição do potencial elétrico, pode ser iniciado o processo de trilhamento na interface entre esses materiais (FAGUNDES, 2008).

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo, após a caracterização dos meios isolantes sólidos e gasosos e posterior definição de falha parcial ou completa do isolamento, foi realizada uma descrição sucinta dos principais mecanismos de falha nesses tipos de meio. Verificou-se que a suportabilidade dielétrica de um meio é influenciada por diversos fatores. Particularmente em isolamentos sólidos, a suportabilidade dielétrica depende de fatores adicionais, a citar: propriedades e características do material isolante, presença de cavidades internas no material, falhas no processo de fabricação e principalmente, processo de degradação e envelhecimento que acometem dielétricos sólidos. Uma combinação de todos esses fatores acarreta a redução da vida útil do isolamento sólido, resultando em falha de isolamento.

Neste capítulo, abordaram-se também os principais mecanismos de falha em meios isolantes sólidos e gasosos de um ponto de vista microscópico, provendo subsídios para caracterização das diferentes falhas isolantes que acometem cada um desses meios em termos macroscópicos e para determinação da suportabilidade de estruturas que empregam meios isolantes combinados, alvo das realizações dessa dissertação.

3 Comportamento de Cabos com Cobertura Isolante Frente a Sobretensões Impulsivas: Estado da arte

3.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo discutir aspectos relativos aos fenômenos e processos passíveis de ocorrência em cabos com cobertura isolante característicos de redes de distribuição compactas quando submetidos a sobretensões impulsivas.

A literatura apresenta poucos trabalhos dedicados ao estudo da suportabilidade de cabos cobertos frente a esse tipo de sobretensão. Referências como Lee et al. (1982), Nakamura et al. (1986), Darveniza (2000) e Sekioka et al. (2008) - destacam a existência e influência de fenômenos como descargas superficiais, descargas parciais e a existência de acúmulo de cargas na camada dielétrica desses cabos quando submetidos a sobretensões de caráter impulsivo.

Neste capítulo, são apresentados os principais processos físicos envolvidos na falha de isolamento em cabos cobertos. Além disso, são abordados trabalhos relevantes da literatura que norteiam o tema em estudo nesta dissertação.

3.2 Processos físicos envolvidos na falha de isolamento em cabos cobertos

As seções seguintes deste capítulo abordam trabalhos consagrados na literatura referentes ao estudo de fenômenos físicos comumente associados ao emprego de cabos com cobertura isolante submetidos a tensões impulsivas. Fenômenos como o mecanismo de propagação do arco elétrico em condutores, o acúmulo de cargas superficiais na cobertura isolante, a ocorrência de descargas parciais e a influência da polaridade da tensão impulsiva aplicada na suportabilidade são discutidos a seguir.

3.2.1 Propagação do arco elétrico e fusão de condutores

Sobretensões que surgem na rede devido a descargas atmosféricas intensificam o campo elétrico no entorno do condutor e em regiões onde há uma maior distorção de campo. Caso a sobretensão seja suficiente para causar uma ruptura, com perfuração da camada isolante do cabo, tem início a ocorrência de um curto-circuito sustentado pela tensão de frequência industrial. Este curto-circuito se manifesta na forma de uma corrente elétrica elevada que será interrompida após a atuação da proteção do sistema. Em cabos desprovidos de cobertura isolante, o arco elétrico é capaz de deslocar-se devido à ação de forças eletromagnéticas e dos ventos (LEE et al., 1982). Contudo, em cabos cobertos, o arco elétrico não é capaz de se mover em função da alta resistência na interface perfuração/cobertura. Nesse caso, toda a energia transferida pelo arco concentra-se em um único ponto, elevando a temperatura local, resultando na ruptura do condutor, como ilustrado na Figura 3.1 (LEE, 1982).

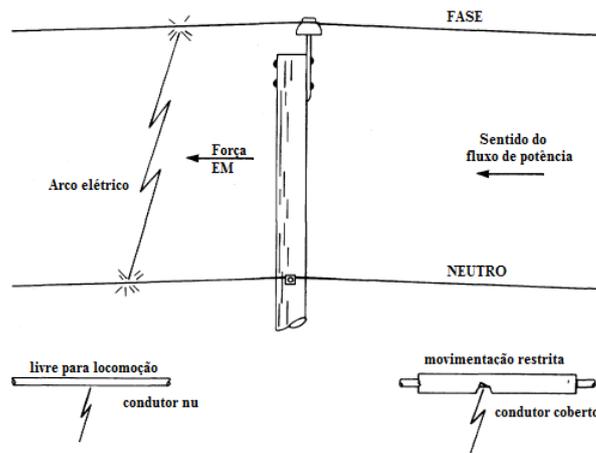


Figura 3.1 . Propagação do arco elétrico em frequência industrial [Adaptado de (LEE, 1982)].

Os ensaios laboratoriais conduzidos por Nakamura et al. (1986) levaram à conclusão de que, quando empregadas amarrações condutivas (cabo nu) ou com cobertura semicondutiva, verificava-se a formação de descargas parciais entre a região de amarração do cabo e estruturas aterradas do isolador anteriormente à perfuração do cabo. Em amarrações isolantes (plásticas ou cabos cobertos) era mais acentuado o acúmulo de cargas na região de fixação do cabo ao isolador. Esse maior acúmulo altera o comportamento do cabo mediante aplicações impulsivas de tensão, reduzindo a frequência de descargas parciais e elevando a tensão necessária para formação de descargas parciais e perfuração do cabo (NAKAMURA, 1986).

Portanto, fenômenos não verificados em ensaios com cabos nus surgem ao serem ensaiados cabos com cobertura isolante. Tais fenômenos consistem nas descargas parciais, no acúmulo de cargas e na perfuração da camada isolante, discutidos separadamente a seguir.

3.2.2 Descargas parciais e acúmulo superficial de cargas

Nakamura et al. (1986) e Sekioka et al. (2008) observaram fenômenos que antecedem a perfuração da cobertura isolante quando cabos cobertos, típicos das redes de distribuição compactas foram testados. O primeiro deles, presenciado em tensões impulsivas de menor amplitude, é dado por um acúmulo de cargas (em decorrência de efeito corona) em regiões nas quais o campo elétrico apresenta maior distorção - regiões do cabo próximas ao isolador e na base do isolador. Aumentando-se a amplitude da

tensão impulsiva, eram vistas, ao longo da cobertura isolante do cabo e nas proximidades do isolador, um brilho e ruído audível de baixas intensidades. A ocorrência de descargas parciais acarreta no acúmulo de cargas (de polaridade oposta ao impulso aplicado) nas proximidades da superfície isolante dos cabos, alterando tanto a suportabilidade de cabos cobertos quanto o comportamento na ocorrência de descargas disruptivas.

Na presença de descargas parciais, verificam-se reduções momentâneas na amplitude da forma de onda da tensão aplicada ao cabo, conectando momentaneamente estruturas aterradas à superfície isolante do cabo. Quando há uma descarga com energia para provocar perfuração da camada isolante, observa-se um arco elétrico de brilho intenso no ponto de perfuração, que conecta o condutor ao ponto aterrado mais próximo.

Um fator importante, que deve ser levado em consideração ao serem ensaiados cabos cobertos, refere-se ao comprimento do condutor empregado. Devido ao acúmulo de cargas sobre a cobertura isolante dos cabos, pode haver o prolongamento do arco elétrico de forma a tangenciar toda superfície isolante do cabo. Se o cabo testado em laboratório não for suficientemente longo, as descargas superficiais podem atingir a sua extremidade, levando a uma ruptura sem que ocorra uma perfuração em sua cobertura isolante. Com base em ensaios preliminares, determinou-se como 5 m o comprimento satisfatório de cabo para que houvesse redução do número de descargas disruptivas para a sua extremidade quando ensaiada a estrutura com impulsos de tensão de polaridade positiva e, 10 m quando ensaiado com impulsos de tensão de polaridade negativa. Apesar da adoção de 10 m de cabo para impulsos de polaridade negativa acarretar descargas disruptivas para a extremidade do cabo, tal comprimento não pôde ser acrescido em virtude do elevado espaço exigido e limitações impostas pelas dimensões do laboratório no qual foram realizados os ensaios. As descargas superficiais são influenciadas pelo acúmulo de cargas e pela distorção do campo elétrico nas extremidades do cabo. Por não existir uma padronização do comprimento do cabo a ser utilizado em ensaios de suportabilidade em cabos cobertos, este se torna um dos tópicos de investigação desta dissertação de mestrado, que busca determinar o comprimento do

cabo que evita (ou reduz significativamente) a ocorrência de descargas superficiais para a ponta do cabo.

3.2.3 Influência da polaridade da tensão na suportabilidade de estruturas com cabos cobertos

A realização de ensaios utilizando cabos nus em estruturas típicas de redes de distribuição compactas permite avaliar a influência da cobertura isolante dos cabos na suportabilidade dessas estruturas, além de representar uma condição referente à degradação total da camada isolante.

A tensão máxima suportável de uma estrutura depende tanto das características construtivas do isolador quanto da composição da cobertura isolante e da polaridade do fenômeno solicitante. Em ensaios com cabos nus realizados no contexto dessa dissertação de mestrado, verificou-se uma menor suportabilidade do sistema (cabo/isolador) quando considerados impulsos de tensão com polaridades positivas em relação à polaridade negativa.

Quando considerada a presença dos cabos cobertos, o sistema passa a ser composto por uma combinação de isolantes (cobertura do cabo e o ar). Nessa situação, para que haja o fluxo de uma corrente de falta no sistema, os diferentes meios isolantes devem sofrer ruptura. Ensaios conduzidos por Nakamura et al. (1986) e Sekioka et al. (2008) constataram uma maior suportabilidade de cabos cobertos mediante impulsos de tensão de polaridade positiva, resultado este oposto ao obtido para cabos nus. Resultado semelhante foi observado por Lima (2015a) em ensaios dedicados a avaliar a suportabilidade de estruturas de redes compactas frente a impulsos atmosféricos padronizados.

3.3 Trabalhos experimentais envolvendo cabos com cobertura isolante no contexto desta dissertação

3.3.1 *Lee et al. (1982)*

O trabalho de Lee et al. (1982) tem como foco o estudo de métodos capazes de prevenir a ruptura de condutores em redes de distribuição compostas por cabos cobertos pela ocorrência de sobretensões de origem atmosférica. À época da realização do trabalho foram observados nos Estados Unidos que com a instalação de redes de distribuição de cabos cobertos passou-se a verificar a frequente ruptura desses cabos, fato que não ocorria com a utilização de condutores nus. Análises identificaram que tais rupturas estavam associadas à concentração do arco elétrico associado a correntes de curto-circuito em 60 Hz em um único ponto.

Com o intuito de avaliar visualmente danos na cobertura isolante de cabos provocados por descargas parciais, Lee et al. (1982) conduziram testes de resistência elétrica na cobertura isolante de cabos. Tais testes consistiram na aplicação de tensões alternadas na frequência de 1440 Hz. Posteriormente, comparou-se o dano nesses cabos com aqueles provenientes de cabos retirados de operação da companhia de eletricidade da Pensilvânia, Estados Unidos (PP&L). Na Figura 3.2 são apresentados a forma de amarração do cabo ao isolador e os danos resultantes na camada isolante no cabo em decorrência do teste de resistência. Contudo, nenhuma das amostras retiradas de operação pela PP&L apresentou degradações semelhantes às obtidas nos ensaios de resistência às descargas parciais na região de amarração do cabo conduzidos por Lee (1982).

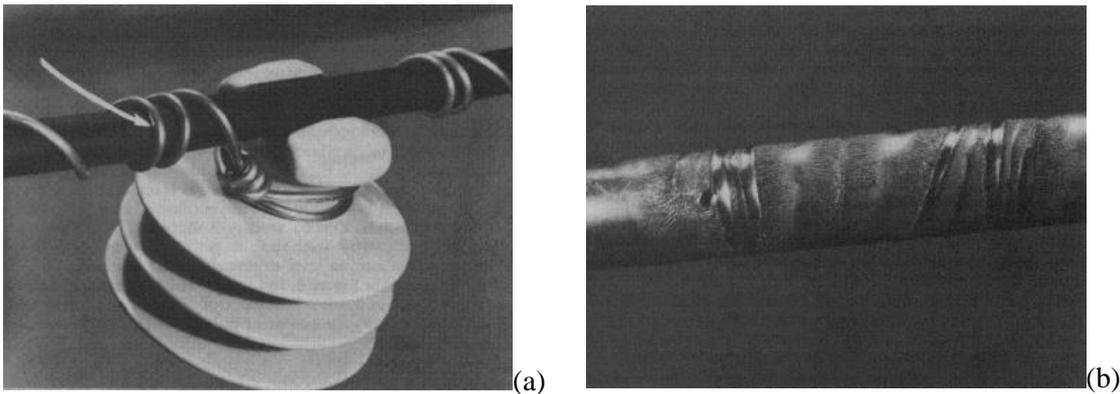


Figura 3.2 Experimentos envolvendo descargas parciais. Em (a) é dado ênfase ao gap de ar em que ocorrem as descargas parciais - interface entre amarração e cobertura isolante. Já em (b) é apresentado o resultado da aplicação do teste de resistência do cabo face às descargas parciais [Retirado de (LEE et al, 1982)].

Dados da época de realização do trabalho de Lee et al (1982) indicavam ser prática comum a remoção da camada isolante do cabo nas proximidades do isolador com o objetivo de mitigar a degradação da região por erosão e descargas parciais. A despeito desta medida, o derretimento da camada isolante pela estagnação do arco elétrico na fronteira cabo nu-cabo coberto em virtude de sobretensões atmosféricas era mantida, conforme ilustrado na Figura 3.3 (a).

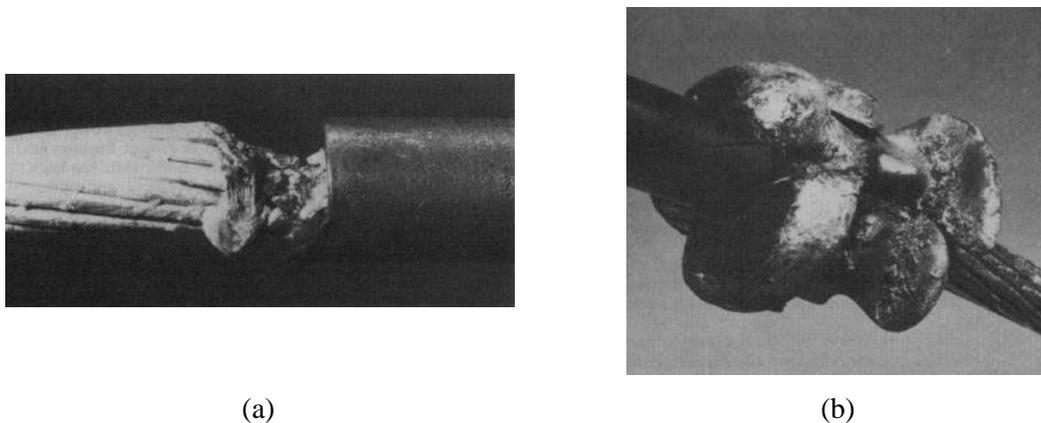


Figura 3.3 Cabos retirados de operação em virtude de arco elétrico. Em (a) é ilustrado o derretimento do condutor na interface cabo nu-cabo coberto. Já em (b) é ilustrado o dispositivo de proteção contra arco após a ocorrência do arco elétrico [Retirado de (LEE et al, 1982)].

Lee et al. (1982) propuseram a introdução de um dispositivo na interface cabo nu-cabo coberto capaz de suportar a intensa transferência de cargas provocadas pelo arco elétrico. Os dispositivos de proteção contra arco eram confeccionados em alumínio e instalados de forma a aumentar a massa do condutor na interface cabo nu-cabo coberto, suportando a transferências de cargas sem ocasionar derretimento do condutor propriamente dito, tal como mostrado na Figura 3.3.

Com os experimentos conduzidos por Lee et al. (1982) determinou-se a sobretensão de origem atmosférica como o principal processo desencadeador da degradação de cabos cobertos, com conseqüente perfuração e derretimento de condutores. Além disso, a remoção da camada isolante nas proximidades do isolador em conjunto com a instalação de dispositivos de proteção contra arcos mostrou ser medida eficiente para prevenção da ruptura de cabos cobertos.

3.3.2 Nakamura et al. (1986)

Nakamura et al. (1986) realizaram um conjunto de ensaios considerando dois diferentes isoladores empregados em redes de distribuição de 13,2 kV. Isoladores comuns e isoladores livres de radio interferência foram combinados com amarrações de quatro diferentes materiais e dois tipos de condutores (nu e coberto). A montagem isolador/conductor de amarração/cabo coberto é ilustrada na Figura 3.4.

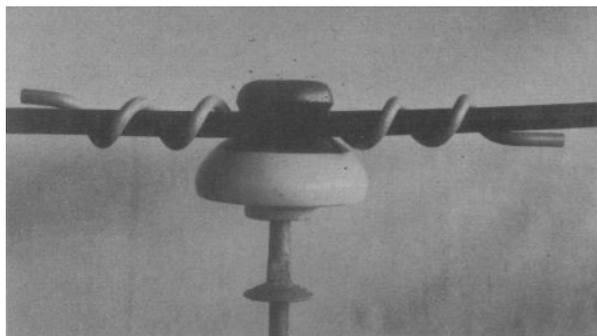


Figura 3.4 Montagem isolador/cabo de amarração[Retirado de (NAKAMURA et al., 1986)].

Totalizando oito diferentes configurações de isolador/amarração, Nakamura et al. (1986) investigaram cada configuração a fim de determinar qual delas seria a mais efetiva na redução do estresse elétrico e, por sua vez, menos propícia a desencadear o fenômeno de derretimento de condutores em virtude da formação de arco estacionário provocado por sobretensões no sistema, acarretando na ruptura e queda de cabos. Além disso, os fenômenos de descargas superficiais e descargas parciais foram investigados no tocante à falha de isolamento.

Os ensaios experimentais consideraram cabos de alumínio de comprimento de 1,22 m, seção transversal de 170,5 mm² e cabos cobertos em polietileno termoplástico

(PE) com comprimento aproximado de 1,22 m fixados em isoladores de classe 15 kV através de quatro amarrações, a citar:

- Amarração condutiva: Utilização de condutores de alumínio com 4,76 mm de diâmetro;
- Amarração semicondutiva: Conductor pré-formado em policloreto de vinila (PVC) de diâmetro 9,5 mm e camada semicondutiva de 0,76 mm de espessura);
- Amarração isolante: Conductor de alumínio com diâmetro 4,76 mm e camada isolante em PE de 1,5 mm de espessura.
- Amarração Plástica: Condutores pré-formados de PVC com diâmetro 11,1 mm.

O procedimento inicial de ensaio proposto pelo autor consistiu na aplicação de impulsos de tensão (1,2/50 μ s) partindo-se do nível de 90 kV, com 10 impulsos por nível (sem realização de remoção de cargas), com a subsequente elevação da tensão em passos de 10 kV até a ocorrência de uma descarga disruptiva.

Quando aplicados impulsos de tensão de baixa intensidade, Nakamura constatou a formação de corona em regiões de intenso estresse elétrico. Quando empregadas amarrações condutivas, o aumento da amplitude do impulso de tensão dava início à formação de descargas parciais. Essas descargas acarretaram na formação de arco elétrico entre a camada isolante do cabo e o pino de montagem do isolador, resultando em alterações na forma de onda da tensão aplicada com consequente queda abrupta de sua amplitude. Prosseguindo a elevação do módulo da tensão impulsiva acima do nível em que se verificavam descargas parciais, poderia ocorrer disrupção do material isolante, resultando em danos e perfurações.

De forma geral, praticamente não foram constatadas por Nakamura descargas parciais anteriores à perfuração da camada isolante do cabo quando empregadas amarrações isolantes ou plásticas, independentemente da polaridade da tensão impulsiva aplicada. Vale destacar que os fenômenos de descarga parcial e descarga superficial estão associados à existência de acúmulo de cargas na superfície isolante do cabo

coberto. Este fato aponta para o importante papel desempenhado pelo acúmulo de cargas em eventos anteriores à disrupção elétrica.

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 são apresentados os resultados dos ensaios realizados por Nakamura. Nessas tabelas, estão contidas as tensões médias que levaram a estrutura testada a uma disrupção quando considerados os dois tipos de isoladores e as diferentes amarrações empregadas. A condição ambiental durante a realização dos ensaios foi de umidade relativa entre 30-40% e temperaturas entre 20-23,8 °C.

Tabela 3.1 Tensões disruptivas médias obtidas para a estrutura testada considerando o isolador tipo livre de rádio interferência [Adaptado de (NAKAMURA et al. (1986)].

<i>Polaridade</i>	<i>Tipo de Amarração</i>			
	<i>Condutiva (kV)</i>	<i>Semicondutiva (kV)</i>	<i>Coberta (kV)</i>	<i>Plástica (kV)</i>
Positiva	184	185	188	206
Negativa	174	184	179	172

Tabela 3.2 Tensões disruptivas médias obtidas para a estrutura testada considerando o isolador comum [Adaptado de (NAKAMURA et al. (1986)].

<i>Polaridade</i>	<i>Tipo de Amarração</i>			
	<i>Condutiva (kV)</i>	<i>Semicondutiva (kV)</i>	<i>Coberta (kV)</i>	<i>Plástica (kV)</i>
Positiva	170	185	187	212
Negativa	173	185	162	181

Com base nos resultados, verifica-se menor suportabilidade do conjunto cabo/amarração frente a impulsos de tensão de polaridade negativa. Avaliando a polaridade do impulso de tensão aplicado, uma diferença pouco significativa foi observada quando empregada amarração do tipo semicondutiva ou condutiva. A maior diferença de suportabilidade entre impulsos de tensão de diferentes polaridades é vista quando empregadas amarrações plásticas. Com aplicação de impulsos de tensão com polaridade positiva foi obtida tensão suportável 19,7% superior em relação ao resultado referente a impulsos de polaridade negativa para isoladores do tipo livre de rádio interferência e tensão suportável 17,1% superior em relação à aplicação de impulsos de polaridade negativa quando analisado isoladores comuns.

Posto isto, o acúmulo de cargas na região isolador/amarração pode ser considerado uma possível causa para os diferentes valores de suportabilidade quando empregados cabos de amarração plásticos ou cobertos.

3.3.2.1 *Localização das disrupções*

Outro fator analisado por Nakamura consistiu na identificação do ponto de perfuração da camada isolante. De maneira sucinta, para isoladores do tipo livres de rádio interferência, o emprego de amarrações condutivas ou semicondutivas acarretou no prolongamento do arco elétrico para porções mais distantes do isolador. Por outro lado, ao serem adotadas amarrações plásticas ou cobertas, a perfuração do cabo dificilmente ultrapassava a região delimitada pelo comprimento da amarração empregada.

Para isoladores comuns e amarrações condutivas, semicondutivas ou isolantes, aproximadamente 80-85% das descargas ocorreram em distâncias não superiores ao comprimento da amarração e, em 100% dos casos, houve disrupção em comprimentos não superiores ao cabo de amarração quando empregada amarração plástica. Este fato foi associado ao maior estresse elétrico entre o isolador e a amarração, proporcionado pelo isolador de pino empregado.

3.3.2.2 *Influência do acúmulo de cargas na disrupção elétrica*

A fim de se avaliar a influência do acúmulo de cargas em eventos antecedentes à falha de isolamento, Nakamura et al. (1986) realizaram ensaios considerando a remoção das cargas acumuladas no cabo após cada aplicação de tensão impulsiva, por meio de uma escova condutiva aterrada. Estes ensaios consideraram amarrações do tipo semicondutiva e plástica. As tensões disruptivas médias obtidas com a remoção de cargas encontram-se resumidas nas Tabela 3.3 e 3.4 para cada isolador ensaiado.

Os ensaios mostraram que, a não remoção de cargas para amarrações isolantes ou plástica, independente do tipo de isolador ensaiado, resultou no aumento expressivo da suportabilidade do conjunto cabo/isolador frente a impulsos de polaridade positiva (em torno de 27%). Essa mesma análise para impulsos de polaridade negativa indicou aumento máximo de 16% na suportabilidade do conjunto.

CAPÍTULO 3 COMPORTAMENTO DE CABOS COM COBERTURA ISOLANTE FRENTE A
SOBRETENSÕES IMPULSIVAS: ESTADO DA ARTE

Tabela 3.3 Resumo das tensões disruptivas médias obtidas para o isolador livre de rádio interferência com e sem a consideração do acúmulo de cargas na suportabilidade [Adaptado de (NAKAMURA et al. (1986)].

<i>Polaridade</i>	<i>Tipo de Amarração</i>			
	<i>Semicondutiva - com remoção de cargas (kV)</i>	<i>Semicondutiva - sem remoção de cargas (kV)</i>	<i>Plástica - com remoção de cargas (kV)</i>	<i>Plástica - sem remoção de cargas (kV)</i>
Positiva	194	185	162	206
Negativa	173	184	160	172

Tabela 3.4 Resumo das tensões disruptivas médias obtidas para o isolador comum com e sem a consideração do acúmulo de cargas na suportabilidade [Adaptado de (NAKAMURA et al. (1986)].

<i>Polaridade</i>	<i>Tipo de Amarração</i>			
	<i>Semicondutiva - com remoção de cargas (kV)</i>	<i>Semicondutiva - sem remoção de cargas (kV)</i>	<i>Plástica - com remoção de cargas (kV)</i>	<i>Plástica - sem remoção de cargas (kV)</i>
Positiva	170	185	168	212
Negativa	154	185	156	181

O ensaio com o emprego de amarrações semicondutivas e aplicações impulsivas de tensão de ambas as polaridades resultou em tensões suportáveis médias superiores para o isolador tipo livre de radio-interferência em relação ao isolador comum quando realizada a remoção de cargas. Avaliando-se o acúmulo de cargas em amarrações semicondutivas nota-se que, independente da polaridade e tipo de isolador, a suportabilidade do conjunto isolador/cabo foi semelhante quando não foram removidas as cargas.

3.3.2.3 Principais Conclusões

O trabalho realizado por Nakamura et al. (1986) representou uma quebra de paradigma no tema suportabilidade de estruturas de redes de distribuição que possuem cabos com cobertura isolante. Os resultados apontaram a existência de fenômenos e comportamentos distintos dos normalmente observados em cabos nus.

O primeiro ponto que merece destaque refere-se à menor suportabilidade de estruturas com cabos cobertos quando submetidas a impulsos de polaridade negativa de

tensão, comportamento diametralmente oposto ao apresentado em estruturas com cabos nus.

Outro fator de relevância consiste no acúmulo de cargas que se faz presente na superfície de cabos cobertos após aplicações de impulsos de tensão. O acúmulo de cargas foi constatado após a ocorrência de descargas não-disruptivas, no qual apenas o ar é rompido. Além disso, o acúmulo de cargas influencia a suportabilidade da estrutura ensaiada.

Mais um aspecto analisado por Nakamura et al. (1986) consistiu na investigação da influência do tipo de material empregado para amarração do cabo com o isolador na suportabilidade da estrutura. Essa investigação levou à conclusão de que o material adotado na amarração impacta tanto na suportabilidade da estrutura quanto na ocorrência de descargas parciais no ar, que por sua vez, influencia o acúmulo de cargas ao longo do cabo. Em ensaios que consideraram amarrações não condutivas (plásticas ou isolantes) o acúmulo de carga alterou significativamente o comportamento do isolamento, reduzindo a ocorrência de descargas parciais e elevando o nível de tensão para a ocorrência da falha de isolamento.

3.3.3 *Darveniza (2000)*

O trabalho de Darveniza (2008) teve como objetivo investigar a distribuição de cargas ao longo da cobertura isolante de cabos cobertos frente a sobretensões. Para isso, os ensaios realizados consideraram dois condutores com seção transversal de diâmetro de 14 mm, comprimento de 2 m e camada isolante em XLPE de 6 mm, ortogonalmente dispostos e distantes de 3 a 22,5 mm. Tal disposição visou caracterizar processos desencadeados pelo contato ou proximidade entre cabos fase ou entre fase e estruturas aterradas quando sujeitos a sobretensões. A disposição dos condutores nos ensaios é ilustrada na Figura 3.5.

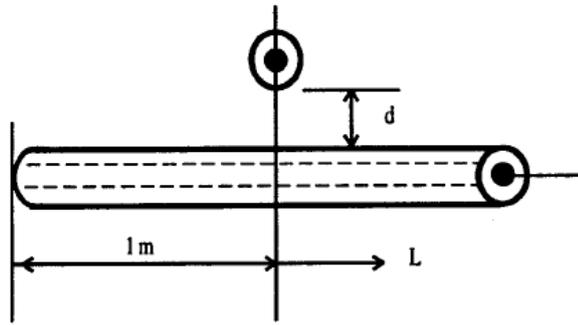


Figura 3.5 Disposição dos condutores nos ensaios. O parâmetro d consiste na distância entre os condutores (3 a 22,5 mm) e L a distância até o centro do cabo (DARVENIZA, 2008).

Os ensaios consideraram aplicações de tensões impulsivas e tensões contínuas. A aplicação da tensão no condutor foi acompanhada da medição de descargas parciais e da localização das cargas acumuladas por meio de um instrumento localizador de cargas eletrostáticas. Tal instrumento permitia a medição da magnitude da carga e identificação de sua polaridade.

O primeiro teste conduzido por Darveniza (2008) consistiu na determinação do menor valor de tensão no qual eram verificadas descargas parciais (no gap de ar) associadas a impulsos de tensão de polaridades positiva e negativa. Além disso, investigou-se a influência do espaçamento entre os condutores (de 3 a 22,5 mm). O ensaio era iniciado em um nível de tensão inferior ao esperado como suportável, sendo aplicados 25 impulsos por nível de tensão. Em seguida, utilizava-se o localizador de cargas para averiguar a existência de cargas na superfície isolante dos cabos. Não foram constatadas cargas acumuladas nos cabos para impulsos suportados pela configuração. No entanto, quando da ocorrência de descargas parciais, cargas foram prontamente detectadas na cobertura isolante dos cabos.

Na maioria das amostras, a tensão exigida para provocar novas descargas parciais era acrescida de 25 a 40% em relação ao nível de tensão que proporcionou a primeira descarga parcial (considerando impulsos de mesma polaridade). Darveniza (2008) associou esse comportamento ao papel desempenhado pelo acúmulo de cargas na modificação do campo crítico entre condutores.

Outro conceito importante frisado por Darveniza consistiu na dependência estatística das amostras ensaiadas em virtude do acúmulo de cargas após a aplicação de

tensão nos cabos cobertos. Tal processo modifica a suportabilidade do cabo, alterando a característica da amostra para a aplicação de impulsos posteriores. Com os ensaios, também foi possível monitorar a distribuição e a intensidade das cargas acumuladas, que se mostraram capazes de criar potenciais eletrostáticos superiores a 5 kV entre a cobertura isolante dos dois cabos. As cargas acumuladas apresentaram maior concentração junto ao ponto de cruzamento dos dois cabos, dispersando-se em distâncias superiores a 30 cm a partir desta região.

O módulo das cargas medido ao longo da cobertura XLPE se tornou mais intenso conforme a elevação da tensão impulsiva aplicada. Além disso, uma maior distribuição de cargas ao longo da cobertura isolante foi verificada com o aumento de amplitude do impulso de tensão.

Sendo assim, o trabalho de Darveniza desempenha papel importante na compreensão dos processos associados à localização e distribuição de cargas estáticas que se acumulam em virtude de sobretensões aplicadas em cabos cobertos. Ademais, em ensaios envolvendo cabos cobertos é sugerida a remoção de cargas após cada aplicação de tensão a fim de garantir independência estatística em virtude do acúmulo de cargas que se faz presente.

3.3.4 *Sekioka et al. (2008)*

Sekioka et al. (2008) conduziram experimentos em estruturas de linhas de distribuição dotadas de cabos cobertos a fim de se caracterizar os eventos associados à falha de isolamento quando uma descarga atmosférica incide diretamente nos cabos de blindagem ou no poste de concreto.

Os experimentos consistiram na aplicação de impulsos de tensão em uma cruzeta, a fim de representar descargas incidentes diretamente nessa estrutura. Um cabo de 40 m de comprimento e seção transversal de 60 mm² com cobertura em polietileno foi adotado como padrão para ensaios de cabos cobertos. O cabo teve suas extremidades aterradas e, em sua posição central, amarrado a um conjunto isolador mais cruzeta. Os ensaios consideraram a remoção de cargas acumuladas na superfície isolante do cabo após a realização de cada teste.

Sekioka et al. (2008) identificaram a falha de isolamento como sendo a composição de dois fenômenos: o primeiro relativo ao surgimento de um arco elétrico que conecta a cruzeta à superfície isolante dos cabos, com descargas superficiais ao longo destes, e o segundo associado à disrupção elétrica que perfura a camada isolante.

Nos testes, descargas elétricas no isolador foram acompanhadas pela iluminação de todo o cabo, conforme Figura 3.6(a). Quando a energia transferida pelo arco foi suficiente para provocar a perfuração da camada isolante, verificou-se a iluminação ao longo do cabo acompanhada de maior iluminação na região de perfuração. Esse maior brilho é associado à falha de isolamento, efeito este relacionado à concentração de energia em uma pequena região, indicando possível perfuração no local, conforme Figura 3.6 (b).



Figura 3.6 Exemplos de descargas elétricas. Em (a) verifica-se a disrupção elétrica no isolador juntamente com a descarga superficial no cabo; em (b) verifica-se uma descarga perfurante no cabo coberto [Adaptado de (SEKIOKA et al, 2008)].

3.4 Comentários Finais

Com base nos trabalhos anteriormente apresentados é possível obter uma visão geral dos fenômenos associados ao emprego de cabos com cobertura isolante, bem como a existência de diferentes suportabilidades consoante à polaridade do impulso de tensão no qual a estrutura é submetida ou em razão de diferentes materiais utilizados para amarração do cabo à estrutura. Diferentemente de cabos nus, tanto a avaliação de suportabilidade da estrutura quanto os cuidados necessários para o ensaio de cabos com cobertura isolante devem ser mais criteriosos pois, a existência de fenômenos adicionais altera o comportamento da amostra.

Além da existência de algumas peculiaridades associadas ao ensaio de cabos cobertos (acúmulo de cargas, perfurações na camada isolante), permanecem

questionamentos quanto a outros fatores, tais como o procedimento de ensaio para caracterização da suportabilidade da estrutura, o comprimento de cabo a ser ensaiado, a forma de remoção de cargas acumuladas, dentre outros. Diante disso, os próximos capítulos dessa dissertação objetivam apresentar dos procedimentos de ensaio adotados pelo autor e também utilizados por Lima (2015a), seguidos dos resultados obtidos para cada um dos tipos de ensaios realizados.

4 Ensaaios para o Estudo do Comportamento Impulsivo de Cabos Cobertos de Redes de Distribuição Compactas

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a descrição dos ensaios laboratoriais para investigar o comportamento de cabos com cobertura isolante frente a sobretensões impulsivas padronizadas, objeto de estudo desta dissertação de mestrado. Os principais parâmetros de interesse para o desenvolvimento dos testes, bem como os procedimentos previstos em norma para obtenção de parâmetros relativos ao isolamento do sistema, são apresentados a seguir. Para dar suporte a tais desenvolvimentos, este capítulo também apresenta a descrição dos principais equipamentos utilizados para realização dos ensaios. Estes foram desenvolvidos no Laboratório de Ensaaios e Desenvolvimento de Produtos (LRCExt) do LRC, localizado no campus da UFMG. As estruturas e acessórios característicos das redes de distribuição compacta são também apresentados buscando melhor entendimento dos testes realizados no âmbito desta dissertação de mestrado.

4.2 Estruturas e acessórios característicos da rede de distribuição compacta monofásica

4.2.1 Introdução

Conforme descrito anteriormente, as redes de distribuição compactas são constituídas por cabos com cobertura polimérica que têm como função reduzir as correntes de curto-circuito que possam surgir caso haja um contato acidental do cabo com objetos aterrados. Além disso, a presença desta cobertura proporciona uma redução no espaçamento entre condutores, permitindo menor distância desses cabos em relação a outros sistemas tais como sistemas de telecomunicação, ou aumento do número de circuitos em um mesmo poste. Apresentando um custo inicial de implantação 15% superior comparado com redes convencionais, as redes de distribuição compactas exibem, em um intervalo de aproximadamente 3 anos, uma redução total de custos (implantação e operação) em torno de 22% (ROCHA, 2002). Essa redução se faz presente em função de taxas de desligamento significativamente inferiores comparadas com aquelas das redes convencionais, além da redução da frequência de podas, dentre outros aspectos (ROCHA, 2002).

No âmbito da CEMIG e de acordo com Souza (2015), aproximadamente 28% das redes de distribuição em áreas urbanas são do padrão de rede compacta, correspondendo a uma extensão em torno de 10.430 km. Operando em sua maioria na tensão de 13,8 kV, as redes de distribuição aéreas são as que apresentam um custo de implantação mais atrativo, sendo aproximadamente seis vezes inferior ao custo de redes subterrâneas (ROCHA, 2002).

4.2.2 Definição da estrutura foco do trabalho

Ensaio foram realizados contemplando diversas estruturas monofásicas e trifásicas, todas comumente utilizadas pelas concessionárias de energia em suas redes de distribuição compactas. No entanto, como esta dissertação objetiva o estudo do comportamento de cabos com cobertura isolante frente às sobretensões impulsivas, elegeu-se a estrutura monofásica (CM2), ilustrada pela Figura 4.1, como foco para o

desenvolvimento e apresentação das análises de suportabilidade. Uma visão geral das estruturas monofásicas empregadas em redes compactas pode ser encontrada em (LIMA, 2015a).

A escolha de uma estrutura do tipo monofásica, apesar de ser menos utilizada na área de concessão da CEMIG, se justifica pelo fato de esse tipo de estrutura apresentar uma topologia mais simples em comparação com as estruturas trifásicas, que possuem três posições para alocação dos condutores fase. Além disso, a definição da estrutura CM2 é também justificada pelo fato desta estrutura apresentar a menor suportabilidade elétrica dentre as estruturas monofásicas disponíveis, de acordo com resultados de ensaios realizados ao longo do desenvolvimento desta dissertação e também documentados em (LIMA, 2015a).



Figura 4.1 Estrutura CM2.

4.2.3 Principais acessórios utilizados na estrutura avaliada

4.2.3.1 Isolador polimérico de Pino

A Figura 4.2 ilustra o isolador de pino comumente utilizado nas redes de distribuição compactas e empregado na estrutura CM2. O material deste isolador é o polietileno de alta densidade (HDPE) e sua fixação à estrutura é feita por um pino de sustentação. Já os condutores são amarrados no topo ou nas laterais do isolador por meio de anéis de amarração confeccionados em silicone. O isolador aplicado se refere à classe de tensão de 15 kV, apresentando uma tensão suportável ao impulso atmosférico de 110 kV (CEEE, 2011).



Figura 4.2 Isolador de pino.

4.2.3.2 *Anel de amarração*

Confeccionados em material elastomérico, também conhecido como silicone ou borracha, os anéis de amarração são utilizados para a fixação do condutor ao isolador de pino. O anel de amarração é ilustrado na Figura 4.3.



Figura 4.3 Anel de amarração.

4.2.3.3 *Braço suporte tipo "L"*

O braço suporte tipo "L", ilustrado na Figura 4.4, é instalado em postes circulares e tem como função, na estrutura CM2, sustentar o isolador de pino. Essa ferragem é também empregada em estruturas trifásicas com a função de sustentação do cabo mensageiro no qual são conectados espaçadores losangulares.



Figura 4.4. Braço suporte tipo "L".

4.3 Ambiente de Realização dos Ensaios

Os ensaios que geraram os resultados desta dissertação foram realizados no LRCExt, localizado no prédio do LRC (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Com uma área de 77 m², o laboratório possui um gerador de tensões impulsivas, do fabricante Haefely (2011), capaz de gerar ondas de tensão características de fenômenos atmosféricos e de operações de manobra em redes elétricas.

Basicamente, o gerador de impulsos é constituído por três grandes partes, sendo elas o circuito gerador de tensão impulsiva, o divisor de tensão capacitivo e o controlador e analisador de dados, descritos a seguir.

4.3.1 Gerador de tensão impulsiva

O circuito gerador de tensão impulsiva consiste no modelo proposto por E. Marx (KUFFEL, 2010). Neste modelo, diversos capacitores são carregados seguindo uma associação paralela e descarregados seguindo uma associação série. Com isso, a tensão de descarga corresponde à soma das tensões individuais de cada capacitor. Os tempos de frente e de meia onda do sinal impulsivo de tensão são funções dos valores de capacitância e de resistência dos resistores de frente e de cauda. O circuito descrito é apresentado na Figura 4.5.

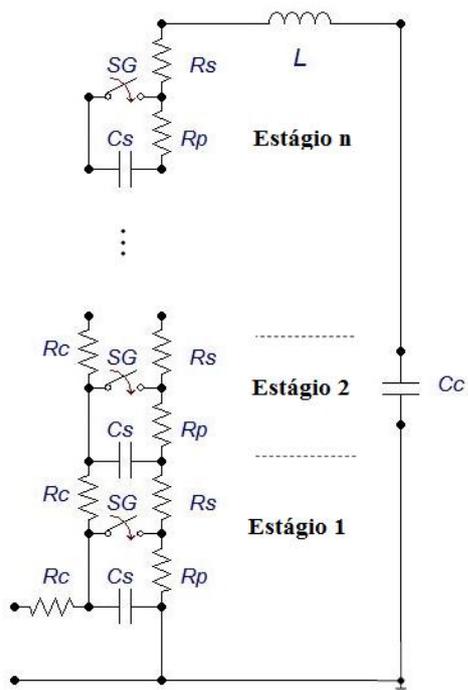


Figura 4.5 Circuito multiplicador tipo Marx.

Na Figura 4.5, os parâmetros descritos correspondem a:

- Cs: Capacitância de cada estágio
- Rs: Resistor de frente, ou série.
- Rp: Resistor de cauda, ou paralelo.
- Rc: Resistor de carga.
- Cc: Capacitância total (objeto de teste, divisor e capacitâncias parasitas).
- L: Indutância do circuito de teste.
- SG: Gap

O gerador é ilustrado na Figura 4.6.



Figura 4.6 Gerador de tensão impulsiva tipo Marx. Modelo SGS-600/30.

Após a retificação do sinal alternado fornecido pelo sistema de alimentação, os capacitores C_s são carregados através dos resistores de carga, R_c . Finalizada a carga dos capacitores de forma a gerar a tensão de descarga selecionada pelo operador, o controlador emite um sinal de trigger, que é amplificado ao nível de 12 kV, formando um arco elétrico que conecta os hemisférios condutores do gap do primeiro estágio, ilustrado na Figura 4.7.

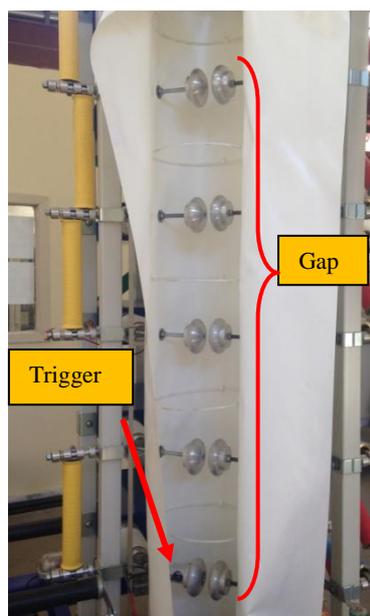


Figura 4.7 Gap de esferas

Em seguida, os sucessivos gaps passam a estar submetidos às sobretensões advindas do carregamento dos capacitores de estágios anteriores, o que intensifica o campo elétrico local até que ocorra a ruptura do ar nos gaps de cada estágio utilizado. O espaçamento do gap é automaticamente ajustado pelo controlador conforme a tensão impulsiva determinada pelo operador.

Por fim, todos os capacitores são conectados em série ao objeto sob teste, inclusive os resistores de frente e de cauda. O circuito equivalente a n estágios do gerador é ilustrado na Figura 4.8.

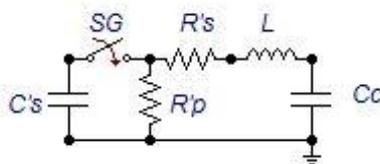


Figura 4.8 Circuito Equivalente a n estágios

A definição dos parâmetros do circuito está descrita a seguir:

$C's$: capacitância total.

$R's$: resistência série total.

$R'p$: resistência paralelo total.

L : indutância do circuito de teste (incluindo gerador e objeto de teste).

Cc : capacitância total (objeto de teste, divisor e capacitâncias parasitas).

Os parâmetros $C's$, $R's$ e $R'p$ são definidos como:

$$C's = \frac{Cs}{n} \quad (4.1)$$

$$R's = n * Rs \quad (4.2)$$

$$R'p = n * Rp \quad (4.3)$$

onde n é o número total de estágios do gerador utilizados. As indutâncias presentes tanto no circuito do gerador quanto no objeto de teste são representadas por L . De forma a simplificar a análise a seguir, o efeito indutivo será desconsiderado no cálculo da resposta temporal da tensão no objeto sob teste. A Figura 4.9 ilustra o circuito simplificado para a obtenção da tensão no objeto a ser ensaiado.

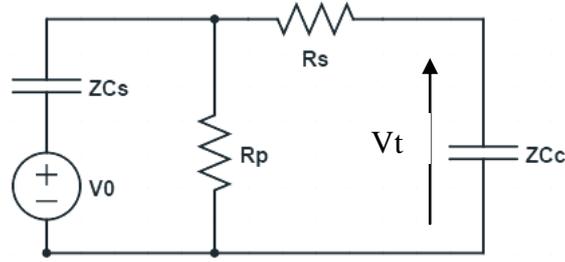


Figura 4.9 Circuito Simplificado

Sendo V_0 a carga inicial do capacitor C_s e aplicando-se a lei de Kirchhoff no circuito da Figura 4.9, têm-se a seguinte equação no domínio de Laplace:

$$V_t = \frac{R_s R_p Z C_c}{R_s^2 R_p + R_s^2 Z C_s + R_s R_p Z C_s + R_s R_p Z C_c + R_s Z C_s Z C_c} \times V_0 \quad (4.4)$$

Substituindo-se as impedâncias capacitivas por suas expressões correspondentes no domínio de Laplace e efetuando algumas manipulações algébricas, obtém-se:

$$V_t = \frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R_p C_s} + \frac{1}{C_s R_s} + \frac{1}{R_s C_c} \right) s + \frac{1}{R_s R_p C_s C_c}} \times \frac{V_0}{R_s C_c} \quad (4.5)$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace à equação (4.5), obtém-se o resultado de V_t no domínio do tempo:

$$V_t = \frac{V_0}{k(\alpha_2 - \alpha_1)} [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}] \quad (4.6)$$

Onde

$$k = R_s C_c$$

$$\alpha_1 = -\frac{\left(\frac{1}{R_p C_s} + \frac{1}{R_s C_s} + \frac{1}{R_s C_c} \right)}{2} - \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{R_p C_s} + \frac{1}{R_s C_s} + \frac{1}{R_s C_c} \right)^2}{4} - \frac{1}{R_s R_p C_s C_c}} \quad (4.7)$$

$$\alpha_2 = -\frac{\left(\frac{1}{R_p C_s} + \frac{1}{R_s C_s} + \frac{1}{R_s C_c} \right)}{2} + \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{R_p C_s} + \frac{1}{R_s C_s} + \frac{1}{R_s C_c} \right)^2}{4} - \frac{1}{R_s R_p C_s C_c}}$$

Sendo assim, a resposta do circuito gerador é representada pela combinação de duas ondas exponenciais, como determinado pela ABNT (2013), de forma que a onda lenta terá maior influência no tempo de meia onda e a onda rápida, no tempo de frente.

Na configuração do gerador para a geração de impulso atmosférico, cada estágio do circuito gerador possui um capacitor de 1 μF , uma resistência paralela (R_p) de 68 Ω e uma resistência série (R_s) de 12 Ω . O gerador presente no laboratório contém 6 estágios, com uma tensão máxima de 100 kV por estágio, sendo capaz de gerar tensões impulsivas com valor de pico de até 600 kV (HAEFELY, 2011).

4.3.2 Divisor de tensão

O circuito para medição de tensão é constituído por um divisor de tensão capacitivo com um resistor de amortecimento conectado em sua extremidade superior, conforme ilustrado na Figura 4.10 (HAEFELY, 2011).



Figura 4.10 Divisor de tensão capacitivo

O primário do divisor de tensão é formado por dois capacitores a óleo conectados em série, cada um com capacitância de 1000 pF. A fim de garantir que a onda de tensão impulsiva apresente tempos de frente e cauda dentro das tolerâncias

normativas, o divisor capacitivo também deve ser inserido no sistema, pois sua capacitância foi computada em projeto (HAEFELY, 2011).

4.3.2.1 Esquema de conexão de alta tensão

A conexão entre o circuito gerador de impulso de tensão e o objeto ensaiado é feita utilizando-se uma fita resistiva de 500Ω , com valor reduzido de indutância. Do ponto de vista do circuito equivalente, ilustrado na Figura 4.8, a resistência relativa à fita resistiva situa-se anteriormente ao capacitor C_c e sendo vista como uma resistência de frente. Essa cordoalha deve ser inserida no circuito global de modo a garantir os valores característicos de uma onda impulsiva de tensão padronizada como atmosférica. A ligação entre o terminal da fita resistiva e o divisor de tensão é feita utilizando-se uma cordoalha com largura de 1,7 mm e espessura de 0,85 mm, aproximadamente. O esquema de conexão de alta tensão do gerador de impulsos, do divisor capacitivo e do objeto sob teste é ilustrado na Figura 4.11 e 4.12.

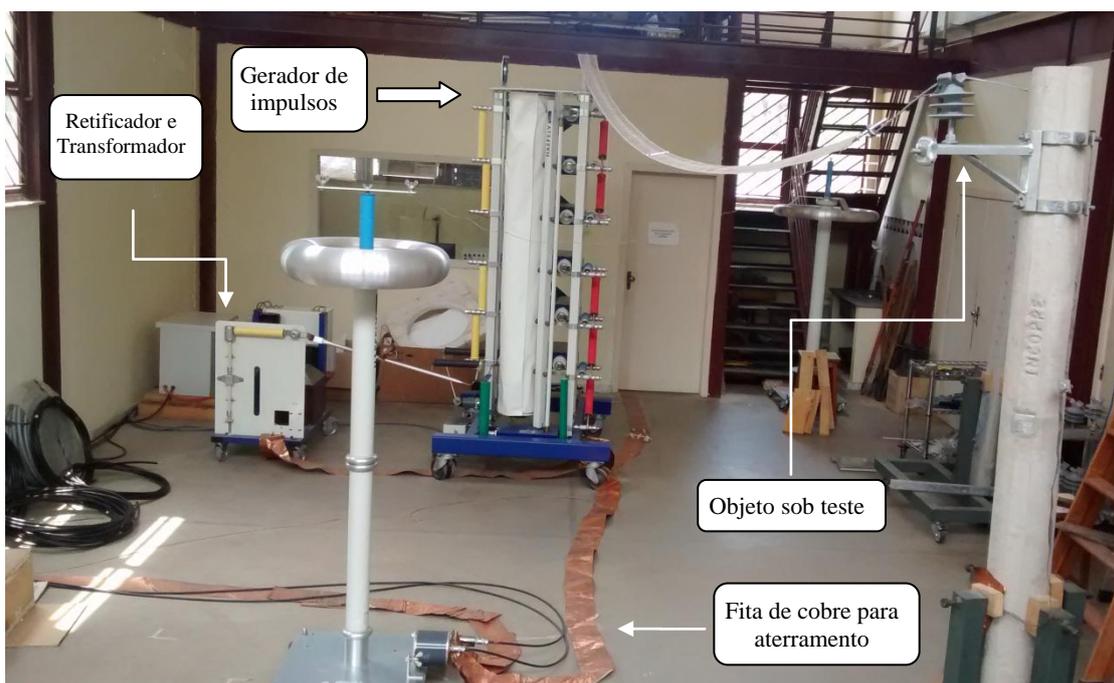


Figura 4.11 Esquema de alta tensão e de aterramento [Adaptado de (LIMA, 2015a)].

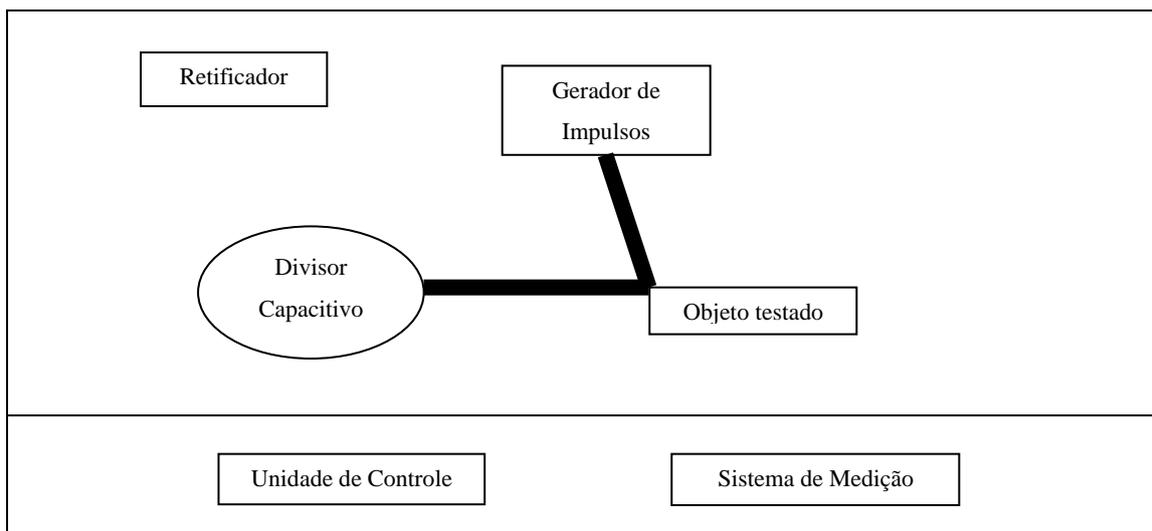


Figura 4.12 Esquema de conexão de alta tensão [Adaptado (HAEFELY, 2011)].

4.3.2.2 Esquema de conexão do aterramento

Todos os subsistemas são aterrados com uma fita de cobre de (150 x 0,3 mm) utilizando-se o menor caminho entre eles. O esquema de aterramento adotado é o ilustrado na Figura 4.13. A fita de cobre encontra-se conectada ao sistema de aterramento do prédio.

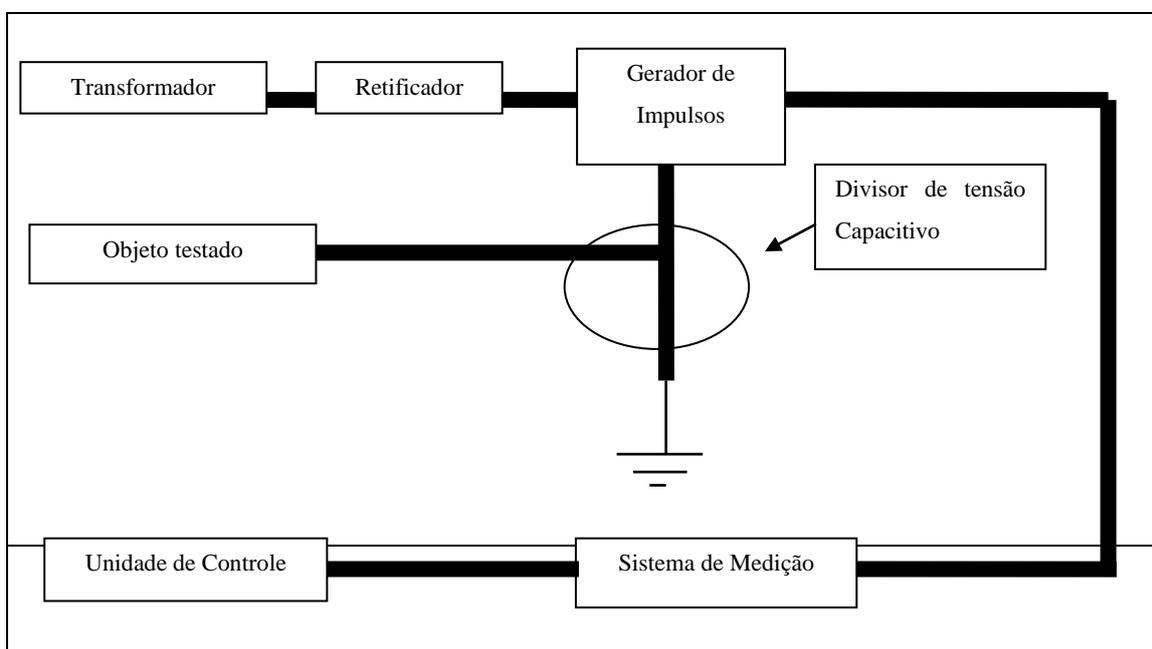


Figura 4.13 Esquema de aterramento utilizado [Adaptado (HAEFELY, 2011)].

4.3.3 Controlador e analisador de dados

O controlador (GC 223) e o sistema de análise e registro de dados (DiAS 733), ilustrados na Figura 4.14, estão instalados na sala de controle do laboratório de alta

tensão. Parâmetros como valor de pico, forma de onda da tensão impulsiva (impulso atmosférico ou impulso de manobra) e o espaçamento do gap - quando necessário, são ajustados no controlador. Além da necessidade de se programar o controlador com o número de estágios a se utilizar, o operador deve inserir no gerador de impulsos os resistores de cauda e frente referentes a cada estágio. Essa prática garante a correta operação e o cálculo da eficiência dos impulsos de tensão aplicados. Os registros de cada impulso de tensão são feitos em um computador dedicado e integrado ao DiAS 733.

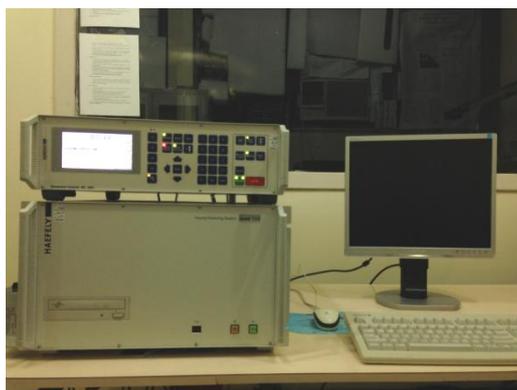


Figura 4.14 Sistemas de controle, análise e registro da HAEFELY.

4.3.4 Condições ambientais

As condições ambientais nas quais os ensaios são realizados são medidas por um termo-higrômetro e um barômetro. O termo-higrômetro é um equipamento dedicado à medição da umidade do ambiente com base na leitura de dois termômetros de coluna de mercúrio, estando o bulbo de um deles envolto por um algodão sempre úmido. A partir das diferentes temperaturas medidas pelos termômetros estima-se a umidade relativa do ambiente de ensaio. Este equipamento é ilustrado na Figura 4.15.



Figura 4.15 Termo-higrômetro

De posse das temperaturas de bulbo seco e úmido, utiliza-se uma tabela fornecida pelo fabricante ou o gráfico presente na norma ABNT (2013) para determinação da umidade relativa.

O barômetro de coluna de mercúrio é utilizado para a medição da pressão ambiente. Como a variação da pressão só é acentuada com a variação de altitude, todos os ensaios realizados apresentaram praticamente o mesmo valor de pressão atmosférica. Sendo assim, adotou-se como padrão o valor correspondente a 699 mmHg para todos os resultados de ensaios aqui apresentados.

4.4 Conceitos e parâmetros normalizados associados às ondas de tensão impulsivas utilizadas em ensaios para caracterização de suportabilidade frente a impulsos atmosféricos

4.4.1 Conceitos e parâmetros de interesse associados à onda de tensão impulsiva normalizada

Conforme discutido no capítulo 2, os processos que resultam em interrupção elétrica em meios isolantes dependem da forma de onda da excitação. A fim de se reproduzir em laboratório sobretensões relativas a surtos provocados por descargas

atmosféricas ou por manobras na rede⁷, a norma ABNT (2013) define duas formas de onda de tensão relativas a cada um desses eventos. Nesta dissertação será dada ênfase à forma de onda relativa a impulsos de tensão de origem atmosférica.

O sinal elétrico utilizado para caracterização de um impulso atmosférico é padronizado pela ABNT (2013) como uma onda de formato dupla exponencial com tempo de frente (T_1) de $1,2 \mu\text{s}$ e tempo até meio valor ou de meia onda (T_2) $50 \mu\text{s}$. A norma aceita uma tolerância de $\pm 30\%$ e $\pm 20\%$ para os tempos de frente e tempos até meio valor, respectivamente. Para o valor extremo ou de pico (U_e) a norma prevê a tolerância de $\pm 3\%$.

O tempo de frente da onda de tensão é estimado a partir do intervalo de tempo em que a onda impulsiva atinge 30 e 90% de valor extremo. De forma mais clara, o T_1 corresponde ao tempo entre a origem virtual (O_1) (ponto em que a reta que une os valores de 30 e 90% de U_e atinge o valor nulo de tensão) e o instante em que essa reta atinge o valor extremo do impulso aplicado. O tempo de meia onda é definido como o intervalo entre O_1 e o instante em que, após atingir seu valor extremo, a onda impulsiva decresce até metade de sua amplitude máxima. A Figura 4.16 ilustra os parâmetros tempo de frente e tempo de meia onda, bem como a forma de obtenção desses parâmetros.

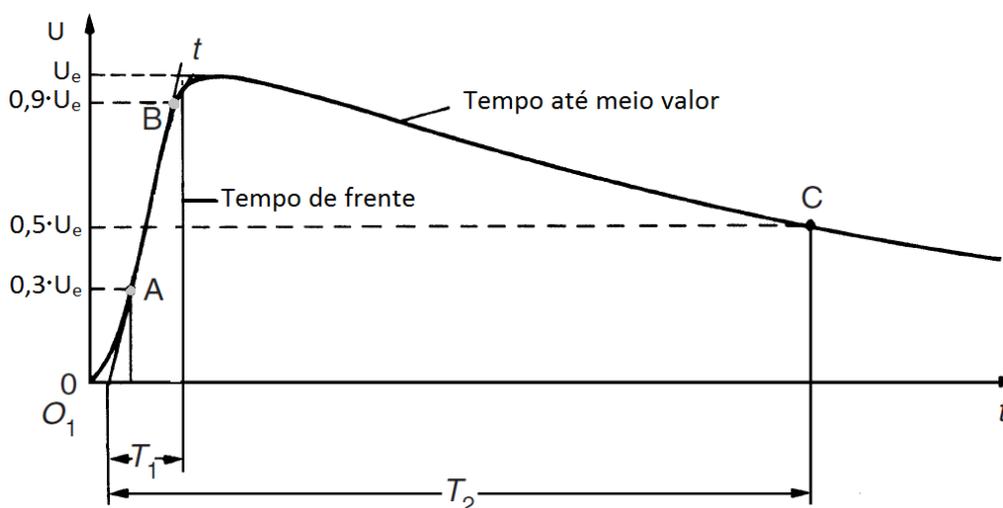


Figura 4.16 Caracterização dos parâmetros tempo de frente e meio valor [adaptado de (ABNT, 2013)].

⁷ Em impulsos que caracterizam operações de manobra, os tempos de frente e meia onda são padronizados como sendo 250 e $2500 \mu\text{s}$, respectivamente. As tolerâncias normativas desses tempos são de $\pm 20\%$ para o tempo de frente e $\pm 60\%$ para tempo de meia onda.

Durante a realização de ensaios, podem ocorrer descargas disruptivas que levam a quedas acentuadas na frente ou na cauda da onda de tensão aplicada, reduzindo a tensão no objeto de ensaio a valores próximos de zero. O tempo de corte (T_c), parâmetro virtual, é calculado segundo o procedimento descrito em norma (ABNT, 2013). Quando a disrupção elétrica ocorre após a onda de tensão atingir seu valor de pico, o tempo de corte é calculado traçando-se uma reta que conecta os pontos correspondentes a 70% e 10% do valor da tensão de pico. O tempo de corte é então definido como o tempo decorrido entre a origem virtual e o instante em que o impulso cruza a reta anteriormente descrita, conforme ilustrado na Figura 4.17.

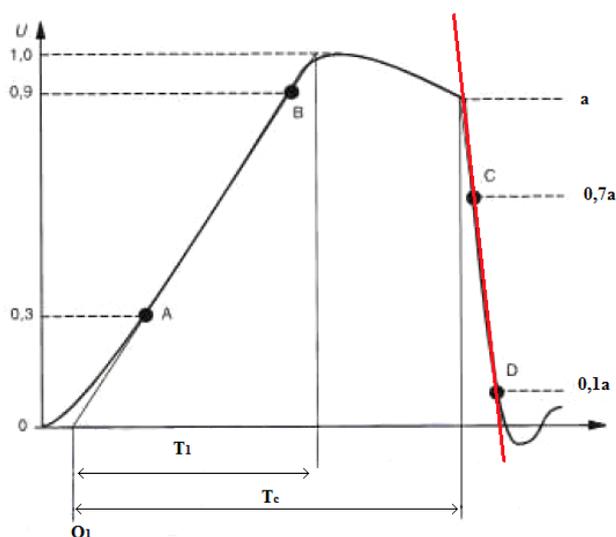


Figura 4.17 Determinação do tempo de corte em uma disrupção na cauda da onda [Adaptado (ABNT,2013)].

4.4.2 Definição e caracterização de atrasos envolvidos na disrupção elétrica

Segundo Kuffel (2000), em excitações lentas (contínuas ou alternadas) o elétron é capaz de adquirir energia suficiente para ionização do meio gasoso, caracterizando um nível de tensão (U_s). Após longos períodos de exposição, ocorre o processo de disrupção elétrica no meio isolante.

Entretanto, para sinais considerados rápidos, como aqueles associados aos surtos de tensão oriundos de operações de manobras ou de descargas atmosféricas, o elétron pode não adquirir energia suficiente para iniciar um processo de avalanche mesmo com o sinal de tensão atingindo seu valor de pico. Com isso, o valor suportável ao impulso

se torna superior àquele computado para excitações lentas (U_s). A Figura 4.18 ilustra uma disrupção elétrica quando consideradas ondas solicitantes caracterizadas como impulsivas.

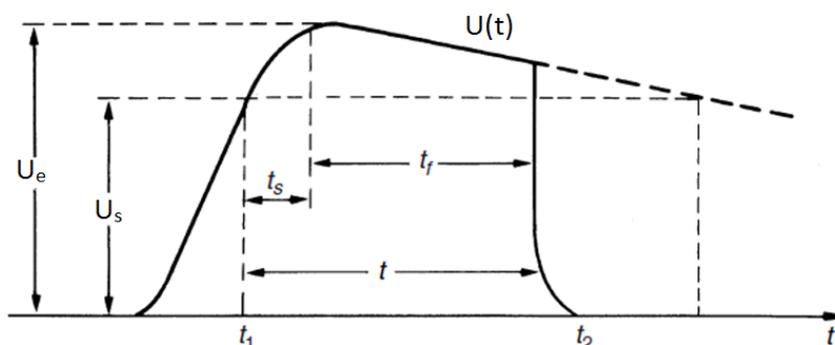


Figura 4.18 Disrupção elétrica em solicitações impulsivas [adaptado de (KUFFEL, 2010 p. 361)].

Na Figura 4.18 é apresentado o tempo de atraso (t) entre o provável nível de ruptura quando aplicadas tensões lentas (U_s) e o instante de ruptura devido a tensões rápidas. Este atraso é iniciado a partir do instante em que a onda impulsiva ultrapassa o valor de tensão U_s e termina com a disrupção elétrica. Como existem processos físicos envolvidos na ruptura do meio elétrico (ar), esse atraso é dividido em duas componentes. A primeira, chamada *atraso estatístico* (t_s), depende de quão ionizado o meio isolante se encontra e a segunda, chamada *atraso de formação* (t_f), depende do desenvolvimento do processo disruptivo, ou seja, do crescimento do canal ionizado até que ocorra conexão entre o ponto de aplicação do impulso de tensão e estruturas aterradas. O atraso estatístico pode ser reduzido quanto maior a sobretensão ($U_e - U_s$), enquanto o atraso de formação decresce com a diminuição do gap e com maior uniformidade do campo elétrico (KUFFEL, 200 p. 360).

4.5 Descrição dos ensaios realizados

Os ensaios realizados no contexto desta dissertação de mestrado consideraram a utilização de cabos nus e cabos cobertos, instalados em uma estrutura monofásica típica de redes de distribuição compactas.

A realização de testes para obtenção de parâmetros de suportabilidade de estruturas monofásicas com cabos nus se justifica para constituição de base de

comparação para análise da influência da cobertura isolante. Além disso, a análise para a condição de cabo nu pode ser associada a uma situação crítica na qual a cobertura isolante encontra-se totalmente degradada.

A seguir, são detalhados os procedimentos para a realização dos ensaios e os parâmetros de suportabilidade relativos aos ensaios considerando cabos nus e cabos com cobertura isolante.

Ensaio destrutivo para aceitação ou rejeição de isolantes não regenerativos são descritos na norma ABNT (2013) por três procedimentos. Entretanto, nenhum desses aborda um procedimento para determinação da tensão suportável de um objeto constituído de isolante não autorregenerativo, e sim a aceitação ou não do objeto para aplicação em determinado nível de tensão. Sendo assim, a prática adotada neste trabalho para determinação da suportabilidade impulsiva de tais objetos consistiu na aplicação de tensões impulsivas de baixa amplitude e, com acréscimos gradativos, chegar a um nível de tensão em que ocorra ruptura do meio isolante (ar e/ou camada isolante do cabo). Todas as correções de temperatura, umidade e pressão foram aplicadas para os ensaios dotados de condutores nus.

4.5.1 Cabo nu

Nos testes realizados com cabos nus, adotou-se a estrutura CM2 ilustrada na Figura 4.19. Os dois parâmetros de interesse para avaliação da capacidade isolante de meios considerados regenerativos, como o ar, são a tensão de descarga disruptiva a 50% (U_{50}) e a curva tensão/tempo. A seguir são descritos os procedimentos para a obtenção desses parâmetros.



Figura 4.19 Estrutura CM2 ensaiada na presença do cabo nu.

4.5.1.1 *Tensão de descarga disruptiva a 50% - U_{50}*

A tensão disruptiva depende de fatores como pressão, umidade, temperatura, configuração da estrutura, composição dos materiais envolvidos, etc. Devido à natureza aleatória dos processos físicos que resultam na disrupção elétrica, ainda que seja considerado o mesmo estresse elétrico, configuração e condições ambientais, é possível que sejam obtidos diferentes valores de tensão e tempo de corte a cada aplicação de impulso de tensão. Com isso, os resultados de diversas aplicações impulsivas devem ser analisados de forma a garantir, de forma estatística, um determinado grau de confiabilidade para os ensaios realizados.

Dentre os parâmetros que quantificam a probabilidade de ocorrência de uma descarga elétrica no ar cita-se a tensão de descarga disruptiva a 50% (U_{50}), a tensão suportável estatística (U_{10}) e a tensão de descarga disruptiva assegurada (U_{90}). Esses parâmetros correspondem aos níveis de tensão nos quais existem probabilidades de 50%, 10% e 90%, respectivamente, de ocorrência de uma disrupção elétrica (ABNT, 2013). Duas metodologias podem ser empregadas para cálculo desses parâmetros, quando consideradas tensões de impulso atmosférico:

a) Método de níveis múltiplos: Este método, também denominado teste tipo Classe 1, considera n o número de níveis de tensão aplicados e m o número de impulsos aplicados por nível de tensão. As definições do teste exigem um valor maior ou igual a 5 para o número de níveis de tensão e maior ou igual a 10 para o número de impulsos por nível. Recomenda-se, também, que a amplitude entre diferentes níveis de tensão (ΔU) seja de 1 a 6% do U_{50} estimado (ABNT, 2013; IEEE, 2013). Como resultado, têm-se as $n*m$ aplicações de tensão às quais se associa os números de descargas disruptivas (k_i) por nível de tensão (U_i). Um exemplo desse método pode ser visualizado na Figura 4.20, na qual foi adotado $m = 10$ e $n = 8$.

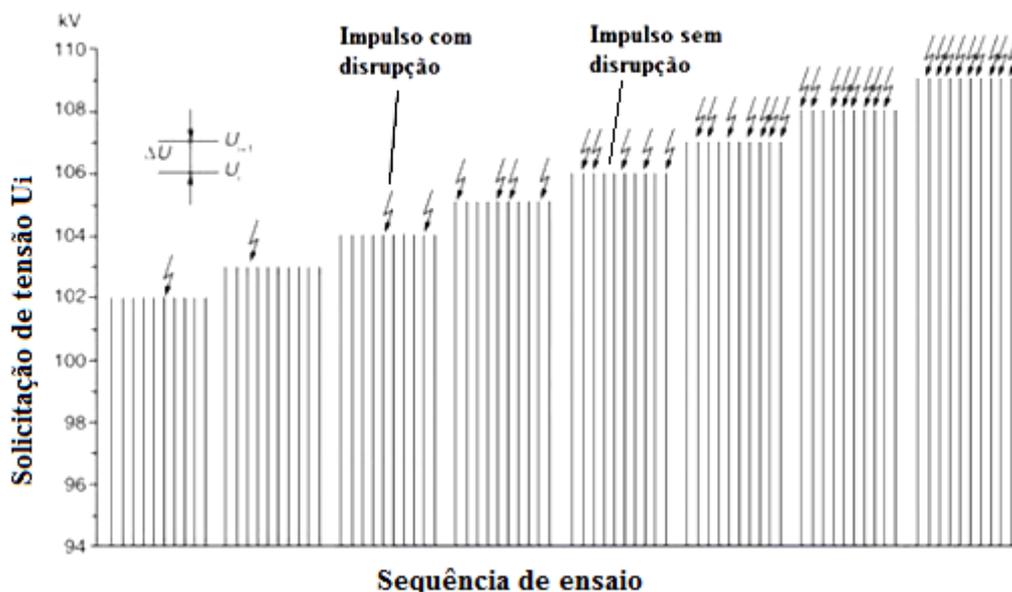


Figura 4.20 Exemplo método de níveis múltiplos [adaptado de (ABNT, 2013)].

b) Método de acréscimos e decréscimos: Este método, também classificado como ensaio Classe 2, fornece como resultado m grupos de n impulsos de tensão, em diferentes níveis de amplitude. A variação de tensão entre os diferentes níveis (ΔU) depende do resultado do grupo anterior. Duas variações podem ser aplicadas a esse método, uma para determinação do valor de tensão que corresponde à menor probabilidade de ocorrência de uma descarga disruptiva (U_{10}), chamado *procedimento suportável*, e o outro para determinação do nível de tensão com a maior probabilidade de ocorrência de uma descarga disruptiva (U_{90}), chamado *procedimento disruptivo*. No primeiro procedimento, o nível de tensão é acrescido de ΔU caso não haja descarga disruptiva no grupo de tensões n , e reduzido de ΔU no caso de ocorrência de disrupção. No segundo procedimento, o nível de tensão é acrescido de ΔU caso haja um ou mais impulsos suportados no nível de tensão n , até que se chegue num nível de tensão no qual todos os impulsos aplicados no nível resultem em disrupção (IEEE, 2013; ABNT, 2013).

Quando um impulso por nível de tensão é adotado ($n = 1$), os dois procedimentos convergem para um único resultado, utilizado no cálculo da tensão de descarga disruptiva a 50%. A norma ABNT (2013) também determina que a variação de tensão entre diferentes níveis deve ser de $\Delta U = (0,01 \text{ a } 0,03) \cdot U_{50}$ com, no mínimo, 20 aplicações úteis. Entende-se por aplicações úteis os impulsos a partir do qual houve a primeira disrupção.

Podem ser adotados diferentes valores para n com o intuito de se determinar outras probabilidades de disrupção elétrica. Entretanto, neste trabalho adotou-se o método de acréscimos e decréscimos e o procedimento disruptivo ($n = 1$) para o cálculo direto do parâmetro U_{50} , e, a partir desse, uma estimativa de U_{10} e U_{90} considerando uma distribuição de probabilidade gaussiana ou normal. A Figura 4.21 ilustra o método de acréscimos e decréscimos e o procedimento disruptivo quando adotado um impulso por nível de tensão. Neste exemplo verifica-se também que as aplicações úteis iniciaram-se a partir do impulso numerado 1, situação na qual ocorreu a primeira disrupção elétrica.

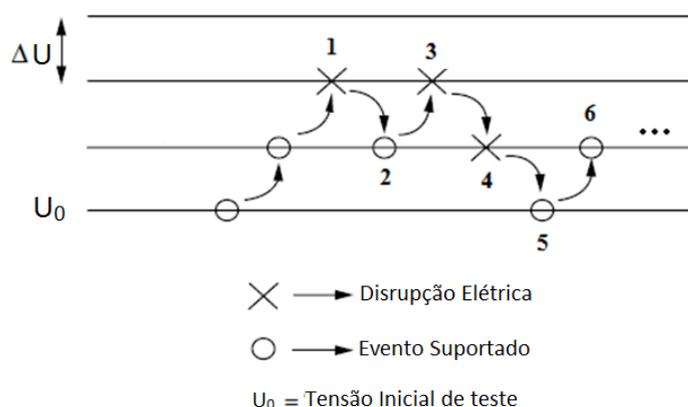


Figura 4.21 Exemplo método de acréscimos e decréscimos com um impulso por nível de tensão [Adaptado de (KUFFEL, 2000 p. 481)].

Nos ensaios realizados com cabos nus, foram utilizados ΔU de 2 ou 3 kV, ambos compreendidos dentro da tolerância normativa de até 3% do valor estimado para U_{50} (110 kV para a classe de 15-kV).

4.5.1.2 Curva tensão/tempo - Uxt

Conforme indicado na ABNT (2013), existem dois tipos de métodos para obtenção da curva tensão/tempo.

O primeiro método busca associar os valores de pico das ondas impulsivas que resultam em disrupção e o valor do tempo de frente de tais ondas. Neste caso, a curva tensão/tempo é obtida variando-se no ensaio os tempos de frente da onda de tensão impulsiva de forma linear e crescente, gerando a denominada *curva tensão/tempo para*

*impulso de tensão linearmente crescente*⁸. O segundo método considera a relação entre o valor de pico e o tempo de tempo corte no qual ocorre a disrupção. Neste caso, os impulsos de tensão ensaiados apresentam as mesmas formas de onda, porém com diferentes valores de pico. A curva Uxt gerada pelo segundo método é denominada *curva Uxt para impulso de tensão de forma presumida constante*.

Nesta dissertação de mestrado, decidiu-se por trabalhar com o segundo método de obtenção da curva Uxt, conforme ilustrado na Figura 4.22, que parte da aplicação de impulsos de tensão com mesma forma de onda e amplitudes distintas.

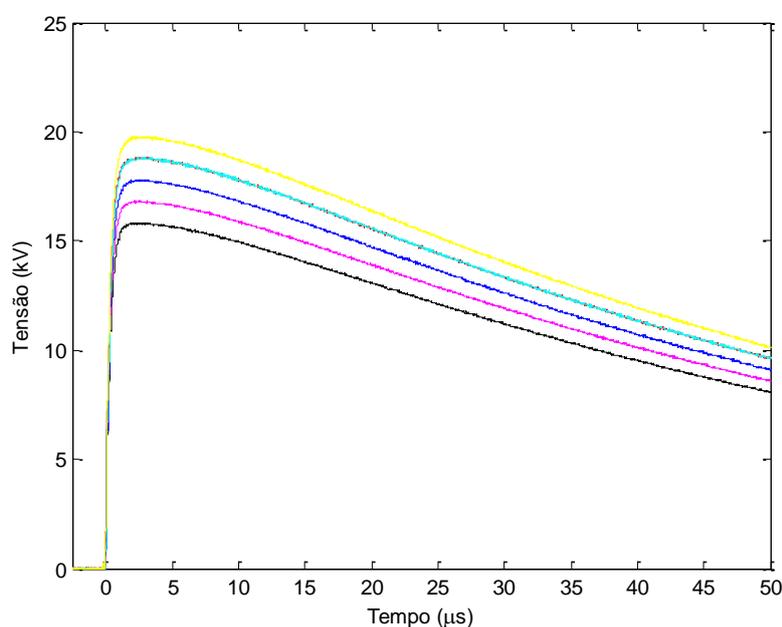


Figura 4.22 Aplicações sucessivas de tensões impulsivas na estrutura CM2 para obtenção da curva Uxt para impulsos de tensão de forma presumida constante.

A Figura 4.23 exemplifica aplicações sucessivas de tensões impulsivas que não foram suportadas pela estrutura CM2, ou seja, em que foi verificada uma disrupção elétrica no ar. Cada curva fornece um ponto para a construção da curva Uxt, em que a abscissa é dada pelo tempo de corte, calculado com base no instante de ruptura (como apresentado em 4.4.1) e a ordenada corresponde ao valor de pico da tensão aplicada.

⁸ Apesar de o termo *linearmente crescente* fornecer uma ideia de variação de amplitude, uma definição mais precisa seria *curva Uxt* para impulsos com tempo de frente linearmente crescentes.

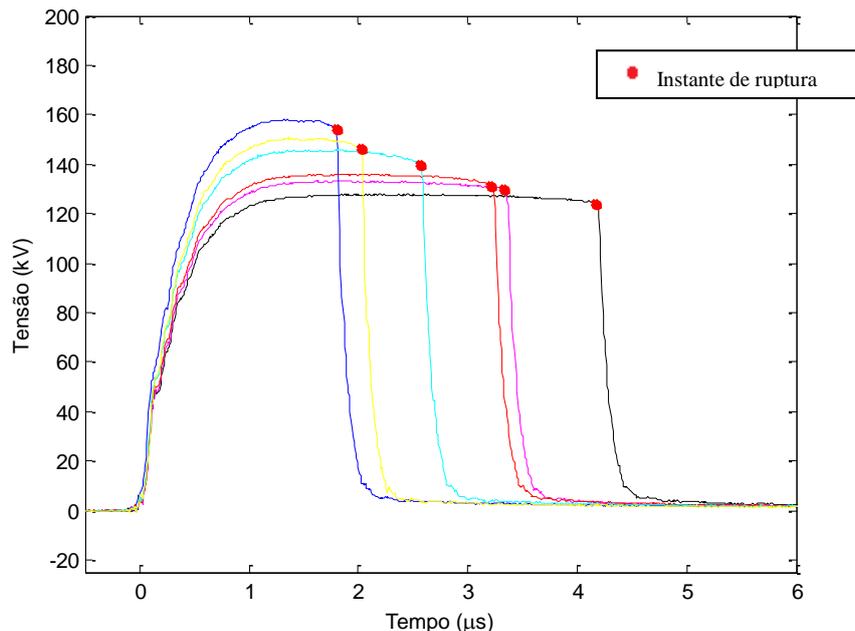


Figura 4.23 Aplicações de tensões impulsivas que resultaram em disrupções elétricas no ar.

A curva Uxt pode ser construída quando o meio isolante é regenerativo, estando ele submetido a campos elétricos uniformes ou não uniformes. Entretanto, para o caso de campo elétrico não uniforme, pode ocorrer uma maior dispersão dos pontos tensão/tempo em relação àqueles obtidos pela aplicação de campos uniformes.

Neste contexto, desenvolveu-se uma rotina de cálculo para a obtenção do melhor ajuste dos pontos tensão/tempo. A formulação da curva Uxt sugerida na literatura (KUFFEL, 2000) é exemplificada pela equação (4.1).

$$U(t) = A + \frac{B}{t^n} \quad (4.8)$$

onde A é dado em kV, B em $\text{kV} \cdot \mu\text{s}$, t em μs e n um parâmetro adimensional. A rotina de cálculo desenvolvida consiste em se variar o parâmetro A , efetuando-se o cálculo de B e n e, seguindo o método dos mínimos quadrados (MEISTER, 2006; DEVORE, 2006), obter-se uma curva Uxt para cada valor de A . De posse de um conjunto de curvas Uxt, pode-se definir como a mais representativa aquela que apresente o maior coeficiente de determinação⁹ em relação aos pontos amostrados em ensaio. Uma vez

⁹ O coeficiente de determinação indica quão relacionados estão o modelo e os dados amostrais. Esse coeficiente pode assumir valores entre 0 e 1, sendo 0 nos casos em que não há qualquer correlação entre o modelo e os dados amostrais e 1 nos casos em que há total correlação entre ambos.

definido o melhor ajuste da curva, define-se, conseqüentemente, o parâmetro A . Tal parâmetro representa a menor suportabilidade do meio isolante para longos tempos de exposição. Dentre o universo de valores que o parâmetro A pode assumir, considerou-se a faixa que vai de zero até o valor estimado para U_{50} .

Com base nas curvas U_{xt} é possível estimar o tempo necessário para que haja disrupção em função do valor de pico da onda de tensão. Tal relação é verdadeira quando comparados impulsos de tensão com as mesmas características que os impulsos aplicados na construção da curva U_{xt} , tais como tempo de frente e tempo de meia onda. Além disso, a curva U_{xt} também indica um provável patamar de tensão ao qual o meio isolante pode ser submetido sem que haja uma possível falha de isolamento. Tal patamar é representado pelo parâmetro de ajuste A .

4.5.2 Cabo coberto

Conforme discutido no capítulo 3, a presença da camada isolante em cabos cobertos submetidos a tensões impulsivas proporciona um comportamento distinto daquele apresentado por cabos nus. Estudos realizados por Nakamura (1986) identificaram que, com a aplicação de tensões impulsivas em cabos cobertos, cargas estáticas de polaridade oposta ao impulso aplicado acumulam-se na superfície isolante do condutor. Em decorrência do acúmulo de cargas na cobertura isolante e do fato de essa cobertura não poder ser considerada um meio autorrecuperante, a obtenção dos parâmetros U_{50} e curva U_{xt} não é adequada, uma vez que a total independência estatística dos ensaios sob tais condições não é mais garantida.

Desta forma, de modo a garantir a independência estatística dos resultados impulsivos em cabos com cobertura isolante, sugere-se a realização da remoção das cargas estáticas acumuladas após cada aplicação de tensão impulsiva, seguindo o procedimento recomendado por Nakamura (1986).

Nesta dissertação de mestrado foram realizados dois tipos de ensaios. O primeiro grupo consiste em, a cada aplicação de tensão impulsiva, proceder a remoção das cargas estáticas através do contato de uma escova de cobre, aterrada, por toda a sua superfície. O segundo grupo de testes não considera a retirada de cargas após cada

aplicação de tensão. Cada um desses grupos de testes é subdividido em dois, denominados teste A e teste B, descritos a seguir:

Teste A: consiste na utilização de um cabo coberto intacto, ou seja, que não tenha sofrido perfuração anterior da capa isolante.

Teste B: consiste na utilização de cabos nos quais a cobertura isolante sofreu perfuração em testes realizados anteriormente. Os ensaios adotados seguem a divisão apresentada na Figura 4.24.

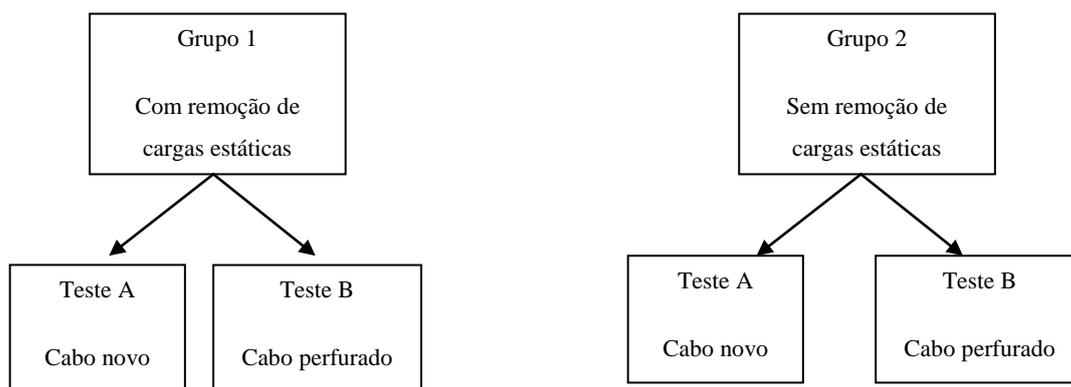


Figura 4.24 Ensaio realizados.

A Figura 4.25 ilustra a montagem da estrutura CM2 com o cabo coberto.



Figura 4.25 Estrutura CM2 ensaiada na presença do cabo coberto.

As correções ambientais presentes na ABNT (2013) para meios autorrecuperantes são dadas pelo produto entre o fator de correção para a densidade do

ar (k_1) e o fator de correção para a umidade (k_2). Os fatores k_1 e k_2 são calculados conforme equações (4.9) e (4.10).

$$k_1 = \delta^m \quad (4.9)$$

$$k_2 = k^w \quad (4.10)$$

onde a densidade relativa do ar (δ) é dependente da pressão e da temperatura ambiente e o parâmetro k para correção de umidade é função do tipo de tensão de ensaio (tensão contínua, alternada ou impulsiva), da umidade absoluta e densidade relativa do ar. Os expoentes m e w são dependentes de um parâmetro de correção que, por sua vez, é função da menor distância de arco, da densidade relativa do ar e do valor de U_{50} medido ou estimado. Portanto, a correção ambiental dos ensaios em meios autorrecuperantes é dependente da menor distância de arco, ou seja, da menor distância entre partes energizadas e o ponto aterrado mais próximo. Entretanto, a norma ABNT (2013) não especifica correções ambientais em testes que ocorram degradação do meio isolante por aplicações repetidas de tensão (isolamento não autorrecuperante).

Nos testes realizados com cabos cobertos, verificou-se que a perfuração da camada isolante ocorre em posições distintas ao longo do cabo, acarretando em distâncias de arco variáveis para cada amostra de cabo perfurado. A fim de se comparar a tensão suportável de cabos nus com cabos cobertos, foi realizada uma extensão dos procedimentos de correção ambiental utilizados em isolamentos autorrecuperantes.

Com isso, cada amostra de cabo coberto apresenta uma distância de arco consoante com a localização da perfuração de sua cobertura. A distância de arco é estimada como a soma de duas distâncias: a primeira dada pela menor distância entre estruturas aterradas do poste e o condutor e a segunda dada pela distância entre a perfuração da camada isolante e o ponto de fixação do cabo isolador de pino, conforme ilustrado na Figura 4.26.

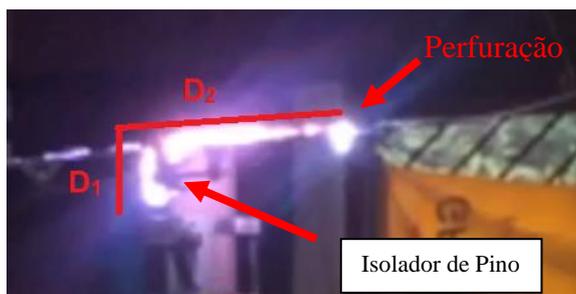


Figura 4.26 Cálculo da distância de arco em cada amostra de cabo coberto novo.

4.5.2.1 Grupo 1 de ensaios - com remoção de cargas estáticas

A realização desse grupo de ensaios considerou cabos de três fabricantes distintos, aqui denominados X, Y e Z, e cinco amostras para cada teste realizado. Nos ensaios com tensão de polaridade positiva foram utilizados cabos dos fabricantes X e Y, totalizando dez amostras. Já os ensaios de polaridade negativa consideraram cabos do fabricante Z. A realização de ensaios com cabos de diferentes fabricantes se deveu ao fato de que ao longo do desenvolvimento do trabalho amostras de determinados fabricantes encontravam-se em escassez no mercado. Para que não houvesse perda de generalidade dos resultados dos ensaios, ao serem alterados fabricantes repetiu-se o grupo de ensaios anteriormente realizado com amostras do fabricante anterior, a fim de verificar o comportamento das amostras do novo fabricante.

Com base em resultados de ensaios preliminares para definição do comprimento de cabo a ser ensaiado, definiu-se 5 m como sendo o comprimento de cabo a ser testado para impulsos de tensão de polaridade positiva. A utilização desse comprimento garante que não haja descargas elétricas cuja terminação do arco se forme a partir da extremidade do cabo.

Para os ensaios envolvendo tensão de polaridade negativa utilizou-se 5 amostras de um único fabricante e definiu-se 10 m como o comprimento de cabo a ser ensaiado. Mesmo considerando esse comprimento, algumas disrupções para a extremidade ainda foram observadas. Devido à limitação de espaço no laboratório, não foi possível testar comprimentos superiores a esse valor. Sendo assim, os resultados dos ensaios em que foram observadas descargas para a extremidade do cabo foram desconsiderados das análises numéricas desse trabalho.

Os ensaios consistiram em diversas aplicações de tensão impulsiva, sendo considerados cinco impulsos por nível de tensão. Na inexistência de disrupções elétricas em um determinado nível, este foi acrescido em 10 kV, sucessivamente, até que fosse verificada uma disrupção.

Com base em resultados de testes preliminares, adotou-se como tensão inicial de ensaio para o Teste A o valor de 200 kV para tensões positivas e 170 kV para tensões negativas, valores nos quais a suportabilidade da estrutura CM2 era assegurada. A cada tensão aplicada realizou-se a remoção de cargas acumuladas superficialmente ao cabo.

Finalizado o Teste A, utilizou-se o mesmo condutor já perfurado para a realização dos ensaios do Teste B. Neste, a tensão inicial de ensaio foi padronizada em 200 kV, exceto nos casos nos quais observou-se a perfuração da camada isolante próxima ao isolador. Quando a perfuração da cobertura isolante se manifestou em uma distância de até 5 cm do isolador, adotou-se o nível inicial de tensão como sendo igual ao caso crítico, ou seja, ao valor de U_{50} calculado para cabos nus.

Uma ressalva deve ser feita aos fenômenos observados durante a realização dos ensaios em cabos cobertos na presente dissertação. Anteriormente à perfuração da cobertura isolante de cabos foram observados fenômenos físicos importantes, incorrendo em descargas disruptivas ou descargas não disruptivas. Dentre os fenômenos observados, um deles consistiu em disrupção parcial da estrutura, ou seja, apenas o meio isolante gasoso (ar) foi rompido, acarretando em falha parcial de isolamento, sendo classificado como descarga não-disruptiva. Outro fenômeno observado foi a ocorrência de descarga superficial em que, além da disrupção do ar no entorno do isolador, ocorriam também a disrupção do ar na interface com o dielétrico sólido (cobertura do cabo), também classificado como descarga não disruptiva. Ao se elevar o nível tensão, em alguns casos ocorriam descargas para a extremidade do cabo. Apesar das descargas para a extremidade do cabo não resultarem na perfuração da camada isolante, tais descargas acarretavam em falha de isolamento plena.

4.5.2.2 Grupo 2 de ensaios - Sem remoção de cargas estáticas

O Grupo 2 de ensaios também consiste na aplicação de 5 impulsos por nível de tensão. Na inexistência de disrupções elétricas, o nível de tensão foi acrescido sucessivamente em 10 kV, sendo aplicados mais 5 impulsos de tensão até a formação de uma descarga disruptiva, situação na qual os ensaios eram finalizados. Em todas as aplicações impulsivas do Grupo 2 não se realizou a remoção de cargas que porventura se acumulassem na superfície isolante do condutor. Além disso, ao contrário do grupo 1, no grupo 2 considerou-se apenas cabos de um mesmo fabricante (Y)¹⁰.

Após análise dos ensaios envolvendo polaridade positiva, com e sem o acúmulo de cargas (Grupo 1 e 2) e considerando cabos danificados ou não (testes A e B) deu-se início às investigações com a aplicação de tensões com polaridades negativas. Nesse caso, os grupos 1 e 2 de ensaios foram realizados com cabos do fabricante Y.

¹⁰ A escolha de um único fabricante para impulsos de polaridade negativa é justificada pelo grande número de descargas disruptivas que acometem a extremidade do cabo e, devido à impossibilidade de aumento do tamanho de cada amostra, este fato leva a resultados não tão confiáveis quanto aqueles obtidos para a polaridade positiva, mas acrescentados no trabalho como resultado qualitativo para comparações.

5 Resultados e Análises

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta resultados relativos à suportabilidade elétrica de cabos nus e cabos com cobertura isolante instalados na estrutura monofásica CM2. Os resultados considerando cabos nus têm como objetivo reproduzir a situação crítica na qual a camada isolante do cabo encontra-se totalmente degradada. Além disso, esses resultados constituem base para a análise de fenômenos que surgem com a introdução de cobertura isolante e as consequências na suportabilidade resultante dos cabos cobertos.

A seguinte sequência de apresentação é adotada. Primeiramente são apresentados resultados referentes a ensaios com cabos nus para a obtenção das tensões disruptivas, mais especificamente, tensão de descarga disruptiva a 50% (U_{50}), tensão suportável estatística (U_{10}) e tensão de descarga disruptiva assegurada (U_{90}), além da curva U_{xt} para a estrutura CM2. Em seguida são apresentados os resultados referentes aos ensaios com cabos cobertos, considerando ou não a remoção das cargas estáticas mediante aplicações de tensão impulsiva de polaridade positiva e negativa. São destacados os resultados de suportabilidade de cabos cobertos obtidos com a realização dos diferentes grupos de ensaios e testes propostos neste trabalho. Relaciona-se também a localização dos danos na camada isolante de cabos com a redução na suportabilidade da estrutura testada com aplicações de impulsos de diferentes polaridades. Por sua vez, resultados obtidos a partir de ensaios com cabos nus (caso crítico) são comparados com os obtidos no ensaio de cabos cobertos.

No último tópico do capítulo, são discutidos os fenômenos de acúmulo de cargas e descargas parciais no contexto dos ensaios. A influência de tais fenômenos na suportabilidade da estrutura testada na presença de cabos cobertos também é discutida.

5.2 Ensaaios com cabo nu

5.2.1 Introdução

Nos ensaios utilizando cabos nus adotou-se um cabo de alumínio de 7 fios, seção transversal de 50 mm² e comprimento 80 cm, disposto simetricamente sobre o isolador de pino da estrutura CM2, conforme ilustrado na Figura 5.2.



Figura 5.1 Estrutura CM2 ensaiada utilizando-se cabo nu.

O cabo mensageiro não foi inserido, uma vez que a sua presença não tem influência na distância mínima entre o cabo e o ponto aterrado mais próximo na estrutura. Além disso, a inclusão do cabo mensageiro na estrutura dificultaria a manutenção do alinhamento vertical entre este cabo e o cabo fase em condições laboratoriais. Os ensaios sempre consideraram aterradas as ferragens que compõem a estrutura CM2, tais como braço "L" e cintas de fixação, bem como a estrutura de sustentação dos postes.

5.2.2 Parâmetros de suportabilidade - U_{10} , U_{50} e U_{90}

Impulsos de tensão de polaridades positiva e negativa foram aplicados no condutor fase com o intuito de se quantificar o efeito dessa variável na suportabilidade da estrutura. Os resultados de suportabilidade são apresentados na Tabela 5.1. Também são apresentados os desvios-padrão envolvidos no cálculo de U_{50} para impulsos de tensão de polaridades positiva e negativa.

Tabela 5.1 Tensões disruptivas U_{10} , U_{50} e U_{90} obtidas no ensaio de acréscimos e decréscimos para a estrutura CM2 com cabo nu. Valores corrigidos para condições ambientais de referência.

<i>Polaridade</i>	U_{10} (kV)	U_{50} (kV)	U_{90} (kV)	<i>Desvio-padrão</i> U_{50} (%)
Positiva	126,28	129,87	133,47	2,16
Negativa	150,91	156,12	161,34	2,60

Por constituir apenas meio isolante autorrecuperante, as tensões suportáveis apresentadas na Tabela 5.1 estão corrigidas para as condições ambientais de referência, conforme o exigido pela ABNT (2013). Com isso, tais resultados são válidos em regiões que apresentem temperatura de 20° C, pressão 101,3 kPa e umidade absoluta de 11g/m³.

Os valores calculados de U_{10} e U_{90} foram obtidos indiretamente a partir do valor de U_{50} . Parâmetro este calculado com base no ensaio de acréscimos e decréscimos e considerando uma distribuição de probabilidade normal com desvio-padrão (σ) de 2,16% para impulsos de polaridade positiva e 2,6% para impulsos de polaridade negativa, conforme instrução presente em norma ABNT (2013). Sendo assim, os valores de U_{10} e U_{90} são calculados conforme equações (5.1) e (5.2).

$$U_{10} = U_{50} - 1,28 * \sigma \quad (5.1)$$

$$U_{90} = U_{50} + 1,28 * \sigma \quad (5.2)$$

Observa-se que a tensão com probabilidade de ruptura de 50% é de aproximadamente 130 kV para impulsos de polaridade positiva e de 156 kV para impulsos de polaridade negativa. Considerando-se valores absolutos, a estrutura testada apresentou valor de U_{50} para impulsos de polaridade positiva 16,8% inferior em relação à aplicação de impulsos de polaridade negativa, comprovando a menor suportabilidade da estrutura devido à aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva, conforme discutido no capítulo 3 desta dissertação.

Especificamente em relação ao ensaio com tensões de polaridade positiva, o valor de tensão suportável estatística (U_{10}) é de 126 kV, apenas 2,8% inferior ao valor calculado para U_{50} . Por sua vez, a tensão de descarga disruptiva assegurada (U_{90}) vale 133 kV, sendo 2,8% superior ao valor U_{50} .

Os resultados do ensaio envolvendo impulsos de tensão com polaridade negativa indicaram valores para a tensão suportável estatística (U_{10}) e de descarga disruptiva assegurada (U_{90}) de 151 kV e 161 kV, respectivamente. Esses valores são, respectivamente, 3,3% menor e 3,3% maior que o valor de tensão calculado para U_{50} . A pequena variação entre os parâmetros U_{10} , U_{50} e U_{90} para ambas as polaridades (inferior a 3%) se justifica pelos pequenos desvios-padrão referentes à obtenção do parâmetro U_{50} .

5.2.3 Curva U_{xt}

Para a obtenção dos pontos utilizados na construção da curva U_{xt} referente a impulsos de polaridade positiva, elevou-se a tensão de 125 a 160 kV, em passos de 3 kV, considerando a aplicação de 5 impulsos por nível de tensão. No total, 62 impulsos úteis foram obtidos, ou seja, impulsos de tensão de polaridade positiva com formação de descarga disruptiva.

Para construção da curva U_{xt} referente a impulsos de polaridade negativa considerou-se o valor de U_{50} como nível inicial de tensão. Em seguida, o nível de tensão foi elevado em passos de -3 kV até -189 kV, sendo totalizadas 66 disrupções úteis.

Conforme anteriormente explicado, um aumento (em módulo) da tensão aplicada em um objeto de teste proporciona a redução no atraso estatístico necessário para formação e evolução do arco elétrico. Sendo assim, ao longo dos testes, a amplitude do impulso de tensão foi aumentada gradativamente, de forma a garantir que todas as descargas disruptivas ocorressem após o impulso de tensão atingir seu valor de pico, ou seja, na cauda da onda de tensão.

Os parâmetros obtidos como melhor ajuste da equação (4.8) são apresentados, em módulo, na Tabela 5.2. As referidas curvas U_{xt} estão ilustradas na Figura 5.2 e o parâmetro que avalia quão eficiente é o ajuste da curva U_{xt} aos dados amostrados é expresso pelo coeficiente de determinação (R^2). Os coeficientes de determinação obtidos nos ajustes das amostras ao modelo foram 0,8617 e 0,7848 para impulsos de polaridade positiva e negativa, respectivamente.

Tabela 5.2 Parâmetros obtidos como melhor ajuste da curva Uxt. Valores corrigidos para condições ambientais de referência.

Polaridade	A (kV)	B (kV* μ s)	n	R ²
Positiva	115,72	103,91	1,1196	0,8617
Negativa	150,97	75,67	2,048	0,7848

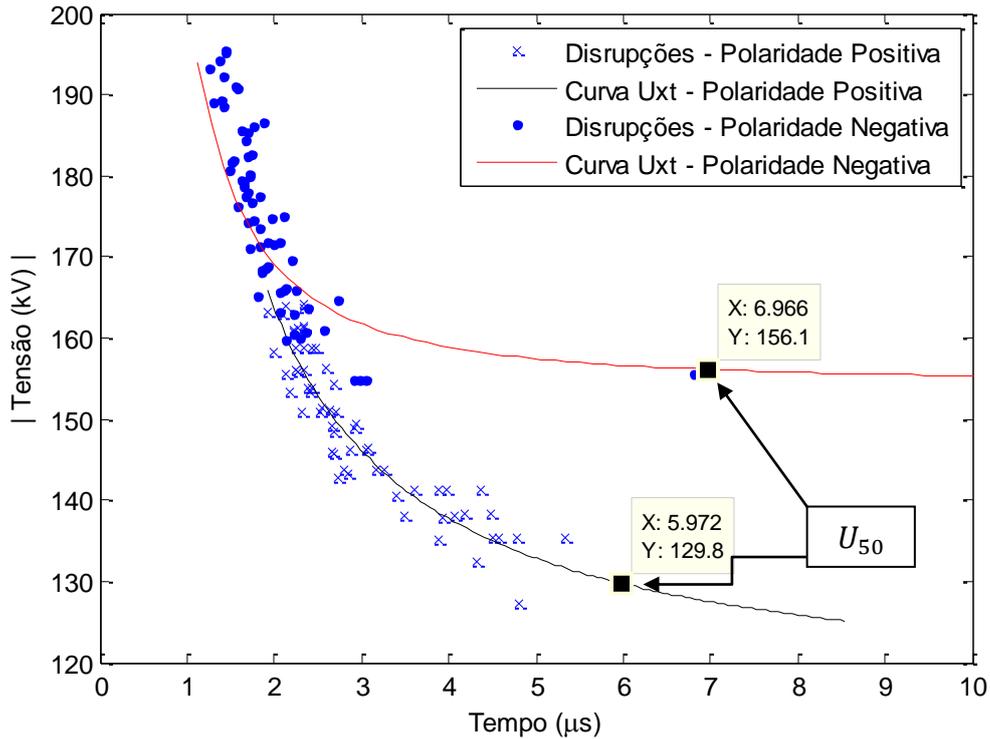


Figura 5.2 Curva Uxt obtida para a estrutura CM2.

Com base na Figura 5.2 e nas Tabelas 5.1 e 5.2, verifica-se que o parâmetro A, ajustado na curva tensão/tempo para impulsos de tensão de polaridade positiva (116 kV), apresenta valor aproximadamente 11% e 8 % inferior, respectivamente, aos valores dos parâmetros U_{50} e U_{10} calculados. A comparação considerando impulsos de tensão de polaridade negativa indica valor de A 3,3% inferior ao parâmetro o U_{50} e praticamente igual ao parâmetro U_{10} calculado.

Além disso, considerando a tensão provável de disrupção igual ao valor de U_{50} calculado, uma rápida análise nas curvas Uxt obtidas para ambas as polaridades indicaram tempos prováveis de disrupção iguais a 6 e 7 μ s para as polaridades positiva e negativa, respectivamente, conforme visto na Figura 5.2.

5.3 Ensaio com cabos cobertos

Os resultados dos ensaios com cabos cobertos são divididos em dois grupos. O Grupo 1 de ensaios considerou a remoção de cargas estáticas acumuladas no cabo após cada aplicação de tensão impulsiva. No Grupo 2 de ensaios não é considerada esta remoção de cargas. Tanto o Grupo 1 quanto o Grupo 2 são subdivididos em Testes A e B que correspondem, respectivamente, a ensaios envolvendo cabos novos e cabos com a cobertura isolante perfurada.

A seguir estão apresentados separadamente os resultados obtidos para cada um desses ensaios. A comparação entre tais resultados e aqueles obtidos utilizando-se cabos nus é apresentada ao final do capítulo.

Apesar do autor se basear em parâmetros estatísticos para avaliação da suportabilidade de cabos cobertos, tal análise deve ser considerada somente do ponto de vista qualitativo, visto que o número de amostras considerado é muito pequeno. Tal fato é justificado pelo elevado tempo gasto no ensaio de cada amostra, além de que, por se tratar de ensaios destrutivos, a utilização de um elevado número de amostras acarretaria em custos mais elevados.

5.3.1 Grupo 1 de ensaios - com remoção de cargas estáticas

5.3.1.1 Suportabilidade a impulsos de tensão

Os resultados de suportabilidade da estrutura CM2 na presença de cabos cobertos e considerando a remoção de cargas acumuladas na cobertura isolante após cada aplicação de tensão impulsiva são apresentados na Tabela 5.3, incluídos ensaios com polaridades positiva e negativa de tensão. Além das tensões disruptivas médias, calculadas com base na média aritmética das primeiras descargas disruptivas observadas em cada amostra, os valores medianos, baseados na frequência de ocorrência, também foram calculados. Diferentemente do valor médio, o valor mediano traz consigo informações acerca da distribuição em frequência dos dados obtidos, ou seja, consiste no valor que divide as amostras ao meio, também chamado valor central das amostras (DEVORE, 2006).

Tabela 5.3 Dados experimentais corrigidos da estrutura CM2 com o emprego de cabo coberto e efetuando-se a remoção de cargas estáticas. As linhas em negrito referem-se aos resultados finais do ensaio, independentemente de fabricante.

Polaridade	Tipo de Teste	Fabricante	Tensão Disruptiva	Tensão Disruptiva	Desvio-padrão em relação à Média (%)
			Mediana (kV)	Média (kV)	
<i>Positiva</i>	A	X	238,5	238,9	6,4
		Y	260,4	258,3	4,1
		X e Y	252,0	248,6	6,5
	B	X	248,3	244,6	7,1
		Y	229,5	220,9	18,3
		X e Y	243,6	232,8	13,7
<i>Negativa</i>	A	Z	225,8	219,5	8,2
	B	Z	178,5	185,9	5,9

Os valores contidos na Tabela 5.3 estão corrigidos para as condições ambientais de referência, conforme procedimento descrito anteriormente.

A Figura 5.3 apresenta a distribuição das tensões de ruptura, para polaridade positiva, divididas por fabricante e teste realizado (A e B). Todas as 10 amostras ensaiadas com impulsos de tensão de polaridade positiva foram perfuradas.

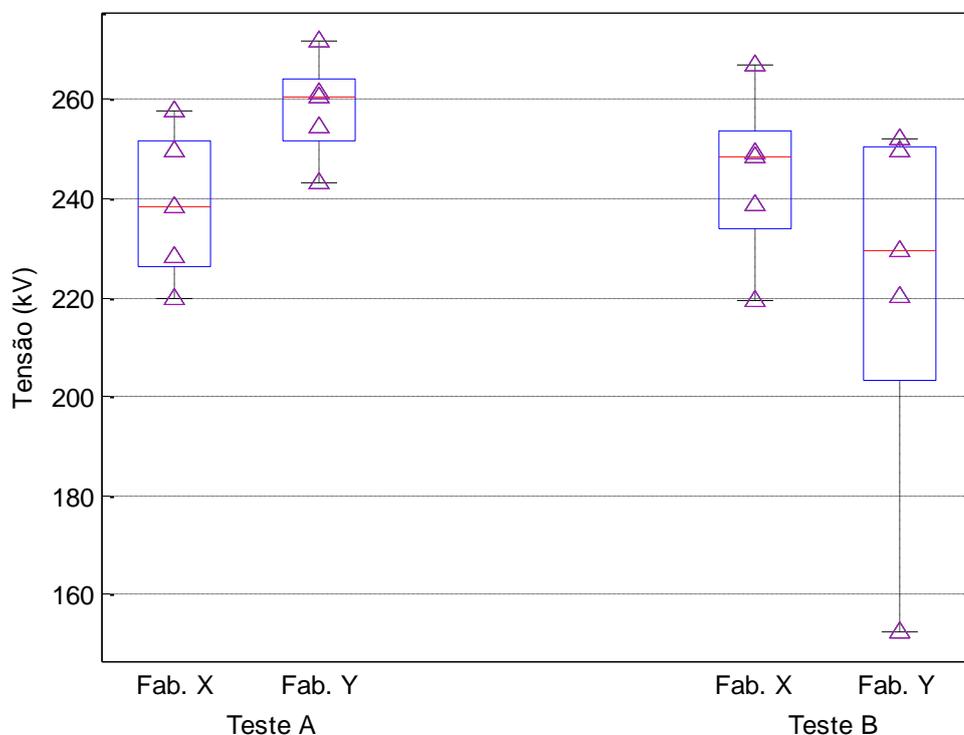


Figura 5.3 Tensões disruptivas obtidas no Grupo 1 (com remoção de cargas estáticas) para tensões de polaridade positiva.

Com base no gráfico de blocos ilustrado na Figura 5.3 é possível obter diretamente determinados parâmetros estatísticos. A porção inferior de cada bloco representa o primeiro quartil, ou valor que divide as amostras em 1/4. Em traços horizontais são representadas as medianas de cada conjunto de amostras. Por fim, a porção superior de cada bloco denota o valor que divide as amostras em 3/4, ou terceiro quartil. As hastes abaixo de cada caixa se podem se estender do 1º quartil até o limite inferior e, as hastes acima de cada bloco do 3º quartil até o limite superior. Os limites superiores e inferiores máximos são computados com base na diferença interquartil ($Q_3 - Q_1$), dada pela equação (5.3). O comprimento máximo de cada haste é padronizado como sendo 1,5 vezes a diferença interquartil. Esse valor corresponde a, aproximadamente, $\pm 2,7\sigma$ (desvios-padrão), cobrindo uma faixa de probabilidade de 99,3% para dados normalmente distribuídos. Os pontos situados além desses limites são considerados *outliers*, ou discrepantes em relação à amostra (DEVORE, 2006, p.36).

$$\begin{aligned} LI &= Q_1 - 1,5 \cdot (Q_3 - Q_1) \\ LS &= Q_3 + 1,5 \cdot (Q_3 - Q_1) \end{aligned} \tag{5.3}$$

Os cabos dos fabricantes X e Y, apresentaram valores medianos de tensão de ruptura de 239 e 260 kV, respectivamente, para o Teste A. Tais valores estão próximos, sendo que os cabos do fabricante Y apresentam valor mediano de tensão disruptiva apenas 8,8% superior em relação ao valor obtido para os cabos do fabricante X.

Ainda nos Teste A, ao se avaliar a distribuição das tensões disruptivas obtidas com cabos do fabricante X, 60% das amostras concentraram-se na faixa compreendida entre 226 e 252 kV, que correspondem ao primeiro e terceiro quartis respectivamente, como apresentado na Figura 5.3. Os valores mínimos e máximos obtido como resultado do teste corresponderam a 220 e 258 kV, respectivamente. Já para os cabos do fabricante Y, 80% das amostras situaram-se na faixa que se estende de 252 a 264 kV (1º e 3º quartis), com valores mínimos e máximos de 243 e 272 kV.

Nos ensaios do Teste B (cabos perfurados), os cabos dos fabricantes X e Y apresentaram valores medianos de ruptura iguais a 248 e 229 kV, respectivamente. Em 60% das amostras do fabricante X foram verificadas disrupções que compreenderam a faixa de tensão que se estende de 234 a 254 kV (1º e 3º quartis). Já nos cabos do fabricante Y, em 60% das amostras ocorreram disrupções na faixa de correspondente ao

1° e 3° quartis (203 a 250 kV), com valores mínimos e máximos de 153 e 252 kV, respectivamente.

Também pode ser observado na Figura 5.3 que os dados referentes aos resultados considerando o cabo do fabricante Y no Teste B (cabo perfurado) apresentaram um maior prolongamento das hastes em relação ao fabricante X. Tal fato indica uma maior dispersão da tensão suportável quando considerados cabos perfurados do fabricante Y. Em apenas uma das amostras, a tensão disruptiva para o cabo danificado atingiu o valor de 153 kV, ao passo que todas as demais exibiram valores superiores a 220 kV. Uma explicação para a menor suportabilidade está fundamentada na distância entre o furo da camada isolante e o ponto aterrado mais próximo, de acordo com detalhes apresentados na próxima seção.

A comparação entre os resultados dos ensaios referentes aos Testes A e B utilizando cabos do fabricante X indica valores superiores de suportabilidade (média e mediana) nos ensaios realizados com o cabo perfurado (Teste B). Entretanto, ao considerar-se o desvio-padrão percentual da média aritmética dos resultados dos ensaios A e B, observa-se a existência de uma região na qual os dois testes apresentam valores disruptivos semelhantes, tendo em vista a variação de 10 kV entre níveis de tensão de ensaio.

Os resultados referentes aos ensaios realizados com cabos novos do fabricante Y indicaram valor de tensão disruptiva média 14,5% superior ao valor associado para cabos perfurados. O maior desvio-padrão em relação à tensão disruptiva média para cabos perfurados, visto na Tabela 5.3 como 18%, é justificado pela presença de uma amostra na qual a tensão disruptiva foi drasticamente reduzida em virtude da perfuração da camada isolante do cabo ser verificada em uma região próxima ao ponto aterrado (ferragens da estrutura). Tal perfuração promove redução significativa na capacidade isolante do cabo.

O Grupo 1 de ensaio (com remoção de cargas estáticas) também foi realizado com tensões de polaridade negativa com cabos do fabricante Z. A distribuição em frequência das tensões disruptivas obtidas é ilustrada na Figura 5.4.

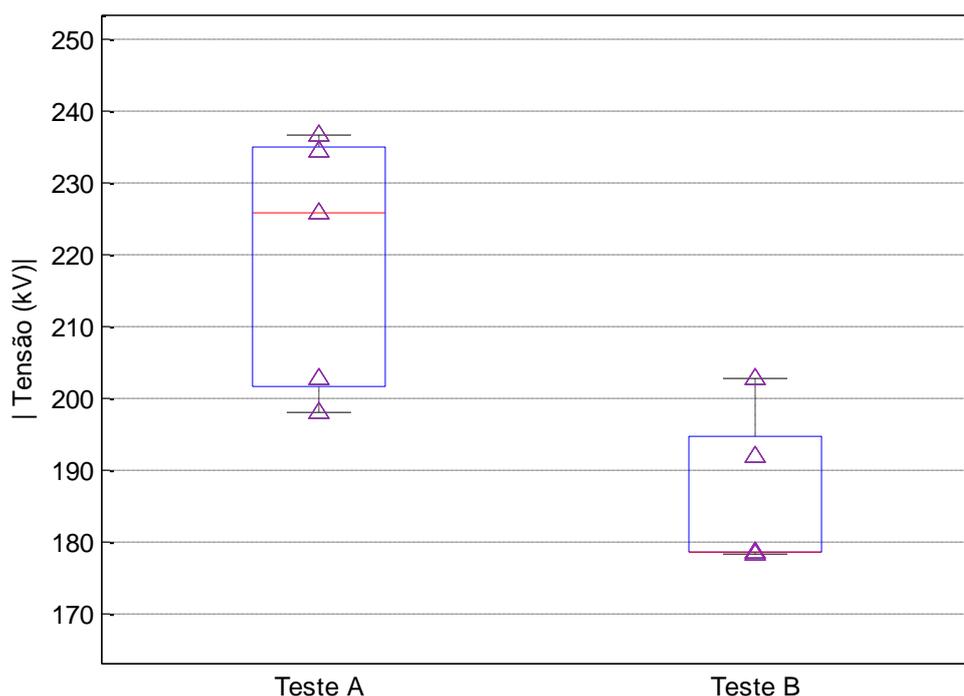


Figura 5.4 Tensões disruptivas obtidas no Grupo 1 (com remoção de cargas estáticas) para tensões de polaridade negativa.

Nos ensaios de suportabilidade referente ao Teste A envolvendo aplicações impulsivas de polaridade negativa, 60% das amostras situaram-se na faixa que se estende de 201 a 235 kV. Para o Teste B, 80% das amostras situaram-se na faixa de tensão compreendida entre 178 e 195 kV, com valores mínimo e máximos iguais a 178 kV e 203 kV, respectivamente.

Por fim, os resultados dos diferentes ensaios quando efetuada a remoção de cargas acumuladas na cobertura isolante do cabo, sem distinção entre fabricantes e com impulsos de ambas as polaridades são agrupados na Figura 5.5.

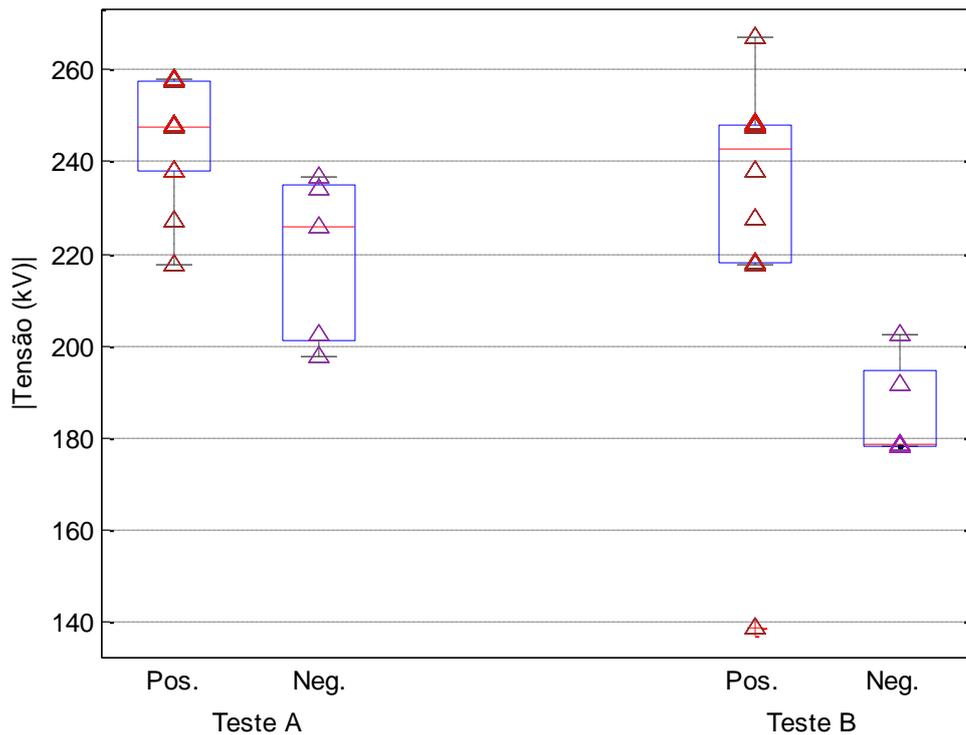


Figura 5.5 Comparação dos resultados dos ensaios referentes aos Testes A e B efetuando-se a remoção de cargas a cada aplicação.

Em relação ao Teste A, a tensão disruptiva mediana para impulsos de tensão de polaridade negativa é aproximadamente 10,4% inferior em relação àquela para impulsos de tensão de polaridade positiva. Considerando o Teste B, o valor mediano de tensão disruptiva para polaridade negativa é aproximadamente 26,7% inferior ao resultado considerando polaridade positiva.

A presença de um *outlier* no Teste B para polaridade positiva destaca uma drástica redução na suportabilidade em uma amostra na qual a perfuração do cabo se deu a 4 cm do isolador.

Sabendo-se que a região de perfuração da cobertura isolante contribui significativamente para a redução da suportabilidade, investiga-se a seguir a distribuição da localização do furo na camada isolante frente às diferentes polaridades de impulsos de tensão aplicados.

5.3.1.2 Perfuração da camada isolante

Uma análise importante a ser realizada a partir da disrupção elétrica nos cabos novos após a realização do Teste A consiste na avaliação da distância entre o furo na camada isolante e as ferragens aterradas que compõem a estrutura suporte do isolador e o percentual de ocorrência em cada faixa.

A Figura 5.6 ilustra a distribuição da distância entre as perfurações na camada isolante e o local onde se situa o isolador de pino, para diferentes amostras, considerando impulsos de tensão de polaridade positiva e negativa e 10 amostras de cada polaridade.

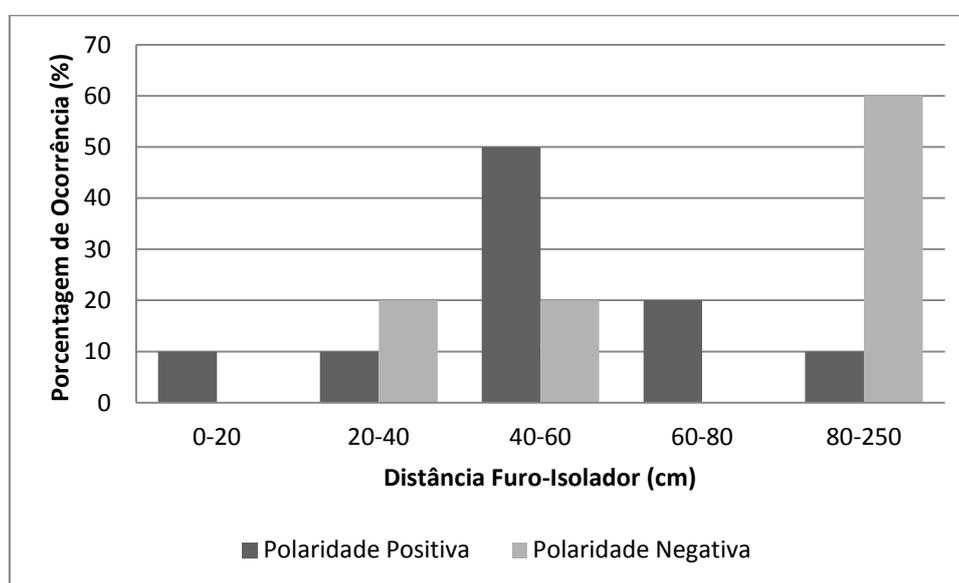


Figura 5.6 Distribuição dos furos ao longo da cobertura isolante para ensaios do Grupo 1 - com remoção de cargas estáticas.

Quando aplicados impulsos de tensão de polaridade positiva verifica-se uma maior concentração de furos na camada isolante na faixa que se estende de 40 a 60 cm do isolador. Para tensões impulsivas de polaridade negativa, em 60% das amostras a perfuração do isolamento do condutor se deu a distâncias superiores a 80 cm.

Em apenas uma das amostras ocorreu perfuração da camada isolante na faixa compreendida de 0 a 20 cm do centro do cabo, a uma distância de 4 cm. Tal perfuração ocorreu para a aplicação de impulsos de tensão de polaridade positiva. Neste caso, houve uma redução significativa na suportabilidade do cabo perfurado, resultando em valor de tensão disruptiva 41,4% inferior em relação à tensão disruptiva mediana

calculada para cabos novos e 33,5% inferior ao valor mediano obtido para cabos perfurados.

Perfurações compreendidas entre 20 a 40 cm do isolador de pino apresentaram redução máxima na suportabilidade de 12,9% em relação à tensão disruptiva mediana calculada para cabos novos por impulsos de polaridade positiva. Na faixa compreendida entre 40 e 60 cm do isolador verifica-se uma redução na suportabilidade de até 12,6% comparado com os resultados obtidos em cabos novos. Para perfurações com distâncias superiores a 80 cm a redução máxima na suportabilidade foi de 8,9%.

Para impulsos de tensão de polaridade negativa, furos detectados na faixa que dista entre 20 e 40 cm do isolador ocasionaram uma redução máxima na suportabilidade de 10,3% em relação à tensão disruptiva mediana calculada para cabos novos. Na faixa compreendida entre 40 e 60 cm do isolador, a redução máxima na suportabilidade foi de 15,0% em relação aos resultados obtidos para cabos novos. Para perfurações com distâncias superiores a 80 cm, a redução máxima na suportabilidade foi de 21,1%. Essa redução na suportabilidade, mesmo com perfurações distantes do centro do cabo, pode ser justificada pela distribuição de cargas ao longo da cobertura isolante, assunto discutido no item "Comentários e discussões" apresentado ao fim desse capítulo.

Vale destacar que a quantidade de amostras de cabos perfurados não foi a mesma para ambas as polaridades de tensão aplicada. Quando ensaiados cabos para a aplicação de impulsos de tensão com polaridade positiva, repetiu-se o ensaio quando alterado o fabricante do cabo (totalizando 10 amostras). Já para ensaios de polaridade negativa, o trabalho investigativo concentrou-se na comparação de suportabilidade para a aplicação de impulsos de tensão de polaridade oposta e não o comportamento de cabos produzidos por diferentes fabricantes. Diante disso, ensaios envolvendo impulsos de tensão de polaridade negativa houve uma menor quantidade de amostras, totalizando cinco amostras de cabo. Ademais, em ensaios envolvendo tensões de polaridade negativa um grande número de interrupções ocorreu para a extremidade do cabo, situação indesejável e desconsiderada de todas as análises numéricas desta dissertação.

5.3.2 Grupo 2 de ensaios - sem remoção de cargas estáticas

5.3.2.1 Suportabilidade a impulsos de tensão

Os valores de tensão disruptiva obtidos para os Testes A e B em cabos com cobertura isolante posicionados na estrutura CM2 sem a realização de remoção de cargas após cada aplicação impulsiva são apresentados na Tabela 5.4. Além das tensões disruptivas médias, calculadas com base na média aritmética das primeiras disrupções elétricas, os valores medianos são também apresentados.

Tabela 5.4 Dados experimentais da estrutura CM2, sem remoção de cargas estáticas- Grupo 2 de ensaios.

Polaridade	Teste realizado	Fabricante	Tensão disruptiva	Tensão disruptiva	Desvio-padrão em relação à Média (%)
			Mediana (kV)	Média (kV)	
Positiva	A	Y	324,9	328,2	3,44
	B	Y	203,8	221,2	40,41
Negativa	A	Z	262,6	271,5	13,72
	B	Z	186,6	188,8	3,387

Em ensaios com cabos novos - Teste A, a tensão disruptiva mediana é de 325 kV para impulsos de tensão de polaridade positiva e de 263 kV para impulsos de tensão de polaridade negativa. Nesse caso, a tensão disruptiva mediana de polaridade negativa é aproximadamente 19% menor do que o resultado obtido para polaridade positiva.

Nos ensaios com condutores já perfurados – Teste B, obteve-se uma tensão disruptiva mediana de 204 kV para a polaridade positiva e 187 kV para a polaridade negativa, ou seja, uma suportabilidade mediante impulsos de tensão negativa 8,3% inferior em relação a impulsos de tensão positiva.

Nos dois testes realizados desconsiderando a remoção das cargas acumuladas na superfície dos cabos a variação máxima da mediana em relação à média foi de 7,9%, caso esse verificado no ensaio envolvendo polaridade positiva de tensão e cabos já perfurados. O desvio-padrão em relação à média nesse caso foi de aproximadamente 40,4%, sendo justificado, novamente, pela redução significativa da suportabilidade em virtude da localização da perfuração da cobertura isolante em algumas amostras.

A Figura 5.7 apresenta a distribuição das tensões disruptivas para as polaridades de tensão positiva e negativa nos ensaios que desconsideraram a remoção das cargas acumuladas na superfície dos cabos.

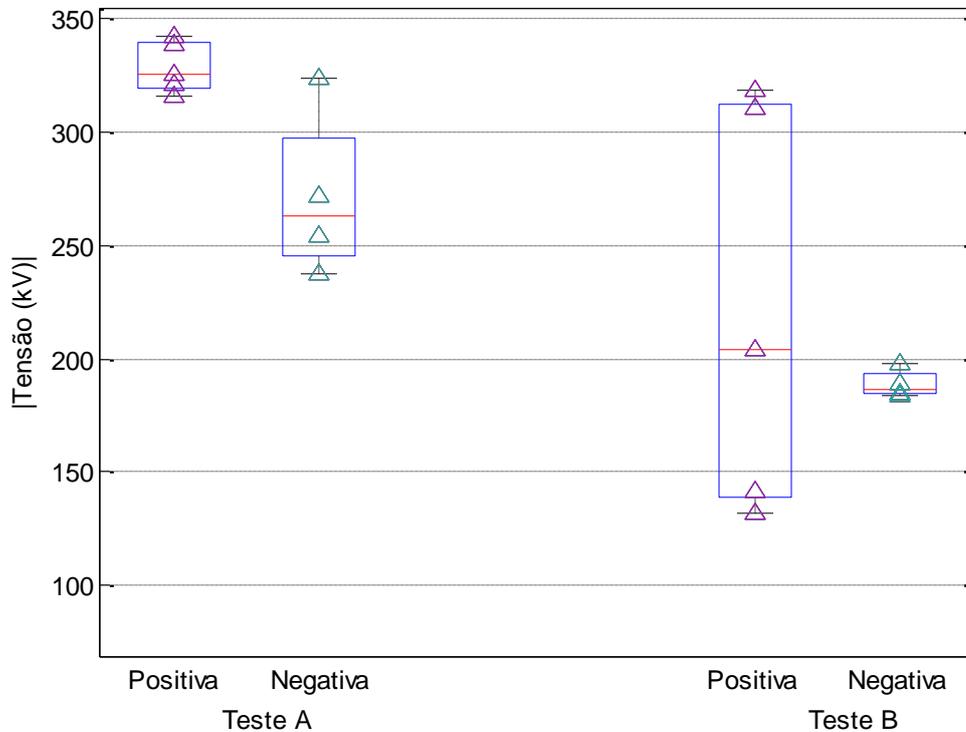


Figura 5.7 Tensões disruptivas obtidas no Grupo 2 (sem remoção de cargas estáticas) com tensões impulsivas de polaridade positiva e negativa.

Com base na Figura 5.7, observa-se que 60% das amostras apresentaram descargas disruptivas na faixa entre 319 e 339 kV para a polaridade positiva; metade das amostras de polaridade negativa ficaram compreendidas entre 246 e 297 kV quando considerou-se o acúmulo de cargas no cabo novo (Teste A).

Os resultados para Teste B apresentam maior dispersão dos valores de tensões disruptivas. Em 60% das amostras ocorreram descargas disruptivas compreendidas na faixa entre 139 e 312 kV para a polaridade positiva e em 75% das amostras ensaiadas com impulsos de tensão de polaridade negativa ocorreram disrupções entre 184 a 193 kV.

Novamente, um grande número de descargas disruptivas ocorreu para a extremidade do cabo quando aplicados impulsos de polaridade negativa. Apesar de essas disrupções terem sido desconsideradas na análise de suportabilidade, ao ser

formado o arco elétrico conectando a extremidade do cabo à ferragem que compõe a estrutura CM2, pressupõe-se um descarregamento de cargas estáticas previamente acumuladas. Isso é evidenciado pela ausência de estampidos ao se aproximar uma escova condutiva e aterrada ao longo da cobertura isolante após uma interrupção para a extremidade do cabo.

5.3.2.2 Perfuração da camada isolante

A grande dispersão na suportabilidade verificada em cabos perfurados pode ser explicada pela distribuição de furos na camada isolante ao longo do cabo, ilustrada na Figura 5.8.

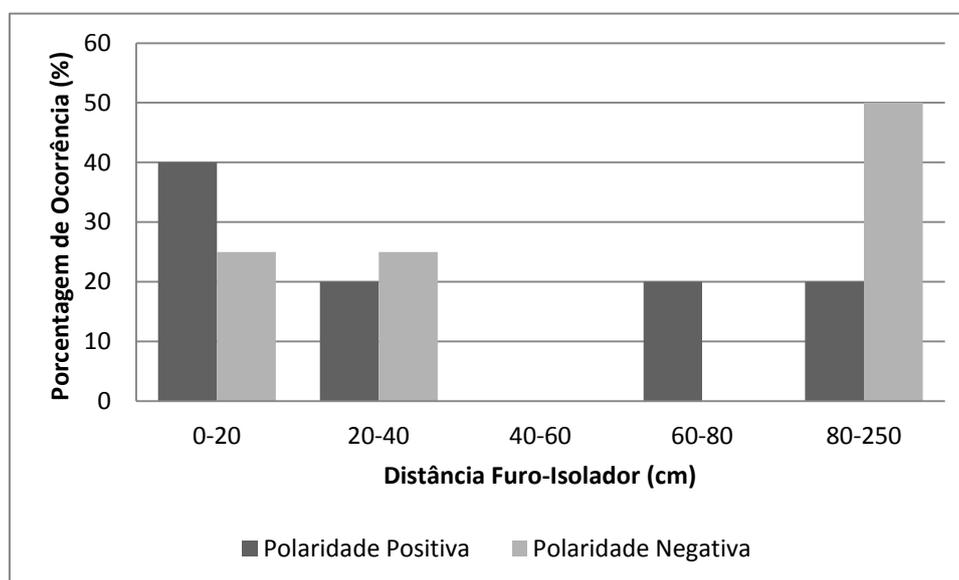


Figura 5.8 Distribuição dos furos ao longo da cobertura isolante referentes aos ensaios do Grupo 2 - sem remoção de cargas estáticas.

Analisando a distribuição de furos ao longo da cobertura isolante de cabos cobertos verifica-se que em 40% das amostras ensaiadas com impulsos de tensão de polaridade positiva as perfurações ocorreram a distâncias inferiores a 20 cm. Em contrapartida, quando aplicados impulsos de tensão com polaridade negativa, 50% das amostras ensaiadas apresentaram perfurações com afastamento superior a 80 cm.

A partir da análise individual de cada amostra ensaiada, pode-se inferir que, para ensaios envolvendo impulsos de tensão com polaridade positiva, quanto mais próxima a perfuração se encontrar do local onde se situa o isolador de pino maior é a redução na suportabilidade de cabos cobertos perfurados, independentemente da remoção ou não de

cargas. Uma síntese dos dados remete que, para distâncias de furos superiores a 40 cm não se verifica redução significativa na suportabilidade de cabos perfurados. Visto que perfurações próximas do isolador de pino acarretam em uma redução da distância de arco, níveis de suportabilidade inferiores àqueles nos quais a camada isolante não se encontra degradada são justificados.

Em ensaios envolvendo impulsos de tensão com polaridade negativa, mais da metade das perfurações ocorreram em distâncias superiores a 93 cm. Mesmo com perfurações distantes, tais impulsos apresentaram elevada redução na suportabilidade. Nesse grupo de ensaios, perfurações próximas e distantes (superiores a 1,5 m, por exemplo) contribuíram para reduções na suportabilidade de mesma ordem (em torno de 28%) em relação aos níveis de suportabilidade obtidos para os cabos novos. Em contrapartida, no grupo 1 de ensaios (com remoção) apenas para distâncias superiores a 60 cm foram verificadas reduções na tensão suportável de, aproximadamente, 20%.

As diferentes suportabilidades envolvendo cabos cobertos frente à aplicação de impulsos de polaridade positiva e negativa podem ser explicadas pela distribuição e densidade de carga superficialmente acumuladas ao longo do cabo, tópico discutido com mais detalhes no item Comentários e discussões.

5.3.3 Comparação entre os resultados obtidos para os grupos 1 e 2 de ensaios: Efeito do acúmulo de cargas na cobertura isolante dos cabos

A Tabela 5.5 apresenta um quadro resumo dos valores medianos de tensão disruptiva obtidos com e sem a remoção das cargas acumuladas na cobertura isolante dos cabos (grupo 1 e 2 de ensaios).

Tabela 5.5 Quadro resumo da tensão disruptiva mediana obtida em ensaios com e sem a remoção de cargas estáticas.

Polaridade	Teste realizado	Tensão disruptiva Mediana Grupo 1 de ensaio (kV)	Tensão disruptiva Mediana Grupo 2 de ensaio (kV)	Varição Percentual entre Grupo 1 e Grupo 2 de ensaio
Positiva	A	252,0	324,9	+28,9
	B	243,6	203,8	-16,3
Negativa	A	225,8	262,6	+16,3
	B	178,54	186,6	+4,5

Avaliando a influência do acúmulo de cargas, observa-se que a não remoção das cargas acumuladas nos cabos promove a elevação na tensão disruptiva em cabos novos de, aproximadamente, 29% e 16% para os impulsos de tensão de polaridade positiva e negativa, respectivamente. No entanto, foi verificado um grande número de descargas superficiais para a terminação do cabo quando da aplicação de impulsos de tensão com polaridade negativa, o que resulta no descarregamento das cargas anteriormente acumuladas. Sendo assim, a suportabilidade calculada para impulsos de polaridade negativa com a consideração do acúmulo de cargas pode não corresponder ao valor real suportado pelo cabo, levando a resultados inconclusivos quanto àqueles obtidos para impulsos de tensão de polaridade positiva.

Uma análise dos resultados obtidos a partir de ensaios com cabos já perfurados mostra que, quando não é realizada a remoção de cargas, a suportabilidade é reduzida em 16% em relação aos resultados dos ensaios que consideraram a remoção de cargas. Este fato é justificado pelo "espalhamento" de cargas ao longo da superfície do cabo que, após a aplicação de cada impulso, se estende por maiores distâncias ao longo deste, de forma a criar um caminho mais propício para desenvolvimento de arco elétrico em um furo previamente formado. Já para impulsos de tensão de polaridade negativa, verifica-se uma pequena variação das tensões disruptivas medianas obtidas em cabos já perfurados quando se comparam os resultados obtidos considerando-se ou não a remoção de cargas acumuladas.

Vale ainda comentar que, para aplicações impulsivas de tensão de polaridade positiva, verifica-se no teste B (cabo perfurado) uma tensão mediana suportável 3,3% inferior àquela calculada para cabos novos quando se efetua a remoção de cargas. Já para impulsos de tensão de polaridade negativa, é presenciada uma maior divergência

na suportabilidade de cabos perfurados, que reduz em 20,9% a tensão disruptiva mediana em comparação com cabos não perfurados.

Comparando-se a tensão mediana suportável obtida para cabos novos frente a sobretensões impulsivas de diferentes polaridades, observa-se que para impulsos de polaridade negativa foi obtido valor 10,4% inferior ao calculado para polaridade positiva.

5.4 Efeito da cobertura isolante na suportabilidade elétrica do cabo: Uma comparação com dados referentes ao cabo nu

Objetivando uma avaliação do papel desempenhado pela cobertura isolante de cabos na elevação da suportabilidade da estrutura CM2 são comparadas as tensões de descarga disruptiva assegurada (U_{90}) para cabos nus com a tensão suportável calculada para cabos cobertos novos ou perfurados, conforme Tabela 5.6. O parâmetro U_{90} é adotado como comparação devido à maior probabilidade de ocorrência de disrupção.

Tabela 5.6 Comparativo de suportabilidade de cabos nus e cobertos na estrutura CM2. Valores corrigidos para condição ambiental de referência.

Polaridade	Tensão de Descarga Disruptiva Assegurada U_{90} (kV)	Tensão Disruptiva Mediana Grupo 1 de Ensaio Cabo Novo (Teste A) (kV)	Tensão Disruptiva Mediana Grupo 1 de Ensaio Cabo Perfurado (Teste B) (kV)
Positiva	133,5	252,0	243,6
Negativa	161,3	225,8	178,5

Com base nos dados obtidos, observa-se que as menores suportabilidades de cabos nus e cobertos ocorrem para as polaridades positivas e negativas, respectivamente.

Comparativamente, para cabos nus e impulsos de polaridade positiva, o valor de U_{90} foi 17,2% menor que o calculado para impulsos de polaridade negativa. Além disso, o valor de U_{50} calculado na Tabela 5.1 (129,9 kV) é 18% maior que a tensão suportável ao impulso fornecida pelo fabricante do isolador de pino (PRYSMIAN, 2015).

Já em cabos cobertos, a tensão disruptiva mediana obtida para a polaridade positiva foi 11,6% superior àquela calculada para polaridade negativa. Em impulsos de tensão de polaridade positiva, o ganho obtido com a introdução da cobertura isolante foi de 88,8% ao passo que para impulsos de polaridade negativa o ganho foi de 39,9%.

Outro ponto que merece destaque consiste na suportabilidade de cabos perfurados. Os valores suportáveis nessa situação estão contidos na faixa de tensão limitada pela suportabilidade de cabos nus e pela suportabilidade de cabos novos. Sendo assim, esse resultado indica a suportabilidade de cabos perfurados como sendo não tão eficiente quando aquela de cabos novos, mas também não tão crítica quanto aquela de cabos nus.

A fim de se relacionar os tempos de ruptura com os valores de tensão disruptiva, apresenta-se na Figura 5.9 a curva Uxt obtida para a estrutura CM2 com cabo nu em conjunto com dados de rupturas correspondentes às amostras de cabos cobertos submetidos a impulsos de tensão de polaridade positiva e negativa.

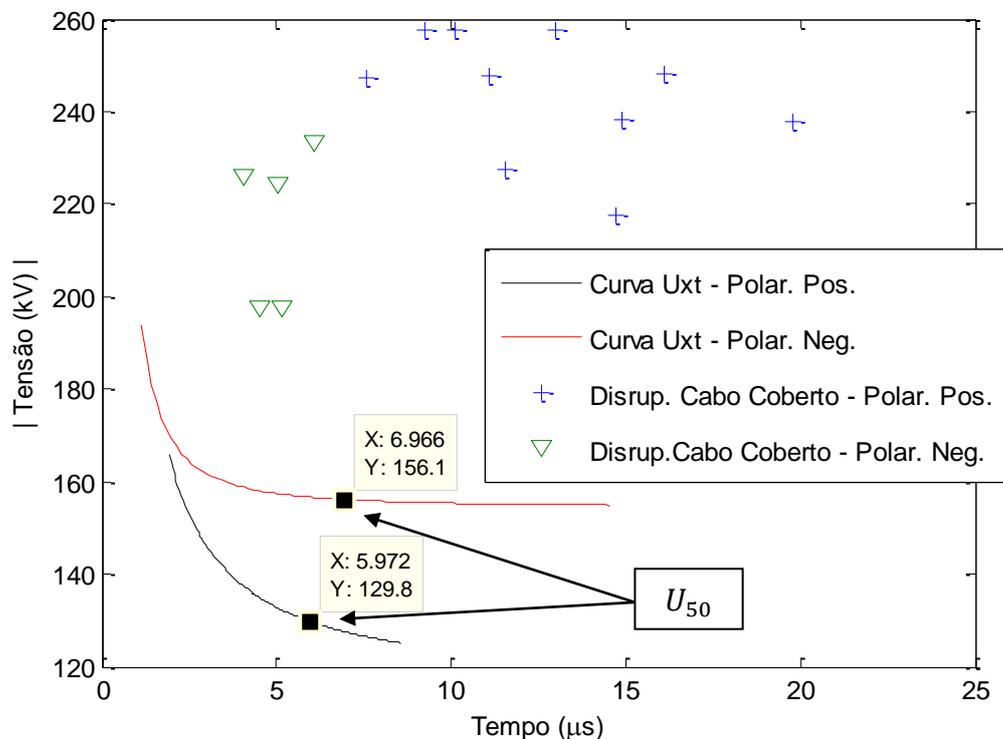


Figura 5.9 Curva Uxt obtida para estrutura CM2 e pares de pontos correspondentes a ensaio com cabos cobertos novos e com a remoção de cargas

Seguindo a tendência da curva U_{xt} , quanto maior a tensão aplicada menor o atraso estatístico na formação da descarga disruptiva. Entretanto, ao serem ensaiados cabos com cobertura isolante, a despeito do maior nível de tensão suportável por estes, são verificados tempos de corte médios superiores àqueles associados ao valor de U_{50} . A Tabela 5.7 apresenta os dados supracitados.

Tabela 5.7 Tempos de corte associados a ensaios na estrutura CM2 com cabos nus e cabos cobertos.

Polaridade	Tempo de Corte na Tensão de Descarga a 50%- Cabo Nu (μ s)	Tempo de Corte Médio em Cabos Cobertos (μ s)
Positiva	5,97	12,80
Negativa	6,97	4,96

Com aplicação de impulsos de tensão de polaridade positiva, o tempo de corte médio em cabos cobertos foi 14,4% maior do que aquele associado ao valor de U_{50} em cabos nus. Para impulsos de tensão de polaridade negativa, o tempo de corte em cabos cobertos foi 28,8% menor que aquele atrelado ao valor de U_{50} em cabos nus.

5.5 Comentários e discussões

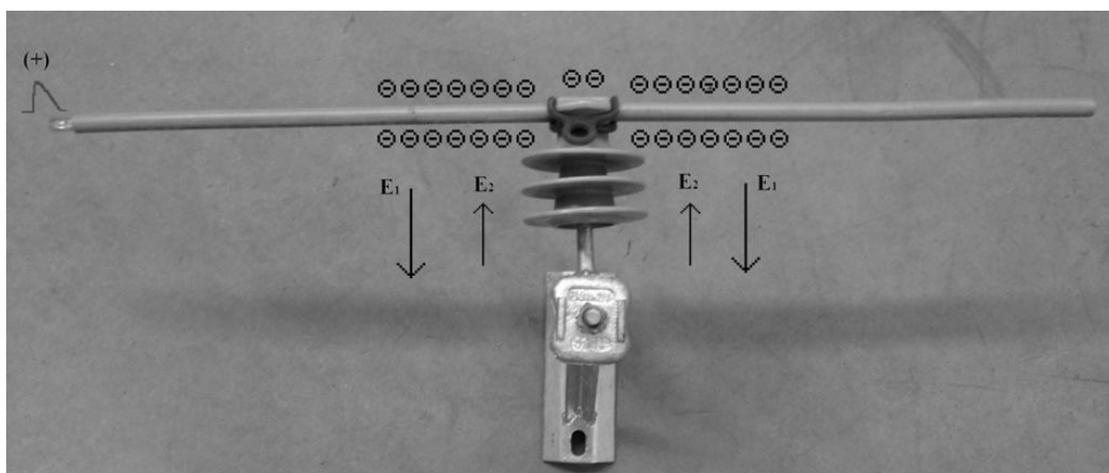
Nesta seção são apresentados comentários que buscam explicar fisicamente alguns dos comportamentos apresentados ao longo deste capítulo de resultados.

5.5.1 Acúmulo de carga

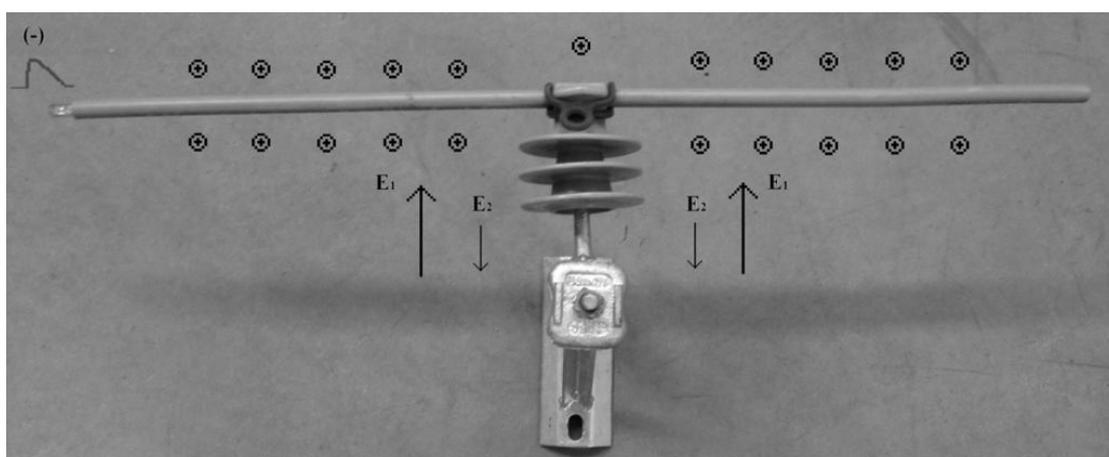
Quando aplicados impulsos de tensão em um condutor são gerados campos elétricos radiais à superfície externa condutora do cabo. Entretanto, com a adição da cobertura isolante no condutor são introduzidas duas condições de fronteira: Uma existente internamente entre a parte metálica condutora e a cobertura isolante e a outra entre a cobertura isolante externa e o ar circunvizinho. Na interface cobertura isolante-ar ocorre uma indução de cargas elétricas dispersas no ambiente, aproximando-as do cabo.

Contudo, devido à presença da camada isolante e do ar, tais cargas tendem a ser aprisionadas na fronteira entre esses dois meios isolantes. Como discutido no capítulo 3 desta dissertação, a polaridade das cargas que se acumulam é oposta à polaridade do impulso de tensão aplicado na parte metálica condutora (HE, 2008).

Quando o campo elétrico crítico suportável por um isolante é excedido, as características isolantes do material deixam de ser verificadas, provocando a chamada ruptura do meio isolante. Na Figura 5.10 são ilustradas as situações nas quais são aplicados impulsos de tensão com polaridade positiva [Figura 5.10(a)] e negativa [Figura 5.10(b)].



(a) Aplicação de impulso de tensão de polaridade positiva



(b) Aplicação de impulso de tensão de polaridade negativa

Figura 5.10 Provável distribuição de cargas estáticas na superfície isolante do condutor.

Com base na Figura 5.10, verifica-se que o impulso de tensão aplicado ao condutor provoca o surgimento de um campo elétrico externo ao cabo (E_1). O acúmulo de cargas de polaridade oposta ao impulso aplicado promove uma atenuação do campo elétrico no ar em função de um novo campo elétrico (E_2) devido ao acúmulo de cargas. Isso resulta no aumento da suportabilidade da estrutura quando instalados cabos cobertos não perfurados e não realizada a remoção de cargas estáticas, conforme resumido na Tabela 5.8

Tabela 5.8 Tensão mediana suportável em função da polaridade e acúmulo de cargas para cabos não perfurados.

Polaridade da Tensão Impulsiva	Tensão Mediana Suportável (kV)	
	Sem Remoção de Cargas	Com Remoção de Cargas
Positiva	324,9	252,04
Negativa	262,6	225,83

Entretanto, ao ser avaliada a suportabilidade em cabos perfurados (Tabela 5.5), o acúmulo de cargas não proporcionou aumento na suportabilidade frente a impulsos de polaridade positiva. Uma possível explicação para este fato está associada à localização de furos na camada isolante. Ao se ensaiar cabos com impulsos de tensão de polaridade positiva sem se realizar a remoção de cargas verificou-se uma maior concentração de furos a distâncias inferiores a 20 cm (Figura 5.8). Por conseguinte, o efeito associado ao acúmulo de cargas é prejudicado pela presença de perfurações próximas ao isolador.

A menor suportabilidade de cabos cobertos perante impulsos de tensão de polaridade negativa pode ser justificada pela distribuição e pela densidade de cargas acumuladas ao longo do cabo condutor. Cargas negativas tendem a se distribuir em menores extensões ao longo da cobertura isolante do cabo. Isso resulta em maiores densidades de carga nas proximidades do isolador, acarretando um campo elétrico de oposição ao impulso aplicado mais significativo. Esse fato implica maior suportabilidade por parte da estrutura quando aplicados impulsos de tensão de polaridade positiva (NAKAMURA, 1986; DARVENIZA, 2000).

Além disso, durante a realização dos ensaios envolvendo impulsos de tensão de polaridade positiva, raramente foram observadas descargas parciais para a extremidade do cabo coberto. Em contrapartida, um grande número de disrupções foram notadas para a extremidade do cabo para impulsos de tensão com polaridade negativa. Mesmo ao se dobrar o comprimento do cabo, os fenômenos de descarga parcial e disrupção para extremidade do cabo permaneceram mais acentuados para os ensaios com impulsos de tensão de polaridade negativa do que para os ensaios com impulsos de tensão com polaridade positiva. Tal comportamento pode estar associado à maior distribuição de cargas positivas ao longo de todo o cabo, conforme ilustrado na Figura 5.10(b).

A rigidez dielétrica do ar (aproximadamente 30 kV/cm) é bastante inferior àquela característica do XLPE (em torno de 500 kV/cm) (SILVA, 2000; VISACRO 2000). Com isso, o ar consiste no meio isolante de menor suportabilidade. Modelando-se a camada de XLPE e o ar como capacitores de placas paralelas em série, a relação entre os campos elétricos aos quais cada material é submetido é apresentada, novamente, como:

$$E_{ar} = \varepsilon_r \cdot E_{sólido} \quad (5.4)$$

Como a permissividade relativa do XLPE é de aproximadamente 2,4 (SILVA, 2000), o ar é submetido a campos elétricos de módulo muito mais intensos. Sendo assim, o ar será o primeiro meio isolante a sofrer ruptura e, caso o campo elétrico não seja suficiente para provocar a ruptura do XLPE, o potencial na parte metálica do cabo não se reduz a zero, ocorrendo a chamada descarga parcial, discutida em maior detalhe no próximo item.

5.5.1.1 Descarga Parcial

Durante os ensaios, houve situações em que a formação do arco elétrico não resultou na queda da tensão impulsiva. Na ocorrência desse efeito, verificou-se a formação de arcos elétricos de baixa intensidade luminosa envolvendo o isolador e a cobertura isolante do cabo. Apesar de não se dispor de registros fotográficos desse efeito na estrutura CM2, esses eventos (ilustrados na Figura 5.11) foram gravados em ensaios envolvendo outras estruturas monofásicas das redes de distribuição compactas, como a CM1 e a CM3, apresentadas em detalhes em (LIMA, 2015a).



(a) Descarga parcial na estrutura CM1.



(b) Descarga parcial na estrutura CM3.

Figura 5.11 Descargas parciais.

Este evento consiste na ocorrência de descargas parciais, ou seja, o sistema isolante XLPE-ar foi parcialmente rompido com a ocorrência da ruptura do ar. Assim, a camada isolante do cabo fica submetida à diferença de potencial em decorrência do impulso de tensão aplicado, aumentando as chances de ruptura no XLPE. Portanto, a descarga parcial é um indício de que o nível máximo de suportabilidade da estrutura está próximo. Na formação de descargas parciais observam-se oscilações na tensão aplicada, conforme ilustradas na Figura 5.12.

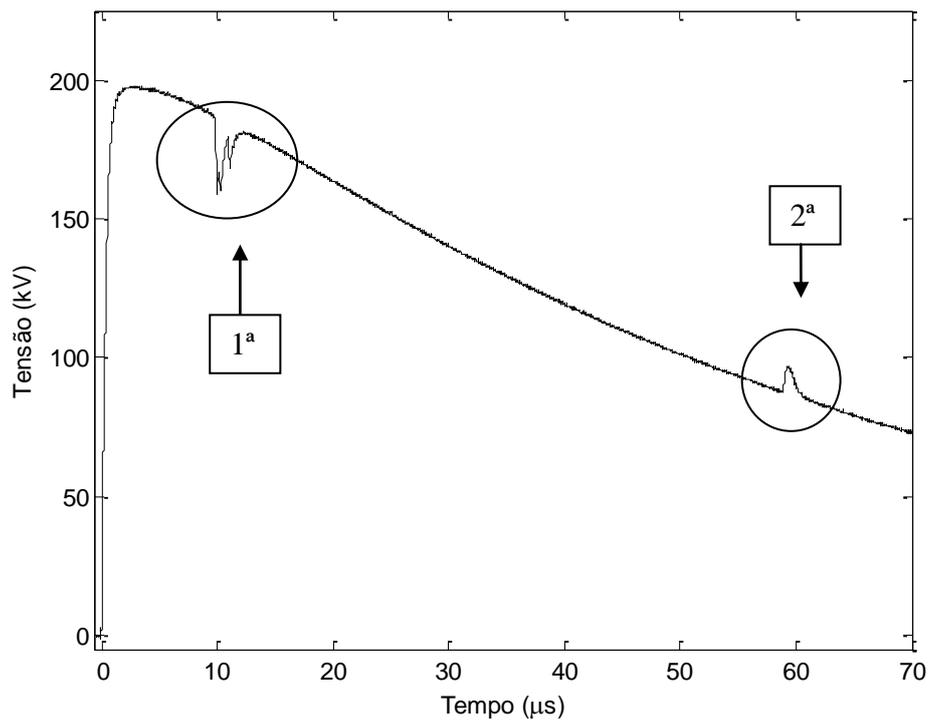


Figura 5.12 Oscilações provocadas na onda de tensão devidas a descargas parciais.

Descargas parciais também podem ser associadas à presença de uma distribuição de cargas ao longo da superfície isolante do cabo, principalmente em regiões iluminadas pelo arco formado. Essa distribuição de cargas é constatada pela presença de estampidos ao se aproximar uma escova aterrada nas proximidades do cabo.

Com intuito de se quantificar a amplitude das oscilações apresentadas na Figura 5.12, pode-se subtrair da forma de onda em questão um impulso de tensão pleno (sem descarga parcial). A Figura 5.13 ilustra a forma de onda de tensão resultante quando aplicados impulsos de polaridade positiva. Neste exemplo, a onda de tensão extraída atinge amplitudes da ordem de 15% do pico da tensão da onda impulsiva aplicada.

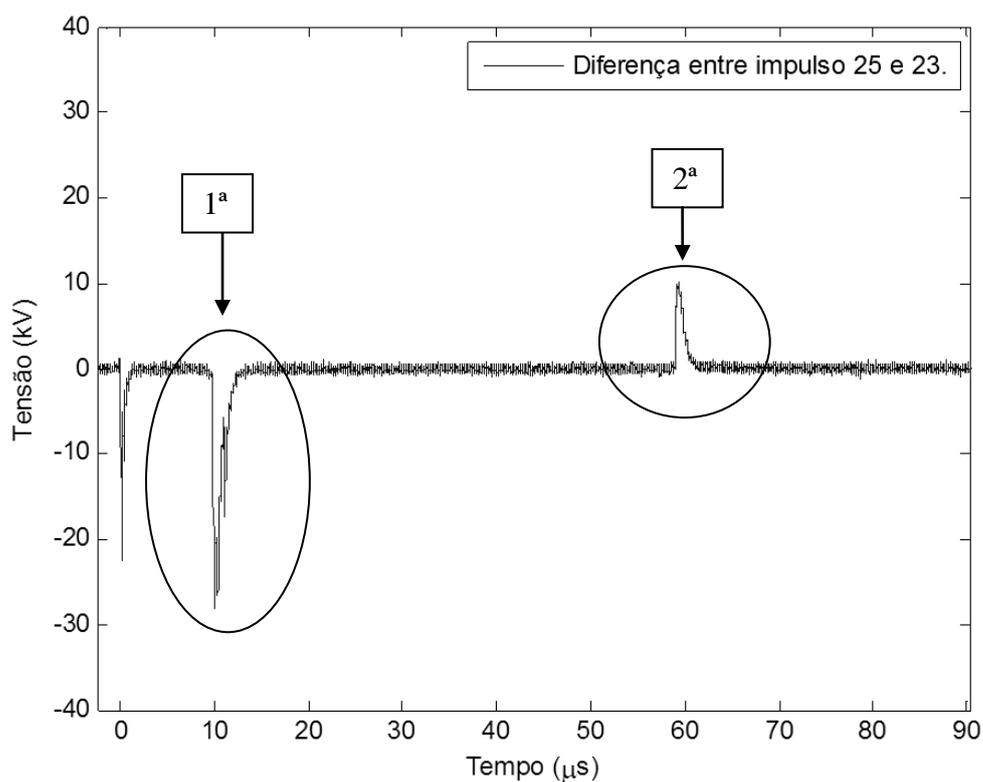


Figura 5.13 Oscilações presenciadas no evento ilustrado na Figura 5.12.

Na Figura 5.14 é apresentado um conjunto de tensões impulsivas relativas ao ensaio de uma amostra de cabo coberto instalado na estrutura CM2.

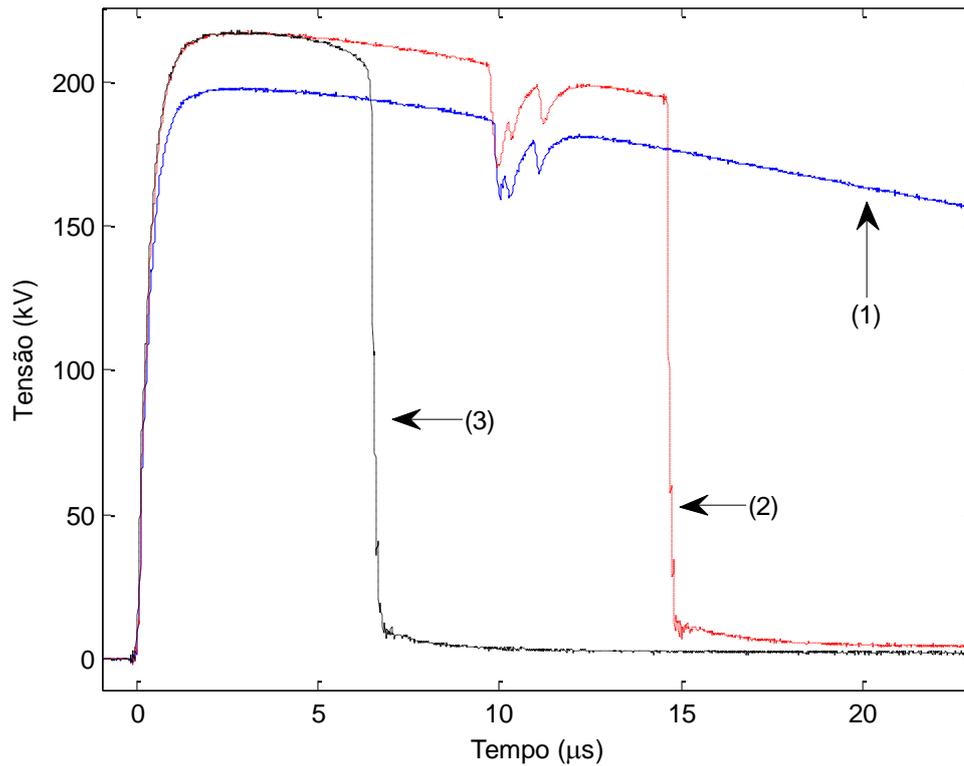


Figura 5.14 Impulsos de tensão positivos em cabo coberto instalado na estrutura CM2. A curva (1) se refere-se ao impulso de tensão no qual verifica-se a ocorrência de descarga parcial no ar, introduzindo cargas na superfície isolante do cabo. A curva (2) se refere ao impulso de tensão no qual ocorre a formação de arco elétrico que causa a perfuração da camada isolante do condutor. A curva (3) se refere ao impulso de tensão no qual se verifica disrupção elétrica para perfuração pré-existente na cobertura do cabo.

Em um cabo novo, ao elevar-se gradativamente o nível de tensão, são presenciadas descargas parciais que ocorrem no ar, conectando estruturas aterradas à cobertura isolante do cabo, como visto no impulso (1) da Figura 5.14. Prosseguindo o aumento na amplitude da tensão impulsiva, oscilações características de uma descarga parcial são verificadas e a tensão é reduzida a valores próximos de zero, conforme indicado no impulso (2) da Figura 5.14. Contudo, desta vez, a cobertura isolante do cabo é submetida a tensões superiores àquelas referentes ao impulso (1). Forma-se então um arco elétrico de brilho e som audível intensos, provocando a perfuração da camada isolante do condutor. Prosseguindo-se com a aplicação de impulsos de tensão, novas disrupções elétricas são presenciadas, dessa vez com a cobertura isolante já degradada. Com o cabo já perfurado, as formas de onda se assemelham àquelas medidas em ensaios com cabos nus, Figura 4.23.

Em algumas situações essas variações também foram verificadas quando ocorridas disrupções para furos pré-existentes, principalmente quando a perfuração era

localizada em porções distantes do isolador (acima de 80 cm). Diante disso, oscilações seguidas de uma redução acentuada na tensão podem estar associadas a um descarregamento de cargas acumuladas na superfície isolante do cabo com posterior falha de isolamento.

A Figura 5.15(a) ilustra o descarregamento de cargas e a perfuração da camada isolante. Já na Figura 5.15-(b) é apresentada uma disrupção na qual o arco elétrico apresenta uma de suas terminações para a perfuração da camada isolante.

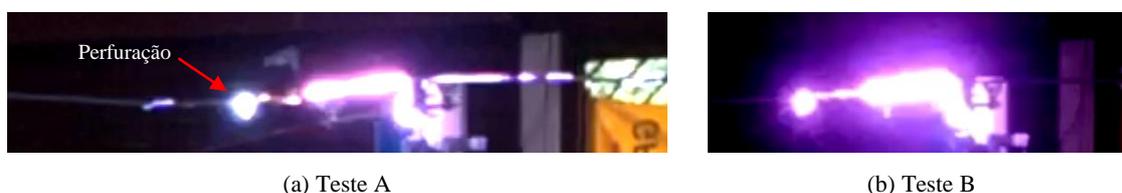


Figura 5.15 Disrupção elétrica com perfuração da camada isolante do condutor. Amostras realizado-se Testes A(cabo novo) e Teste B (cabo perfurado).

Por fim, na Figura 5.16 é apresentado um cabo ensaiado no qual houve perfuração da camada isolante em virtude de uma solitação superior ao seu nível de suportabilidade.



Figura 5.16 Perfuração de um cabo coberto.

6 Conclusões e Propostas de Continuidade

6.1 Considerações iniciais

Esta dissertação de mestrado teve como objetivo o estudo do comportamento de cabos cobertos, tipicamente empregados em redes de distribuição aéreas compactas por concessionárias brasileiras, frente a impulsos de tensão característicos de fenômenos atmosféricos. Tendo em vista o surgimento de fenômenos elétricos não verificados em cabos nus de distribuição aéreas convencionais, fez-se necessário um estudo prévio de mecanismos de falha de isolamento em meios isolantes sólidos e gasosos a fim de se prover um panorama dos efeitos que acompanham a inserção de camada isolante em cabos. Neste contexto, no capítulo 2 desta dissertação abordou-se os principais mecanismos de falha em meios isolantes gasosos e sólidos. Posteriormente, no capítulo 3, foram citados trabalhos de relevância realizados por outros autores no que se refere à suportabilidade de cabos cobertos. Além disso, foi dado foco em fenômenos importantes, tais como a propagação do arco elétrico com posterior rompimento de condutores, descargas parciais e acúmulo de cargas, passíveis de ocorrência com o emprego de cabos cobertos. Em seguida, no capítulo 4 foi apresentada uma descrição detalhada do ambiente de realização dos ensaios e dos equipamentos utilizados, bem como a apresentação de procedimentos e conceitos importantes para a realização dos ensaios. Também foi apresentado o detalhamento da estrutura de rede a ser testada, denominada CM2, escolhida por apresentar os menores valores de suportabilidade segundo testes previamente realizados. Os resultados e comentários acerca dos ensaios laboratoriais foram descritos no capítulo 5.

Por fim, as conclusões desta dissertação de mestrado em conjunto com as propostas de continuidade são apresentadas ao longo desse capítulo.

6.2 Conclusões

Dados de concessionárias de energia elétrica têm sugerido que a substituição das redes de distribuição convencionais pelas redes compactas é eficiente na redução de desligamentos não programados no sistema elétrico. Em virtude da camada polimérica isolante dos cabos, o contato momentâneo e acidental entre estes cabos ou com estruturas aterradas não determina a ocorrência de faltas no sistema elétrico. Entretanto, algumas peculiaridades devem ser levadas em consideração, principalmente no tocante às sobretensões de origem atmosférica, principal causa de desligamento nas redes de distribuição aéreas. Diante dessa situação, nesta dissertação de mestrado foram avaliados os efeitos proporcionados pela cobertura isolante na suportabilidade de cabos cobertos em uma estrutura monofásica típica utilizada em redes de distribuição compactas da CEMIG (CM2).

Adotou-se como caso crítico para avaliação do impacto da cobertura isolante na suportabilidade da estrutura CM2 os resultados obtidos com o emprego de cabos nus. Em virtude da norma ABNT (2013) conter procedimentos de ensaio para avaliação da suportabilidade de meios isolantes classificados como autorrecuperantes, a obtenção desses parâmetros foi de relativa simplicidade. Nos ensaios realizados com impulsos de tensão atmosféricos normalizados, foram calculados valores de U_{90} iguais a 133,5 kV e 161,3 kV para impulsos de tensão de polaridade positiva e negativa, respectivamente. Esse resultado confirma a expectativa de menor suportabilidade da estrutura com cabo nu à aplicação de impulsos de tensão de polaridade positiva, com uma redução de 17,3% em relação ao valor obtido para a aplicação de tensões com polaridade negativa.

Entretanto, a norma ABNT (2013) não apresenta procedimentos de ensaio para determinação da suportabilidade quando introduzidos meios isolantes não autorrecuperantes, tampouco correções atmosféricas para estas situações. Em vista disso, assim como realizado por Lima (2015a), foi necessária a criação de procedimentos de ensaio capazes de avaliar o nível de suportabilidade de cabos com cobertura isolante, além de uma extensão dos métodos de correção atmosférica para meios isolantes não autorregenerativos. Deste modo, tornou-se necessária a criação de dois diferentes métodos de ensaio quando considerados cabos cobertos montados na estrutura CM2. No primeiro foi conduzida a remoção de cargas após cada aplicação

impulsiva no cabo (Grupo 1) e o segundo consistiu na realização de testes sem a remoção das cargas acumuladas na superfície isolante do cabo (Grupo 2). Dessa forma, a análise da influência do acúmulo de cargas na suportabilidade da estrutura pôde ser quantificada.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios considerando cabos cobertos indicaram uma inversão do comportamento observado para cabos nus, ou seja, a estrutura apresentou menor suportabilidade frente a impulsos de tensão de polaridade negativa. A suportabilidade mediana calculada para impulsos de polaridade negativa foi de 225,8 kV, 10,4% inferior ao valor mediano calculado para impulsos de polaridade positiva (252 kV). Isso indica a influência não somente da polaridade, mas também do meio isolante na suportabilidade da estrutura. Em situações que envolvem o emprego de cabos nus, sobretensões de polaridade positiva levam a uma menor suportabilidade da estrutura avaliada; quando considerado um cabo com cobertura de XLPE, sobretensões de polaridade negativa resultam em menores suportabilidades por parte da estrutura.

Em relação ao parâmetro U_{90} calculado para cabos nus, a tensão mediana suportável obtida para cabos cobertos se mostrou consideravelmente superior, independentemente da polaridade da tensão impulsiva aplicada. Com o emprego de cabos nus, calculou-se o valor de U_{90} de 134 kV para impulsos de tensão de polaridade positiva ao passo que, em cabos cobertos, a tensão suportável mediana elevou-se para 252 kV, exibindo um aumento de 88%. Essa mesma comparação (U_{90} x tensão disruptiva mediana) para impulsos de tensão de polaridade negativa exibiu um aumento de 161 kV para 226 kV, um acréscimo de aproximadamente 40% na suportabilidade quando empregados cabos cobertos.

Os ensaios em cabos cobertos também possibilitaram a identificação de descargas parciais que levam a um acúmulo de cargas na superfície isolante dos cabos testados.. Observou-se que a não remoção das cargas acumuladas em cabos promoveu uma elevação na tensão disruptiva mediana de, aproximadamente, 29% e 16% para os impulsos de tensão de polaridade positiva e negativa, respectivamente. Uma ressalva acerca do aumento na suportabilidade da estrutura frente a impulsos de tensão de polaridade negativa deve ser feita. Descargas superficiais foram verificadas para a extremidade do cabo, levando à remoção natural de cargas que se acumularam em

impulsos anteriores. Sendo assim, apesar do valor suportável não ser o real presenciado em condições normais de operação, ele pode ser visto como um indicativo razoável de suportabilidade. Por conseguinte, não foi possível uma total eliminação de descargas superficiais para a extremidade do cabo em virtude do elevado comprimento necessário nos testes com polaridades negativas.

Outra observação importante extraída deste trabalho reside na distribuição de cargas positivas e negativas ao longo da cobertura isolante do cabo. A premissa de que cargas positivas e negativas apresentam distribuições e densidades distintas ao longo do cabo explica a menor suportabilidade de cabos cobertos frente a impulsos de polaridade negativa.

O efeito de perfurações na cobertura isolante de cabos também foi considerado na determinação da suportabilidade da estrutura. Verificou-se que perfurações localizadas a distâncias próximas ao isolador (0 a 20 cm) acarretaram uma redução máxima na tensão disruptiva de 41,4% ao passo que, para distâncias superiores a 40 cm, não se verificou redução significativa na suportabilidade de cabos perfurados na estrutura em análise considerando aplicações de tensão de polaridade positiva.

6.3 Propostas de Continuidade

Com a presente dissertação de mestrado foi possível conhecer os fenômenos inerentes ao uso de cabos cobertos em redes de distribuição e os possíveis mecanismos de perfuração de sua cobertura isolante frente a tensões com características impulsivas. Os desenvolvimentos aqui apresentados suscitam a continuidade do trabalho para a investigação de aspectos relevantes do tema.

Dentre os pontos que merecem ser explorados em trabalhos futuros destaca-se a investigação, através de ensaios, da localização da distribuição das cargas acumuladas ao longo da cobertura isolante, bem como a medição dessas cargas. Outro ponto de interesse consiste no maior controle da região de perfuração para obtenção de uma melhor caracterização da redução na suportabilidade em função da distância para o ponto aterrado mais próximo. Propõe-se também o estudo do efeito de outras formas de onda de tensão nos processos observados em cabos cobertos e o estudo da

suportabilidade da camada isolante frente a essas ondas. Além disso, a realização de ensaios para outras condições de estruturas e acessórios típicos de rede de distribuição compacta com cabos cobertos (amarrações, isoladores, tipos de cobertura isolante, etc) podem contribuir para obtenção de mais elementos relativos ao comportamento desses cabos frente a sobretensões atmosféricas. Por fim, como proposta de continuidade são também sugeridos ensaios envolvendo cabos cobertos retirados de serviço por apresentar sinais de degradação em sua cobertura isolante a fim de avaliar a redução na suportabilidade de cabos.

Referências Bibliográficas

ANCAJIMA, A., CARRUS, A., CINIERI, E., MAZZETTI, C., "Optimal selection of disruptive effect models parameters for the reproduction of MV insulators volt-time characteristics under standard and non standard lightning impulses," in *Power Tech Conf.*, Lausanne, Switzerland, 2007, pp. 760-765.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão. Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio.", ABNT NBR IEC 60060-1, 2013.

BOUFORD, J. D., "Spacer Cable Reduces Tree Caused Customer Interruptions", In: *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, 2008.

CALDWELL, R. O., DARVENIZA, M., "Experimental and analytical Studies of the effect of non-standard waveshapes on the impulse strength of external insulation," *IEEE Trans. Power. App. Syst.*, vol. 92, no. 4, pp. 1420-1428, julho, 1973.

CEEE, "Materiais para Redes Aéreas de Distribuição - Isoladores", Companhia Estadual de Energia Elétrica, Rio Grande do Sul, código PTD-00.001, seção 3-6, 2011.

CEMIG, "Especificação Técnica: Cabos de Alumínio Cobertos para Média Tensão", Relatório 02.118, 2008.

CEMIG, "Instalações Básicas de Redes de Distribuição Compactas", ND - 2.9, 2012.

DARVENIZA, M., "Electrical Breakdown of Air Between Insulated Conductors", In: *Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, XI'an Jiaotong University, XI'an, China, junho 21-26, 2000

DEVORE, J. L., "Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências", Thomson, São Paulo, 2006.

EICHHORN, R. M., "**Treeing, A Mechanism of Breakdown in Solid Dielectrics**", In: Proceedings of IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference, Toronto, Canada, junho 3-6, 1990.

FAGUNDES, R. C., "**Avaliação de Acessórios Poliméricos de Redes Compactas Protegidas por meio de Ensaio de Multiestressamento e Simulação Computacional**", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2008.

GOLDMAN, N., SIGMOND, R. S., "**Corona and Insulation**", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-17, no. 2, abril, 1982.

GOMES, R. M., LIMA, G. S., DE CONTI, A., SILVEIRA, F. H., VISACRO, S., SOUZA, W. A., LIMA, J. L., "**Volt-time curve measurements of 15-kV distribution line polymeric insulators and estimation of DE parameters**", Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Nagoya, Japan, junho , 2015

HAEFELY, "**Operating Instructions: SGSA 600-30**", KA 11100592, Switzerland, 2011.

HAYT, W. H., BUCK, J. A., "**Eletromagnetismo**". 6ª Ed., LTC, 2003.

HE, J., GU, S., CHEN, S., ZENG, R., CHEN, W., "**Discussion on Measures Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines**", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, p. 693-702, abril, 2008.

HILEMAN, A. R., "**Insulation Coordination for Power Systems**", CRC Press, Florida, USA, 1999.

IEC 60270, "**High-voltage test techniques - Partial discharge measurements**", International Electrotechnical Commission (IEC), Switzerland, 2000.

IEEE, "**Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines**", IEEE Std. 1410-1997.

IEEE, "**Standard for High-Voltage Testing Techniques**", IEEE Std. 4-2013.

KIND, D., **“Die aufbaufläche bei stoss-spannungsbeanspruchung, technischer elektroanordnungen in luft”** *ETZ-A*, vol. 79, pp. 65-9, 1958.

KUFFEL, E., ZAENGL, W. S., KUFFEL, J., **"High Voltage Engineering - Fundamentals"**, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.

KUNHARDT, E. E., TZENG, Y., **"Development of an electron avalanche and its transition into streamers"**, The American Physical Society, vol. 38, p. 1410-1421, agosto, 1988.

LEE, R. E., FRITZ, D. E., STILLER, P. H., FELLOW, D. F. S., **"Prevention of Covered Conductor Burndown on Distribution Circuits - Arcing Protection Devices"**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, p. 2434-2438, agosto, 1982.

LIMA, G. S., **"Avaliação da Suportabilidade de Estruturas Monofásicas de Redes de Distribuição Aéreas Compactas Frente a Impulsos Atmosféricos Padronizados"**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), outubro 2015a.

LIMA, G. S., GOMES, R. M., SOUZA, R. E., 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"**, International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Balneário Camboriú, Brasil, setembro, 2015b.

LOEB, L. B., and MEEK, J. M., **"The Mechanism of Electric Spark"**, Stanford University Press, 1940.

LUCAS, J. R., **"High Voltage Engineering"**, Colombo, Open University of Sri Lanka, 2001.

MEISTER, D., **"Aplicação do Método dos Mínimos Quadrados na estimação de parâmetros do modelo de um transformador"**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE. DM-284A/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

MOROOKA, S., YOKOYAMA, S., ASAKAWA, A., **"Protection of power distribution lines against lightning-induced overvoltages by means of surge arresters and overhead ground wire"**, in Proc. 8th Int. Symp. High Voltage Engineering, Yokoyama, Japan, agosto. 23-27, 1993, pp. 397-400.

NAKAMURA, K., MCKENNY, P. J., ADAMS, G., FERNANDES, R., RUSHDEN, F., **"Impulse Breakdown Characteristics of 13.2 kV Covered Conductor Insulator/Tie Configurations"**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-1, p. 250-258, outubro, 1986.

NBR 15688, **"Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus"**, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

NTD-RE-001, **"Montagem de Redes de Distribuição Compacta Protegida - Classe 15 kV"**, REDE Empresas de Energia Elétrica, 2009.

O'DWYER, J. J., **"Breakdown in Solid Dielectrics"**, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-17, dezembro, 1982.

PARKMAN, N., **"Electrical Breakdown by Tracking"**, In: Proceedings of International Conference on Components and Materials used in Electronic Engineering, n. 3723 p. 448-453, junho, 1961.

PRYSMIAN CABLES AND SYSTEMS, **"Isolador de Pino Polimérico 15 kV"**, Disponível em: < http://br.prysmiangroup.com/br/files/isolador_pino_polimerico.pdf>, Acesso em 05 de junho de 2015.

RAETHER, H., **"Electron Avalanches and Breakdown in Gases"**, Butterworths, London, 1964.

RAJKUMAR, K., **"Breakdown in Solid Dielectric"**, Disponível em:< <https://srirajkumar.files.wordpress.com/2012/07/breakdown-in-solid-dielectrics.pdf>>. Acesso em: 21 abril 2015.

ROCHA, R. C. C., BERRÊDO, R. C., BERNIS, R. A. O., GOMES, E. M., CICARELLI, L. D., SOARES, M. R., **"New Technologies, Standards, and**

Maintenance Methods in Spacer Cable Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, p. 562-568, 2002.

SCHMIDT, W., **"Materiais Elétricos - Isolantes e Magnéticos"**, Editora Blucher, vol. 2, 2010.

SEKIOKA, S., MIYAZAKI, T. OKABE, S., **"Measured Results of Flashover Characteristics of Distribution Lines Insulators for Sustaining Insulated Cable"**, In: Proceedings of XVII International Conference on Gas Discharge and Their Applications, GD 2008, p. 301-304, 2008.

SILVA, G. C., **"Comportamento Elétrico e Dielétrico de Cabos de Potência Extrudados Utilizados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica,"** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2000.

SILVEIRA, F. H., **"Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas"**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), dezembro, 2006.

SOUZA, W. A., **"Estudo do Comportamento de Estruturas de Redes de Distribuição Compactas Frente A Sobretensões Impulsivas"**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), fevereiro, 2015.

TOWNSEND, J. S., **"Electricity in Gases"**, Oxford Press, 1914.

TRINH, N. G., JORDAN, J. B., **"Modes of Corona Discharges in Air"**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-87, maio, 1968.

VISACRO, S., **"Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia"**, Artliber Editora, Brasil, 2005.

VISACRO, S., **"Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanism of Overvoltage Formation and Their Influence on the Lightning Performance on Lines"**, J. Lightning Res., 2007;

WADHWA, C. L., "**High Voltage Engineering**", 2nd Ed., New Age International Publishers, New Delhi, 2007.