

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS E
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE INVÓLUCROS
DE PEAD PARA APLICAÇÃO EM PARA-RAIOS DE
DISTRIBUIÇÃO**

IVAN PAULO DE FARIA

Itajubá, Maio de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IVAN PAULO DE FARIA

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE INVÓLUCROS DE PEAD PARA APLICAÇÃO EM PARA-RAIOS DE DISTRIBUIÇÃO

Tese submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto

Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez (in memoriam)

CO-ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. Alvaro Antonio Alencar de Queiroz

Itajubá, Maio de 2016

DEDICATÓRIA

Ao meu amigo e orientador em vida deste trabalho, Professor Manuel Luis Barreira Martinez (in memoriam), por ser uma referência pessoal e profissional, pela oportunidade cedida para que eu pudesse realizar meu doutorado junto ao LAT-EFEI, pelos conselhos e ensinamentos a mim prestados. Meus sinceros agradecimentos.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Manuel Luis Barreira Martinez, por ter me cedido à oportunidade de trabalhar no LAT-EFEI, por ter sempre me orientado ao longo do desenvolvimento deste trabalho, por ter compartilhado, de forma gratificante, sua imensa experiência na área de proteção contra surtos de tensão.
- Ao Prof. Estácio Tavares Wanderley Neto, pela orientação junto a este trabalho e pela prestatividade em auxiliar no desenvolvimento dos ensaios realizados.
- Ao Prof. Alvaro Antonio Alencar de Queiroz, por toda a orientação e os ensinamentos compartilhados durante o desenvolvimento desta pesquisa, principalmente voltados para a área de materiais poliméricos.
- À minha esposa, Michelly Martuchele Santos, pelo apoio, paciência e compreensão e por estar sempre ao meu lado e disposta a me ajudar.
- Aos meus pais Donizete e Lúcia, muito obrigado pelo incentivo e apoio sempre a mim prestados. Aos meus irmãos Lucas e Gabriel e a minha irmã Tainara, pelo carinho, atenção e amor que continuamente demonstraram.
- Aos colegas de trabalho do Laboratório de Alta Tensão, pelo apoio prestado e pela amizade.
- Ao Prof. Marcel Fernando da Costa Parentoni, por ter me incentivado na escrita deste trabalho.
- À CAPES, PLP Brasil e AES Sul, pelo suporte financeiro concedido para a realização desta pesquisa.
- A Deus, pela vida.

RESUMO

Os para-raios são equipamentos elétricos amplamente utilizados na proteção do sistema elétrico contra sobretensões. Atualmente, os supressores de surtos, empregados em redes de distribuição de média tensão, têm seus invólucros constituídos por materiais poliméricos, sendo os tipos mais comuns as borrachas de silicone, etileno propileno (EPR), etileno propileno dieno (EPDM) e suas blendas. Entretanto, os dielétricos poliméricos atualmente utilizados são susceptíveis a degradação devido ao ácido nítrico, gerado pelo efeito corona na presença de umidade, e ao ácido sulfúrico, presente em chuvas ácidas. Outro ponto relevante se refere aos custos de aquisição dos materiais isolantes, em específico, a borracha de silicone, que apresenta valores relativamente elevados comparados com o polietileno de alta densidade (PEAD). Neste sentido, além de apresentar vantagens econômicas, o PEAD apresenta também desempenho satisfatório na presença de ácidos nítrico e sulfúrico. Adicionalmente, o polietileno de alta densidade é passível de reciclagem, fato não observado nos materiais atualmente utilizados como invólucros de para-raios. Desta forma, este trabalho tem por objetivo avaliar a aplicabilidade do PEAD na fabricação de invólucros de para-raios de distribuição. Para tanto, foram produzidos diversos protótipos de para-raios de PEAD e, posteriormente, ensaiados de acordo com os critérios definidos na norma IEC 60099-4. Os resultados dos ensaios realizados foram balizando as modificações propostas nos invólucros dos protótipos, sendo que desempenhos satisfatórios foram alcançados através da utilização do PEAD plastificado. Os para-raios com invólucros de PEAD plastificado apresentaram uma redução dos custos totais de fabricação em torno de 20%, comparando com os para-raios de invólucros em borracha de silicone. Em relação ao preço médio dos para-raios poliméricos atuais, como os constituídos por silicone, EPR, EPDM e suas blendas, observou-se uma redução dos preços da ordem de 15%. Portanto, os para-raios de PEAD plastificado são atrativos tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Atualmente, mais de três mil unidades dos para-raios de PEAD plastificado foram produzidas pela empresa PLP e parte se encontra instalada nas redes de distribuição da concessionária de energia AES Sul. Os resultados da operação vêm indicando bom desempenho destes novos supressores de surtos, sugerindo um produto promissor para o mercado de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Invólucros de Para-raios de Distribuição, Materiais Poliméricos, Polietileno de Alta Densidade.

ABSTRACT

Surge arresters are widely applied in electrical systems to protect equipments from overvoltages. Currently, surge suppressors used in distribution networks have their housings made of polymeric materials. The most common types are rubbers of silicone (SiR), ethylene propylene (EPR), ethylene propylene diene (EPDM) and their blends. However, polymeric materials currently used are susceptible to corrosion due to nitric acid, formed during corona activity in presence of moisture, and sulfuric acid, present on acid rain. Considering the large number of surge arresters installed on medium voltage networks and their mass-productions volume, the economical analysis plays an important role. Silicone rubber exhibits relatively high costs compared with high density polyethylene (HDPE). Additionally, HDPE also shows satisfactory performance in the presence of nitric and sulfuric acids. Moreover, high density polyethylene can be recycled, what is not observed on materials currently used in polymer housed arresters. Hence, this study aims at investigating the application of HDPE for manufacturing distribution surge arresters housings. For this purpose, several prototypes of HDPE surge arresters were produced and tested, according to IEC 60099-4 standard. Satisfactory performances were achieved using a plasticized HDPE housing. The arresters with plasticized HDPE housing showed a reduction of manufacturing costs around 20% compared to silicone rubber. Regarding the average price of polymer housed arrester of SiR, EPR, EPDM and their blends, there was a price reduction about 15%. Therefore, the plasticized HDPE surge arresters housings are attractive technically and economically. More than three thousand units of plasticized HDPE surge arresters were manufactured and part of these has being installed in medium voltage networks of AES Sul electric distribution utility. The operation results have indicated good performance of these new surge suppressors and their appear to be suitable for the electricity distribution market.

Keywords: Distribution Surge Arresters Housings, Polymeric Materials, High Density Polyethylene.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1 SUMÁRIO	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xvi
1 <i>Introdução</i>	1
1.1 Considerações Iniciais	2
1.2 Relevância do Tema	2
1.3 Objetivo e Contribuições Esperadas	7
1.4 Estrutura da Tese	8
2 <i>Fundamentação Teórica</i>	10
2.1 Considerações Iniciais	11
2.2 Breve Histórico sobre Para-raios	11
2.3 Desempenho de Materiais Poliméricos Comumente Utilizados em Invólucros de Para-raios	16
2.3.1 Ensaios de Envelhecimento do Invólucro de Para-raios Poliméricos	16
2.3.2 Ensaios de Curto-circuito em Para-raios Poliméricos	32
2.4 Utilização de Polietileno na Manufatura de Equipamentos Elétricos	37
2.4.1 Breve Descrição sobre o Polietileno	37
2.4.2 Aplicações do Polietileno em Equipamentos Elétricos de Média e Alta Tensão 40	
2.4.3 Desempenho do Polietileno em Equipamentos Elétricos de Média e Alta Tensão 42	
2.5 Considerações Finais	51
3 <i>Ensaio Elétrico e Análise do Desempenho do Primeiro Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD</i>	53
3.1 Considerações Iniciais	54
3.2 Construção do Primeiro Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD	54
3.3 Ensaio Elétrico	58
3.3.1 Ensaio de Curto-circuito	58
3.3.2 Ensaio de Envelhecimento em Névoa Salina	62
3.3.3 Ensaio de Tensão Suportável de Longo Prazo sob Chuva	65
3.3.4 Ensaio de Ciclo Térmico	67
3.4 Considerações Finais	68
4 <i>Ensaio Elétrico e Análise do Desempenho do Segundo Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD</i>	69
4.1 Considerações Iniciais	70
4.2 Construção e Ajustes no Segundo Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD 70	
4.2.1 Etapa de Processamento do Material Polimérico	71
4.2.2 Etapa de Injeção do Segundo Protótipo de Para-raios	75
4.3 Ensaio Elétrico	76
4.3.1 Ensaio de Envelhecimento em Névoa Salina	77
4.4 Considerações Finais	85

5	<i>Ensaio Elétrico e Análise do Desempenho do Terceiro Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD</i>	86
5.1	Considerações Iniciais	87
5.2	Construção e Ajustes no Terceiro Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD	87
5.3	Ensaio Elétrico	90
5.3.1	Ensaio de Envelhecimento em Névoa Salina	91
5.3.2	Ensaio de Curto-circuito	94
5.3.3	Ensaio de Ciclo de Operação	98
5.3.4	Ensaio de Imersão em Água	103
5.4	Análise dos Resultados	105
5.5	Considerações Finais	106
6	<i>Análises Físico-Químicas Antes e Após o Ensaio de Envelhecimento do Terceiro Protótipo de Para-raios</i>	107
6.1	Considerações Iniciais	108
6.2	Ensaio Físico-Químico	108
6.2.1	Difração de Raios-X de Alto Ângulo (WAXRD)	108
6.2.2	Espectroscopia no Infravermelho por Transformadas de Fourier (FTIR/ATR)	110
6.2.3	Análise Termogravimétrica (TGA)	112
6.2.4	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	115
6.2.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM)	117
6.2.6	Microscopia de Força Atômica (AFM)	118
6.2.7	Avaliação do Peso Molecular Médio	120
6.2.8	Ângulo de Contato	121
6.3	Análise Geral dos Resultados	124
6.4	Comparação do PEAD Plastificado com Invólucros de Silicone e EPDM	126
6.4.1	Degradação Ácida	126
6.4.2	Energia de Ativação	129
6.4.3	Ângulo de Contato	130
6.5	Considerações Finais	133
7	<i>Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros</i>	134
7.1	Considerações Iniciais	135
7.2	Resultados Alcançados	135
7.3	Trabalhos Publicados	138
7.4	Sugestões para Trabalhos Futuros	139
8	<i>Referências Bibliográficas</i>	140

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Comportamento da massa relativa das amostras ensaiadas em relação ao tempo de ensaio.	3
Figura 1.2 – Exemplos das amostras após o ensaio de imersão em ácido nítrico. (a) e (b) Amostras de EPDM; (c) amostra de SiR.	4
Figura 1.3 – Exemplo do aumento da fragilidade de saias de isoladores poliméricos de SiR. Fonte: (ZIMMERMAN, 2014).	4
Figura 1.4 – Danificação de isoladores poliméricos de SiR por ataque de pássaros. Fonte: (ZIMMERMAN, 2013).	5
Figura 1.5 – Levantamento dos preços do PEAD e silicone praticados no Brasil. Fonte: Revista Plástico Moderno, N° 487 a 491, Editora QD Limitada.	6
Figura 2.1 – Exemplo de um para-raios constituído por centelhadores em série com resistores. Adaptada de (TORCHIO, 1905).	11
Figura 2.2 – (a) Exemplo construtivo do para-raios eletrolítico; (b) Característica de operação de uma célula não-linear. Adaptada de (WOODWORTH, 2011).	12
Figura 2.3 – (a) Exemplo construtivo do para-raios de filme de óxido; (b) Detalhe do centelhador utilizado em série com as células de peróxido de chumbo. Fonte: (LOUGEE, 1920).	13
Figura 2.4 – Primeiro para-raios a carboneto de silício. Adaptada de (MCFARLIN, 1930).	14
Figura 2.5 – Relação entre tensão e corrente nos resistores não lineares de óxido de zinco (ZnO) e a carboneto de silício (SiC). Fonte: (SAKSHAUG et al., 1977).	14
Figura 2.6 – Comparação entre o para-raios polimérico e de porcelana. Adaptada de (LENK et al., 1988).	15
Figura 2.7 – Amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento. Adaptada de (LENK et al., 1988).	17
Figura 2.8 – Comportamento da corrente de fuga DC em função do tempo de ensaio. (a) Tensão aplicada em ambiente com elevada umidade; (b) Ensaio de imersão em água aquecida. Traduzida de (LAHTI et al., 1999).	20
Figura 2.9 – Comportamento da corrente de fuga DC após o ensaio de imersão em água em ebulição. (a) Para-raios do tipo A; (b) Comparação dos para-raios do tipo A e D. Traduzida de (LAHTI et al., 1998).	21
Figura 2.10 – Procedimento de ensaio realizado nos para-raios poliméricos. Traduzida do trabalho de (LAHTI et al., 2002).	22
Figura 2.11 – Comportamento da corrente de fuga DC, perdas e descargas parciais durante o ensaio de imersão em água a 50 °C. (a) Para-raios do tipo A; (b) para-raios do tipo B; (c) para-raios do tipo D; (d) para-raios do tipo E. Traduzida do trabalho de (LAHTI et al., 2002).	23
Figura 2.12 – (a) Comportamento da corrente de fuga total em função do tempo de ensaio de imersão. (b) Medição das descargas parciais após cada semana de ensaio. Traduzida de (PERROT e MACKINLAY, 1999).	24
Figura 2.13 – Perfis dos invólucros dos para-raios avaliados. Fonte: (CHERNEY et al., 2001).	25
Figura 2.14 – Comportamento das perdas totais dos para-raios em função do tempo de ensaio. (a) Para-raios A1 e A2. (b) Para-raios B1 e B2. Traduzida do trabalho de (CHERNEY et al., 2001).	26
Figura 2.15 – Registros fotográficos obtidos após os ensaios de envelhecimento. (a) Degradação do suporte isolante dos para-raios A3 e A4; (b) erosão ao longo da linha do	

molde ocorrida na amostra A1; (c) erosão ao logo da linha do molde observada para a amostra C1. Fonte: (CHERNEY et al., 2001).....	27
Figura 2.16 – Comportamento das perdas totais dos para-raios ao longo do ciclo de ensaio. (a) Para-raios com invólucros de EPDM/SiR. (b) Para-raios com invólucros de SiR. Traduzida do trabalho de (MILLER et al., 1999).....	28
Figura 2.17 – Comportamento da corrente de fuga dos para-raios durante os ensaios de envelhecimento multifatorial. (a) Para-raios com invólucros de EPDM/SiR. (b) Para-raios com invólucros de SiR. Traduzida do trabalho de (KESTER et al., 1998).	29
Figura 2.18 – Variação da hidrofobicidade do invólucro durante o ensaio de envelhecimento. Traduzida do trabalho de (SUNDARARAJAN et al., 2006).	31
Figura 2.19 – Comportamento da corrente de fuga total em função do tempo de ensaio para os para-raios de (a) EPR/SiR e (b) SiR. Traduzida do trabalho de (SUNDARARAJAN et al., 2006).	31
Figura 2.20 – Ensaio de curto-circuito em para-raios poliméricos. (a) Antes e (b) após o ensaio de 20 kA, 17 ms. Fonte: (LENK et al., 1988).....	32
Figura 2.21 – Resultados dos ensaios de curto-circuito. (a) Ejeção de fragmentos; (b) Separação entre o para-raios e seus conectores do circuito de potência. Traduzida do trabalho de (COLOMBO et al., 1996).	34
Figura 2.22 – Resultados dos ensaios de curto-circuito em relação a ignição do material polimérico. Traduzida do trabalho de (COLOMBO et al., 1996).....	35
Figura 2.23 – Para-raios polimérico submetido ao ensaio de curto-circuito. (a) Antes e (b) após a aplicação de 50 kA. Fonte: (MOBEDJINA et al., 1998).....	36
Figura 2.24 – Para-raios polimérico submetido ao ensaio de curto-circuito. (a) Para-raios reprovado no ensaio de curto-circuito; (b) Para-raios aprovado no ensaio de curto-circuito. Fonte: (TAYLOR, 2000).	37
Figura 2.25 – Resultados de ensaios de curto circuito em para-raios poliméricos para corrente de 63 kA com duração de 200 ms. (a) Para-raios Siemens; (b) Para-raios ABB. Fonte: (RICHTER et al., 2013).....	37
Figura 2.26 – Representação simplificada das cadeias poliméricas e suas ramificações. Traduzida de (THUE, 2005).	38
Figura 2.27 – Exemplo simplificado das regiões cristalinas e amorfas do polietileno. Adaptada de (THUE, 2005).	39
Figura 2.28 – Morfologia do polietileno. F, dobras lamelares da cadeia polimérica. C, projeções. L, espiras. T, junções. E, conexões. Traduzida do trabalho de (JONES et al., 2005).	39
Figura 2.29 – Exemplos de cabos com isolamento de polietileno. (a) Isolação de PEBD, condutor de cobre de 1600 mm ² , tensão nominal de 400 kV; (b) Isolação de PEAD, condutor de cobre de 800 mm ² , tensão nominal de 225 kV; (c) Amostras de cabos isolado de XLPE. Adaptada de (ARRIGHI, 1984).....	41
Figura 2.30 – Exemplos de espaçadores de PEAD. (a) Espaçador monofásico; (b) espaçador losangular trifásico. Fonte: (PLP, 2015).	42
Figura 2.31 – Exemplos de isoladores de PEAD. (a) Isolador tipo pino; (b) isolador tipo pilar. Fonte: (PLP, 2015).	42
Figura 2.32 – Amostra de cabo isolado em EPR de 45 kV, com cobertura de polietileno. Adaptada de (DAVINI et al., 1967).....	43
Figura 2.33 – Resultados dos ensaios realizados em materiais isolantes. (a) Permissividade dielétrica relativa em função da temperatura; (b) resistência a descargas parciais e (c) resistência térmica. Traduzida do trabalho de (DAVINI et al., 1967).....	44
Figura 2.34 – Falha na cobertura de um dos cabos ensaiados. Fonte: (KELLAM, 1963).....	44

Figura 2.35 – Arborescência observada em cabos de média tensão com isolamento em PEAPM e XLPE. (a) Vista da seção transversal do cabo; (b) detalhe da arborescência. Fonte: (VAHLSTROM, 1971).	45
Figura 2.36 – (a) Formato diferenciado de arborescência; (b) presença de micro cavidades e sinais de arborescência. Fonte: (LAWSON e VAHLSTROM, 1972).	45
Figura 2.37 – Diferentes tipos de arborescência. (a) Arborescência elétrica; (b) arborescência em água. Fonte: (EICHHORN, 1976).	46
Figura 2.38 – Arborescência eletroquímica. Fonte: (EICHHORN, 1976).	47
Figura 2.39 – Comportamento da arborescência em dielétricos. (a) PEAPM convencional e (b) PEAPM com inibidor de arborescência (dodecanol). Fonte: (MCMAHON, 1981).	47
Figura 2.40 – Tensão disruptiva dos cabos isolados: (a) frequência industrial; (b) impulso atmosférico. Traduzida de (KATZ e WALKER (1998)).	48
Figura 2.41 – (a) Esquemático do circuito de ensaio utilizado; (b) exemplo de curva $V \times t$ obtida para espaçadores e cabos cobertos utilizados em redes compactas. Traduzida de (GILL et al., 1967).	49
Figura 2.42 – Expectativa de vida útil de cabos cobertos de PEBD em função das descargas superficiais. Traduzida de (HARROLD e DAKIN, 1976).	50
Figura 2.43 – Comparação dos resultados obtidos entre isoladores e cabos cobertos. (a) Isolador e pino poliméricos; (b) isolador de porcelana e pino metálico aterrado. Fonte: NOBREGA (2011).	51
Figura 3.1 – Vista frontal do primeiro protótipo de para-raios de classe 15 kV.	55
Figura 3.2 – (a) Esquemático do processo de fabricação da parte ativa do para-raios; (b) detalhe do módulo do para-raios após encapsulamento em fibra de vidro e resina epóxi.	55
Figura 3.3 – Exemplo de um módulo dos para-raios de tensão nominal de 15 kV produzido pela PLP e utilizado nesse trabalho.	56
Figura 3.4 – Unidade do primeiro protótipo de para-raios produzidos com invólucros de PEAD. (a) Vista superior; (b) vista frontal.	57
Figura 3.5 – Montagem do primeiro protótipo de para-raios de PEAD de tensão nominal de 24 kV para o ensaio de curto-circuito. Fonte: CEPEL.	59
Figura 3.6 – Registros fotográficos do ensaio de curto-circuito. (a) Parte polimérica arremessada durante a aplicação de corrente de 3 kA; (b) Ignição do para-raios sem a auto-extinção das chamas no intervalo de 2 minutos. Fonte: CEPEL.	60
Figura 3.7 – Estrutura do para-raios após o ensaio de curto-circuito de 3 kA. Fonte: CEPEL.	61
Figura 3.8 – Esquemático do circuito de ensaio de envelhecimento em névoa salina. Fonte de tensão AC de 150 kV, 20 kVA; divisor de tensão capacitivo de relação de transformação de 1000:1.	62
Figura 3.9 – Falha observada durante a realização do ensaio de envelhecimento em névoa salina no primeiro protótipo de para-raios de PEAD. Perfuração e queima do material polimérico, trincas e acúmulo de sal na parte inferior das saias dos para-raios.	63
Figura 3.10 – Falha no invólucro do primeiro protótipo de para-raios de PEAD durante o ensaio de envelhecimento com concentração salina reduzida para 5 kg/m ³ de sal em água.	64
Figura 3.11 – Ilustração do sistema de ensaio de tensão suportável de longa duração sob chuva. Fonte de tensão AC de 150 kV, 20 kVA; divisor de tensão capacitivo de relação de transformação de 1000:1.	66
Figura 3.12 – (a) Três unidades do primeiro protótipo de para-raios durante o ensaio de tensão suportável de longa duração sob chuva. (b) Para-raios após a finalização dos ensaios.	66

Figura 3.13 – Apresentação dos ciclos térmicos aplicados ao invólucro do primeiro protótipo de para-raios.	67
Figura 3.14 – Amostras após o ensaio de ciclo térmico.	68
Figura 4.1 – (a) Extrusora de dupla rosca utilizada para o processamento do material polimérico; (b) Detalhe da saída de material processado. Fonte: INT/MCT.....	73
Figura 4.2 – Detalha da mistura de PEAD juntamente com o agente plastificante (concentração de 5% em massa) e as cargas minerais.....	73
Figura 4.3 – Aumento da não homogeneidade da mistura de PEAD com aditivos plastificantes (concentração de 10% em massa) e cargas minerais.....	74
Figura 4.4 – Vista superior da saia do segundo protótipo de para-raios em PEAD, evidenciando a rugosidade superficial.....	75
Figura 4.5 – Detalhe das pequenas trincas observadas entre as junções das saias e do corpo do para-raios.	76
Figura 4.6 – Delaminação do material polimérico observado para 10% de concentração de aditivo plastificante.....	76
Figura 4.7 – Exemplo de observações do Tipo 1: Para-raios em condições normais de operação.....	78
Figura 4.8 – Exemplo de observações do Tipo 2: Acúmulo de partículas de sal ao longo da estrutura do para-raios.	78
Figura 4.9 – Exemplo de observações do Tipo 3: Aumento das trincas ao longo do corpo do para-raios.	78
Figura 4.10 – Exemplos de observações do Tipo 4: Falha do para-raios durante o ensaio de envelhecimento.....	79
Figura 4.11 – Ilustrações das descargas superficiais observadas durante os ensaios de envelhecimento em névoa salina.	79
Figura 4.12 – Comportamento da corrente de fuga durante o ensaio de envelhecimento do segundo protótipo de para-raios.....	81
Figura 4.13 – Exemplo de imagem térmica registrada durante o ensaio.....	82
Figura 4.14 – Detecção da região de maior sollicitação térmica culminando, posteriormente, na falha do segundo protótipo de para-raios, formulação 1.....	82
Figura 4.15 – Detecção da região de maior sollicitação térmica culminando, posteriormente, na falha do segundo protótipo de para-raios, formulação 5.....	83
Figura 4.16 – Bolha formada após a falha do segundo protótipo de para-raios, formulação 5.	83
Figura 4.17 – Detalhe das micro-cavidades existentes ao longo do invólucro do segundo protótipo de para-raios.....	84
Figura 5.1 – Terceiro protótipo de para-raios de PEAD: (a) vista superior; (b) vista frontal.	90
Figura 5.2 – Comportamento da corrente de fuga do terceiro protótipo de para-raios em função do tempo de ensaio.....	92
Figura 5.3 – Comparação da corrente de fuga do segundo e terceiro protótipo de para-raios de PEAD.	92
Figura 5.4 – Detalhe da região entre as saias dos para-raios: (a) para-raios antes do ensaio; (b) para-raios após o ensaio.	93
Figura 5.5 – Detalhe do ensaio de curto-circuito. Fonte: VEIKI-VNL.....	94
Figura 5.6 – Detalhe do para-raios: (a) antes e (b) após o ensaio de curto-circuito de 16 kA, 200 ms. Fonte: VEIKI-VNL.....	95
Figura 5.7 – Detalhe do para-raios: (a) antes e (b) após o ensaio de curto-circuito de 6 kA, 200 ms. Fonte: VEIKI-VNL.....	96
Figura 5.8 – Detalhe do para-raios: (a) antes e (b) após o ensaio de curto-circuito de 3 kA, 200 ms. Fonte: VEIKI-VNL.....	96

Figura 5.9 – Detalhe do para-raios: (a) antes e (b) após o ensaio de curto-circuito de 600 A, 1 s. Fonte: VEIKI-VNL.	97
Figura 5.10 – Detalhe do arco elétrico formado durante o ensaio de curto-circuito de 16 kA, 200 ms. Fonte: VEIKI-VNL.	98
Figura 5.11 – Esquemático do ensaio de ciclo de operação. Adaptada do trabalho de HIRINCHSEN (2011).	99
Figura 5.12 – Ilustração do diagrama elétrico do circuito de ensaio de ciclo de operação.	100
Figura 5.13 – Impulso de corrente de 5 kA, formato 8/20 μ s. Valor de pico da corrente de 5,25 kA, tempo de frente de 7,63 μ s, tempo de cauda de 21,2 μ s.	101
Figura 5.14 – Impulso de corrente de 65 kA, formato 4/10 μ s. Valor de pico da corrente de 62,9 kA, tempo de frente de 3,88 μ s, tempo de cauda de 9 μ s.	101
Figura 5.15 – Impulso de alta corrente: (a) Medição da corrente de pico de 66,7 kA e (b) medição da tensão residual de 45,9 kV.	102
Figura 5.16 – Unidades do terceiro protótipo de para-raios de PEAD após o ensaio de ciclo de operação.	103
Figura 5.17 – Unidades do terceiro protótipo de para-raios após o ensaio de imersão em água.	105
Figura 6.1 – Difração de raios-x nas amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes do ensaio de envelhecimento.	109
Figura 6.2 – Difração de raios-x nas amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtida após o ensaio de envelhecimento.	109
Figura 6.3 – Ilustração do mecanismo de degradação do PEAD durante o ensaio de envelhecimento.	111
Figura 6.4 – Espectro no infravermelho do ensaio de FTIR/ATR para amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes do ensaio de envelhecimento.	111
Figura 6.5 – Espectro no infravermelho do ensaio de FTIR/ATR para amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas após o ensaio de envelhecimento.	112
Figura 6.6 – TGA das amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes do ensaio de envelhecimento.	113
Figura 6.7 – TGA das amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas após o ensaio de envelhecimento.	114
Figura 6.8 – Correlação entre $\ln(\phi/Tp^2)$ e Tp para as amostras de PEAD novas (A) e envelhecidas (B).	115
Figura 6.9 – Resultados do ensaio de DSC para amostra de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes do ensaio de envelhecimento.	116
Figura 6.10 – Resultados do ensaio de DSC para amostra de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas após o ensaio de envelhecimento.	116
Figura 6.11 – SEM das amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios obtidas (a) antes e (b) após os ensaios de envelhecimento.	118
Figura 6.12 – Morfologia do polietileno de alta densidade através da representação por esferulitos. Fonte: (JONES et al., 2005).	119
Figura 6.13 – Resultado do ensaio de AFM para amostras de PEAD retiradas do terceiro protótipo de para-raios antes do ensaio de envelhecimento.	120
Figura 6.14 – Resultado do ensaio de AFM para amostras de PEAD retiradas do terceiro protótipo de para-raios após o ensaio de envelhecimento.	120
Figura 6.15 – Relação entre a viscosidade intrínseca e a concentração do PEAD (A) antes e (B) após o ensaio de envelhecimento.	121
Figura 6.16 – Gotas de água destilada de 10 μ L na superfície do PEAD (a) antes e (b) após o ensaio de envelhecimento.	123
Figura 6.17 – Vista superior dos para-raios em condições úmidas: (a) para-raios novo e (b) para-raios após ensaio de envelhecimento em névoa salina.	124

Figura 6.18 – Vista frontal dos para-raios em condições úmidas: (a) para-raios novo e (b) para-raios após ensaio de envelhecimento em névoa salina.	124
Figura 6.19 – Comportamento de amostras de SiR, EPDM e PEAD durante o ensaio de imersão em ácido sulfúrico (H_2SO_4), a temperatura de 60 °C.	128
Figura 6.20 – Comportamento de amostras de SiR, EPDM e PEAD durante o ensaio de imersão em ácido nítrico (HNO_3), a temperatura de 60 °C.	128
Figura 6.21 – Exemplo do comportamento hidrofílico de materiais, de acordo com (STIR, 1992).	130
Figura 6.22 – Erosão observada nos isoladores de borracha de silicone após o ensaio de envelhecimento em névoa salina com duração de 50 dias. Traduzida do trabalho de (MARUNGSRI et al., 2006)	131
Figura 6.23 – Presença de gotas de água observadas no terceiro protótipo de para-raios de PEAD plastificado após o ensaio de envelhecimento em névoa salina.	132
Figura 7.1 – (a) Vista frontal do para-raios de 24 kV retirado de campo; (b) detalhe da bolha observada entre as saias do dispositivo, indicando, possivelmente, falha no processo de injeção da peça.	138

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Resultados dos ensaios de envelhecimento em névoa salina nos para-raios poliméricos. Adaptada do trabalho de (CHAUDHRY et al., 1991).	18
Tabela 2.2 – Valores típicos de corrente de fuga mensurados durante o ensaio de envelhecimento em névoa salina. Adaptada do trabalho de (CHAUDHRY et al., 1991).	19
Tabela 2.3 – Descrição dos para-raios comerciais ensaiados. Adaptada do trabalho de (LAHTI et al., 1999).	20
Tabela 2.4 – Características dos para-raios avaliados. Traduzida do trabalho de (CHERNEY et al., 2001).	25
Tabela 2.5 – Descrição do ciclo diário de ensaio. Adaptada do trabalho de (KESTER et al., 1998).	29
Tabela 2.6 – Descrição do para-raios submetidos aos ensaios de curto-circuito. Adaptada do trabalho de (COLOMBO et al., 1996).	34
Tabela 3.1 – Características do primeiro protótipo de para-raios de PEAD.	58
Tabela 4.1 – Descrição das formulações utilizadas no processamento do material polimérico.	72
Tabela 4.2 – Resumo do acompanhamento do ensaio de envelhecimento realizado no segundo protótipo de para-raios de PEAD – Formulação 1.	80
Tabela 4.3 – Resumo do acompanhamento do ensaio de envelhecimento realizado no segundo protótipo de para-raios de PEAD – Formulação 3.	80
Tabela 4.4 – Resumo do acompanhamento do ensaio de envelhecimento realizado no segundo protótipo de para-raios de PEAD – Formulação 5.	81
Tabela 5.1 – Resultados do ensaio DSC para as amostras de PEAD e PEAD plastificado. .	89
Tabela 5.2 – Resistência a tração, deformação na ruptura e módulo de Young para o PEAD e PEAD plastificado.	89
Tabela 5.3 – Resumo do acompanhamento do ensaio de envelhecimento realizado no terceiro protótipo de para-raios de PEAD.	91
Tabela 5.4 – Valores padronizados para o ensaio de curto-circuito de acordo com a norma (IEC 60099-4, 2009).	94
Tabela 5.5 – Medições realizadas durante os ensaios de curto-circuito. Fonte: VEIKI-VNL.	95
Tabela 5.6 – Tensão residual dos para-raios antes do ensaio de ciclo de operação.	101
Tabela 5.7 – Tensão residual dos para-raios após o ensaio de ciclo de operação.	102
Tabela 5.8 – Comparação dos valores de tensão residual dos para-raios.	103
Tabela 5.9 – Comparação dos valores das perdas resistivas dos para-raios antes e após o ensaio de imersão em água.	104
Tabela 5.10 – Comparação dos valores de tensão residual dos para-raios antes e após o ensaio de imersão em água.	104
Tabela 6.1 – Resultados da análise termogravimétrica do PEAD novo e envelhecido.	115
Tabela 6.2 – Resultados da análise de DSC para amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes e após o ensaio de envelhecimento, sendo exibidas a temperatura de fusão (T_m), a temperatura de transição vítra (T_g), a entalpia de fusão (ΔH_F) e o índice de cristalinidade (X) para amostras novas e envelhecidas.	117
Tabela 6.3 – Resultados da medição do ângulo de contato utilizando-se a água destilada.	123
Tabela 6.4 – Resultados do cálculo da energia superficial do PEAD novo e envelhecido.	124

Lista de Abreviaturas e Símbolos

AFM	Microscopia de Força Atômica
ASTM	<i>International Standard</i>
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COMSOL	Software para Simulação Multifísica
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
E_a	Energia de Ativação, em kJ/mol
EPDM	Borracha de Etileno Propileno Dieno
EPDM/SiR	Blendas de Borracha de Silicone e Etileno Propileno Dieno
EPR	Borracha de Etileno Propileno
EPR/SiR	Blendas de Borracha de Silicone e Etileno Propileno
EVA	Acetato de Vinila
FTIR/ATR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
I_{Fuga}	Corrente de Fuga Total dos Para-raios, em mA
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
ISO 9001	Conjunto de Normas de Padronização de Produtos
L/D	Razão entre Comprimento e Diâmetro de Injetoras e Extrusoras
LAT-EFEI	Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEAPM	Polietileno de Alto Peso Molecular
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEMD	Polietileno de Média Densidade
PLP Brasil	Empresa de Equipamentos Elétricos de Média e Alta Tensão
PVC	Policloreto de Vinila
SEM	Microscopia Eletrônica de Varredura
SiR	Borracha de Silicone
T_g	Temperatura de Transição Vítrea, em °C

TGA	Análise Termogravimétrica
T_m	Temperatura de Fusão, em °C
T_{MAX}	Temperatura Máxima nos Invólucros dos Para-raios, em °C
TR-XLPE	Polietileno Reticulado com Retardante de Arborescência
U_C	Tensão de Operação Contínua do Para-raios, em kV
U_N	Tensão Nominal do Para-raios, em kV
UV	Radiação Ultravioleta
VEIKI-VNL	<i>Electrical Large Laboratories Ltda</i>
WAXRD	Difração de Raios-X de Alto Ângulo
XLPE	Polietileno Reticulado
ΔH_F	Entalpia de Fusão, em J/g

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os principais objetivos deste trabalho, bem como, descreve a estrutura utilizada ao longo do texto.

1.2 Relevância do Tema

Os primeiros sistemas de proteção de surtos de tensão eram compostos simplesmente por centelhadores instalados entre as fases e o terra do sistema. Posteriormente, para melhorar o desempenho desses equipamentos, foram utilizados centelhadores com resistores em série. No início do século XX, começaram a entrar em operação os para-raios eletrolíticos e, posteriormente, os para-raios de filme de óxido. No ano de 1930, iniciou-se a utilização dos para-raios a carboneto de silício, representando uma importante evolução dos supressores de surtos. Em meados da década de 70, os para-raios passaram a ser constituídos por resistores não-lineares de óxido de zinco e, devido a sua elevada não linearidade na relação tensão-corrente, eliminou-se a necessidade da utilização de centelhadores em série, representando uma importante evolução desses equipamentos.

No final da década de 80, foram introduzidos no mercado os primeiros para-raios com invólucros poliméricos, promovendo diversas vantagens técnicas e econômicas em relação aos para-raios em porcelana. Rapidamente, esses “novos” dispositivos ganharam mercado, principalmente nos sistemas de distribuição, sendo que atualmente, esse tipo de para-raios também é empregado em sistemas de alta e extra alta tensão.

Em se tratando das redes de distribuição de energia, os para-raios empregados são, em quase sua totalidade, constituídos por invólucros poliméricos. Os quatro tipos mais comuns de materiais utilizados no encapsulamento externo desses equipamentos são:

- Borracha de Silicone (SiR);
- Borracha de Etileno Propileno (EPR);
- Borracha de Etileno Propileno Dieno (EPDM);
- Blendas de Silicone e Etileno Propileno Dieno (EPDM/SiR).

Diversas falhas têm sido reportadas nesses tipos de materiais, principalmente em relação à corrosão ácida (AMIN et al., 2007; ARORA e MOSCH, 2011; CHRZAN et al., 2004; HABAS et al., 2009 e HOMMA et al., 2000). Os dois principais agentes químicos que danificam esses materiais isolantes são o ácido nítrico (HNO_3), formado pelo efeito corona na presença de umidade, e o ácido sulfúrico (H_2SO_4), presente nas chuvas ácidas comuns em regiões metropolitanas (FORNARO, 2006).

Em um experimento realizado no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá (LAT-EFEI), amostras dos invólucros de SiR e EPDM, provindas de para-raios poliméricos produzidos por quatro fabricantes nacionais, foram submetidas ao ensaio de imersão em ácido nítrico e sulfúrico, 0,1 normal, a 60 °C, por 840 h (05 semanas). Para mensurar a degradação do polímero, foram realizadas medições de massa a cada cinco dias. Os resultados obtidos foram agrupados, conforme mostrado pela Figura 1.1, que apresenta a variação de massa em função do tempo de ensaio. Vale destacar que a massa percentual foi calculada em relação à massa inicial das amostras.

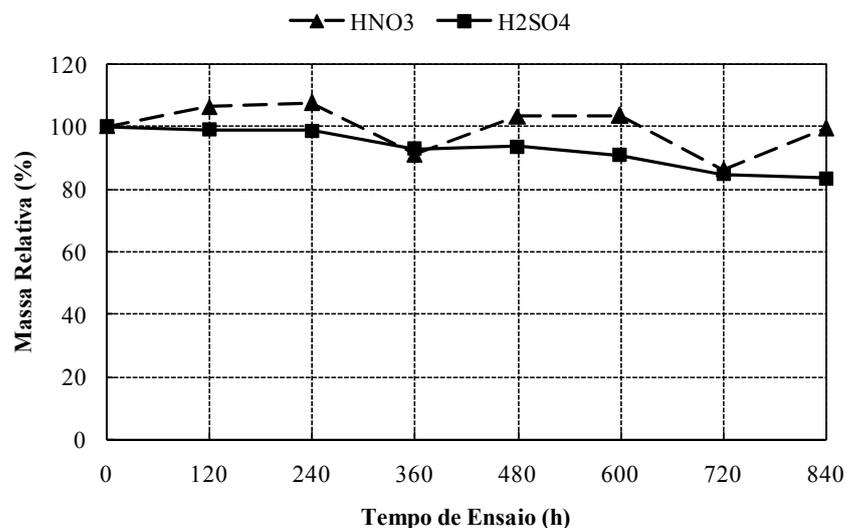


Figura 1.1 – Comportamento da massa relativa das amostras ensaiadas em relação ao tempo de ensaio.

Todas as amostras imersas em ácido sulfúrico apresentaram perda de massa, sendo que no final do experimento, observou-se uma redução média de 17%. Em relação à corrosão em ácido nítrico, observaram-se variações no peso das unidades ensaiadas, principalmente em relação ao ganho de massa devido à absorção de umidade.

A Figura 1.2 apresenta as amostras de EPDM e SiR após a realização dos ensaios. Nota-se a presença de diversas trincas ao longo do dielétrico, bem como, perda de material por deterioração (Figura 1.2 (b)).

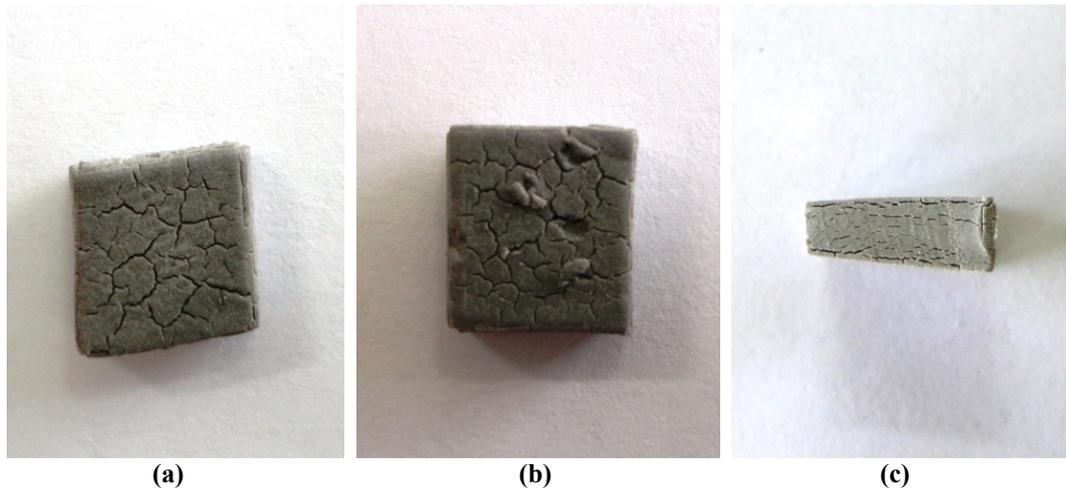


Figura 1.2 – Exemplos das amostras após o ensaio de imersão em ácido nítrico. (a) e (b) Amostras de EPDM; (c) amostra de SiR.

Outro tipo de falha que vem sendo reportada em alguns trabalhos é em relação à fragilidade de invólucros de silicone envelhecidos. Devido ao envelhecimento, as saias de isoladores utilizados em linhas de transmissão se tornam facilmente quebradiças, comprometendo a qualidade da isolação devido à redução da distância de escoamento. A Figura 1.3 apresenta um exemplo do aumento da fragilidade das saias de isoladores poliméricos de SiR envelhecidos.



Figura 1.3 – Exemplo do aumento da fragilidade de saias de isoladores poliméricos de SiR. Fonte: (ZIMMERMAN, 2014).

Isoladores poliméricos com invólucros de SiR, por serem constituídos por um material maleável, podem ainda sofrer danos devido a ataques de pássaros, conforme relatos ocorridos na Austrália e na China. Normalmente, foram observados danos nas saias dos dispositivos, comprometendo o desempenho do isolador. Frequentemente, os ataques de

pássaros ocorriam antes da energização das linhas. No entanto, também foram relatados problemas após a entrada de operação dos circuitos de transmissão. A Figura 1.4 apresenta um exemplo de isolador polimérico de SiR após sofrer o ataque de pássaros.



Figura 1.4 – Danificação de isoladores poliméricos de SiR por ataque de pássaros. Fonte: (ZIMMERMAN, 2013).

Tendo-se em vista os acontecimentos envolvendo materiais poliméricos comumente utilizados como isolantes, foram levantados questionamentos a respeito da utilização do polietileno de alta densidade (PEAD) em invólucros de para-raios de distribuição. O PEAD apresenta diversas propriedades que o tornam atrativo para a aplicação proposta, a saber:

- A natureza semicristalina do PEAD permite que este material seja um dos polímeros mais utilizados atualmente na manufatura de cabos isolados e cobertos, tanto de média quanto de alta tensão (THUE, 2005 e VAHEDY, 2006);
- O PEAD exibe boa resistência a degradação por ácido nítrico e sulfúrico, excelente resistência ao intemperismo, adequada hidrofobicidade superficial, propriedades dielétricas apropriadas, alta estabilidade térmica e oxidativa (ARORA e MOSCH, 2011; HEGER et al., 2010 e TEYSSEDE e LAURENT, 2013);
- Outras vantagens do PEAD podem ser consideradas como excelente suportabilidade mecânica, facilidade de moldagem, baixo consumo de energia durante o processamento, altas taxas de produção, tempo de vida útil elevado e possibilidade de melhoramento das propriedades dielétricas através

da nanotecnologia (MONTANARI et al., 2004; SMITH et al., 2008 e TANAKA et al., 2004).

Em se tratando especificamente dos sistemas de distribuição, os para-raios são comumente instalados junto aos transformadores, bancos de capacitores, reguladores de tensão, religadores, chaves seccionadoras, pontos de transição de rede, fim de rede, entre outros (FONSECA et al., 2014). Assim, uma quantidade expressiva de para-raios é utilizada para a proteção contra sobretensões.

Tendo em vista o grande número dos protetores de surtos instalados no sistema de distribuição e a sua produção em massa, o apelo em relação à diminuição dos custos de produção e aumento da competitividade econômica são evidentes. Dessa forma, qualquer modificação no projeto de para-raios deve passar por uma avaliação econômica.

Nesse sentido, o PEAD apresenta grande vantagem quando comparado ao silicone. O levantamento dos preços de materiais empregados na indústria, de forma geral, foi realizado entre os meses de abril a agosto de 2015, conforme exibido na Figura 1.5. Vale ressaltar que os valores apresentados correspondem ao pagamento à vista, desconsiderando os impostos.

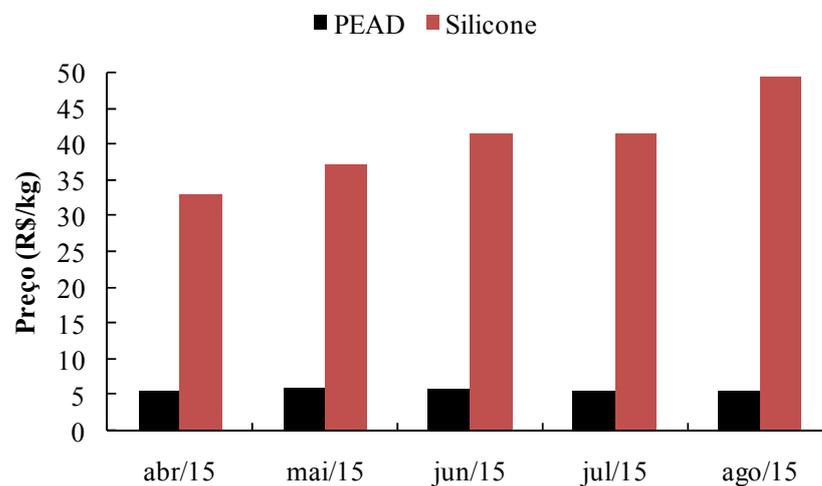


Figura 1.5 – Levantamento dos preços do PEAD e silicone praticados no Brasil. Fonte: Revista Plástico Moderno, N° 487 a 491, Editora QD Limitada.

Analisando a Figura 1.5, observa-se que o preço do PEAD se manteve mais estável, diferentemente do SiR, que apresentou um aumento considerável no período analisado. A maior diferença entre os preços dos materiais ocorreu no mês de agosto de 2015, sendo que o SiR chegou a custar praticamente nove vezes mais que o PEAD.

Outro ponto relevante do PEAD é a possibilidade de reciclagem e reprocessamento, fato não observado nos materiais do tipo borracha de silicone, EPR, EPDM e suas blends. Desta forma, o uso do PEAD em para-raios está em conformidade com as estratégias de desenvolvimento sustentável, no sentido de utilizar materiais passíveis de reuso, reciclagem e reprocessamento, aumentando o ciclo de vida do material e diminuindo o consumo de matéria prima (OLIVEIRA, 2012).

Embora o PEAD apresente características promissoras para utilização como invólucro de para-raios de distribuição, permitem-se alguns questionamentos acerca do tema:

- Qual seria o desempenho em longo prazo dos para-raios com invólucros de PEAD? O material isolante suportaria os ensaios de envelhecimento solicitados em norma?
- Qual seria o comportamento dos para-raios de PEAD em uma condição de falha? O projeto do dispositivo atenderia as solicitações durante o ensaio de curto-circuito? Os para-raios de PEAD iriam falhar de uma forma segura?
- Haveria a necessidade de alterar o polímero base, com a inserção de aditivos específicos, de forma a adequar as propriedades do PEAD aos requisitos para aplicação em para-raios?
- Os supressores de surtos com invólucros de PEAD estariam adequados aos ensaios de ciclo de operação, simulando condições de descargas seguida da energização dos para-raios? A capacidade de absorção de energia estaria adequada de forma a não gerar a avalanche térmica (*Thermal Runaway*) dos varistores?

As respostas aos questionamentos levantados são fundamentais para decidir sobre a aplicabilidade do PEAD na composição de invólucros de para-raios de distribuição, bem como, indicar possíveis melhorias no projeto desses dispositivos.

1.3 Objetivo e Contribuições Esperadas

Esse trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de para-raios de distribuição com invólucros em PEAD. Para tanto, podem-se listar as metas desse trabalho como:

- Fabricar protótipos de para-raios de distribuição com resistores a óxido de zinco, encapsulados com fibra de vidro impregnada em resina epóxi, com invólucros injetados de PEAD;
- Realizar ensaios de envelhecimento em névoa salina nos para-raios de PEAD, com o objetivo de avaliar o seu comportamento em longo prazo;
- Conduzir ensaios de curto-circuito nos para-raios de PEAD, com aplicação de alta, média e baixas correntes de curto, avaliando o comportamento dos para-raios em condições de falha;
- Desenvolver formulações de PEAD tendo como base os resultados dos ensaios obtidos com o polímero convencional.
- Realizar ensaios de ciclo de operação, objetivando analisar o desempenho dos para-raios de PEAD frente à absorção de energia;
- Acompanhar o envelhecimento acelerado dos protótipos fabricados utilizando, para tanto, análises físico-químicas dos invólucros, comparando as condições anteriores e posteriores ao ensaio de envelhecimento.

1.4 Estrutura da Tese

A presente tese de doutorado está estruturada em sete capítulos, conforme descritos a seguir.

- Capítulo 1 – Neste capítulo é apresentada a relevância do tema, bem como, os principais objetivos do trabalho. Da mesma forma, discute-se a metodologia utilizada para alcançar os resultados propostos.
- Capítulo 2 – É realizado um breve histórico sobre os para-raios. Posteriormente, discute-se sobre a análise do desempenho dos para-raios poliméricos atuais, bem como, sobre a aplicação do polietileno utilizado na manufatura de equipamentos elétricos.
- Capítulo 3 – Neste capítulo são apresentados brevemente os detalhes da construção do primeiro protótipo de para-raios de PEAD, os ensaios elétricos realizados e as análises dos resultados obtidos.

-
- Capítulo 4 – Nesta fase, são descritas as formulações de PEAD desenvolvidas, os ensaios elétricos realizados e as análises dos resultados obtidos.
 - Capítulo 5 – São apresentados os detalhes da construção do terceiro protótipo de para-raios, a mudança do PEAD utilizado, os ensaios elétricos realizados e as análises dos resultados obtidos.
 - Capítulo 6 – São realizados os ensaios físico-químicos nas amostras do invólucro de para-raios de PEAD do terceiro protótipo, comparando os resultados obtidos antes e após o ensaio de envelhecimento. Também é promovida uma comparação do desempenho do PEAD com materiais comumente utilizados em invólucros de para-raios.
 - Capítulo 7 – São comentadas as contribuições deste trabalho, bem como, sugestões para desenvolvimento futuro.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo apresentar um breve histórico dos para-raios, relatar o desempenho de materiais poliméricos comumente utilizados em invólucros de supressores de surtos, descrever a empregabilidade do polietileno em equipamentos elétricos e o comportamento deste polímero durante a operação nos sistemas elétricos.

2.2 Breve Histórico sobre Para-raios

No final do século XIX e início do século XX, a proteção contra surtos de tensão de origem atmosférica ou de manobra era realizada por meio de centelhadores em ar, instalados entre fase-terra do sistema protegido. Através do correto dimensionamento dos centelhadores, a ignição do arco elétrico ocorria em um nível relativamente baixo de tensão, colaborando, portanto, para a proteção dos equipamentos elétricos. Contudo, somente a presença dos centelhadores não era considerada suficiente para a proteção contra surtos de tensão, uma vez que os centelhadores em si não eram capazes de extinguir a corrente de falta.

Desta forma, eram empregados resistores em série com os centelhadores, com o objetivo de limitar a magnitude da corrente associada ao arco elétrico, facilitando sua extinção. Comumente, também eram utilizados elos fusíveis e disjuntores em série com o conjunto de centelhadores e resistores. O principal problema desse tipo de dispositivo de proteção estava associado à influência da interrupção elétrica em relação às condições atmosféricas e estado de conservação do equipamento.

A Figura 2.1 apresenta um exemplo de para-raios de centelhadores em série com resistores utilizado em terminais de linhas de transmissão e subestações.

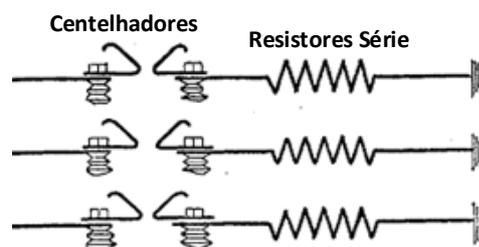


Figura 2.1 – Exemplo de um para-raios constituído por centelhadores em série com resistores. Adaptada de (TORCHIO, 1905).

Em 1907, iniciou-se a utilização de elementos não lineares na proteção contra surtos de tensão. Estes para-raios eletrolíticos, como ficaram conhecidos, eram constituídos por células não-lineares, formadas por placas de alumínio recobertas por uma fina camada de hidróxido de alumínio (CREIGHTON, 1914). As células tinham um formato cônico e eram preenchidas por um eletrólito. Todo o conjunto de células era colocado em um tanque e preenchido com óleo isolante.

A Figura 2.2 (a) e (b) apresenta os detalhes construtivos dos para-raios eletrolíticos, bem como a característica de operação de uma de suas células.

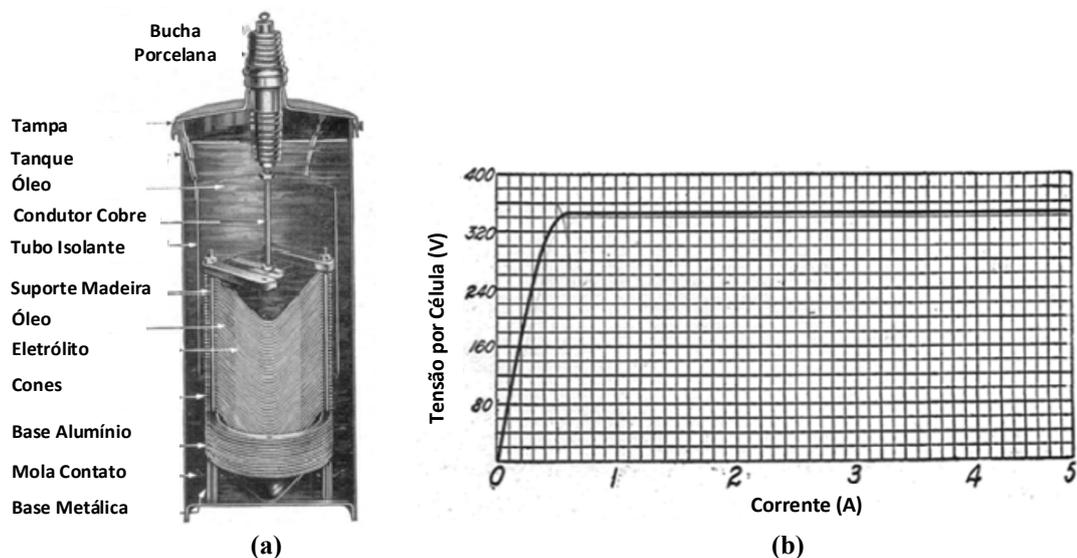


Figura 2.2 – (a) Exemplo construtivo do para-raios eletrolítico; (b) Característica de operação de uma célula não-linear. Adaptada de (WOODWORTH, 2011).

No caso da ocorrência de uma descarga atmosférica, o filme de hidróxido de alumínio era perfurado, permitindo a passagem da corrente. Posteriormente, observava-se a recuperação da camada de hidróxido de alumínio, acarretando no aumento da resistência e cessando a passagem de corrente. Os maiores inconvenientes deste tipo de para-raios eram o peso e tamanho elevados, bem como, manutenções frequentes.

Em 1920, encontravam-se em operação centenas de para-raios de filme de óxido instalados no sistema elétrico norte americano, com níveis de tensão de até 73 kV (LOUGEE, 1920). Estes equipamentos eram constituídos por células de peróxido de chumbo conectadas em série com centelhadores. As bases das células eram revestidas por um material isolante. Na ocorrência de uma descarga atmosférica, havia a perfuração da camada isolante, reduzindo substancialmente a resistência do para-raios, permitindo, portanto, a condução do surto de corrente. Posteriormente, o peróxido de chumbo, localizado nas proximidades do ponto de condução do surto, se alterava em função do

aquecimento, aumentando a resistência do equipamento. Por fim, com a resistência elétrica dos para-raios elevada, os centelhadores eram capazes de extinguir o arco elétrico, interrompendo a condução do equipamento. A Figura 2.3 (a) e (b) apresenta os detalhes do para-raios de filme de óxido utilizados no início do século XX.

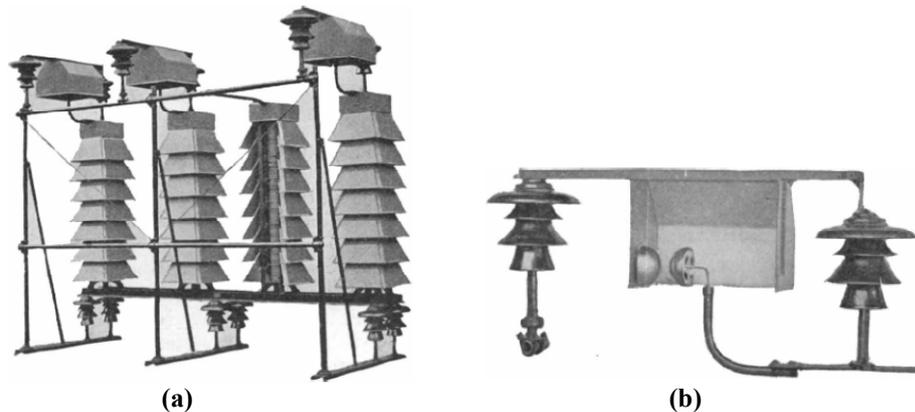


Figura 2.3 – (a) Exemplo construtivo do para-raios de filme de óxido; (b) Detalhe do centelhador utilizado em série com as células de peróxido de chumbo. Fonte: (LOUGEE, 1920).

No ano de 1930, foi registrada a patente referindo-se a utilização de para-raios a resistores não-lineares a carboneto de silício (MCFARLIN, 1930). A característica $V \times I$ desse tipo de resistores foi significativamente melhorada e, quando associados à centelhadores em série, promoviam a proteção do sistema elétrico de forma eficaz. Outro fator importante foi a redução da tensão de descarga em torno de 40% comparada com os para-raios de filme de óxido. Adicionalmente, o peso dos para-raios foi reduzido por volta de 30%, ao passo que o volume desses equipamentos apresentou uma redução de 80%. A Figura 2.4 apresenta os detalhes construtivos do para-raios a carboneto de silício.

Entre os anos de 1954 a 1976, ocorreram evoluções consideráveis nos projetos de para-raios a carboneto de silício, principalmente em relação à inserção dos centelhadores ativos. Este tipo de centelhador era constituído por uma bobina, que tinha como função alongar o arco elétrico de potência, acarretando em sua extinção. Desta forma, notou-se a redução do número de reignições nos centelhadores, bem como, aumento da confiabilidade na extinção do arco elétrico.

Consequentemente, com o melhoramento da capacidade de extinção do arco elétrico em função da utilização de centelhadores ativos, foi possível reduzir o volume dos resistores a carboneto de silício, diminuindo o nível básico de isolamento dos equipamentos protegidos pelos para-raios em função da redução da tensão residual dos supressores de surtos (SAKSHAUG, 1991).

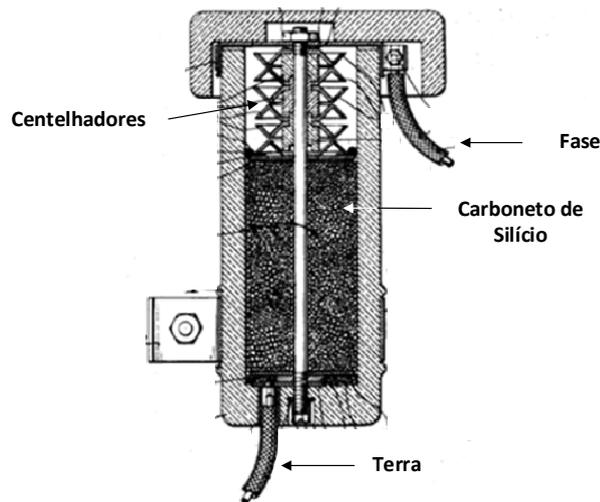


Figura 2.4 – Primeiro para-raios a carboneto de silício. Adaptada de (MCFARLIN, 1930).

Em 1976, começaram a ser utilizados os para-raios a óxido de zinco, que eram constituídos por resistores não lineares ZnO, juntamente com uma pequena quantidade de outros óxidos metálicos, tais como bismuto e antimônio, adicionados a matriz semicondutora. Estes resistores não lineares apresentavam uma relação de tensão versus corrente fortemente não linear, proporcionando aos elementos de ZnO baixos valores de corrente para tensão normal de operação. Desta forma, possibilitou-se a exclusão do uso de centelhadores série, fato não ocorrido em todos os outros tipos de para-raios anteriormente descritos.

A Figura 2.5 apresenta a relação entre tensão e corrente para resistores não lineares de óxido de zinco (ZnO) e carboneto de silício (SiC). Observa-se que o grau da não linearidade dos resistores ZnO é muito superior aos resistores de SiC, resultado, para tensões próximas das nominais, níveis de corrente da ordem de micro a miliampère. Desta forma, permitiu-se a eliminação do uso de centelhadores série.

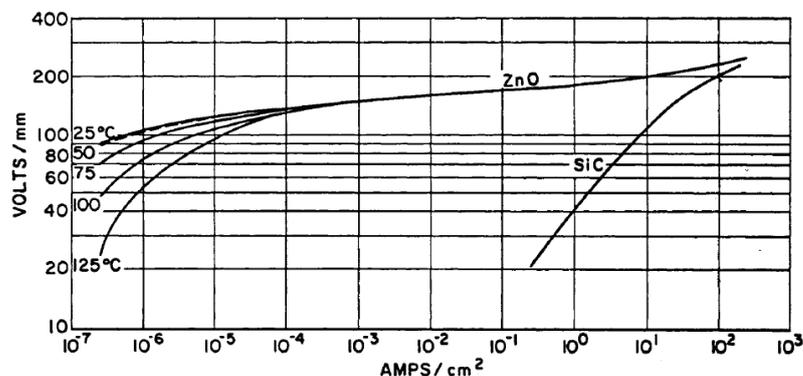


Figura 2.5 – Relação entre tensão e corrente nos resistores não lineares de óxido de zinco (ZnO) e a carboneto de silício (SiC). Fonte: (SAKSHAUG et al., 1977).

Pelo fato de não haver a necessidade da utilização dos centelhadores e em função das características operativas dos novos resistores não lineares, os para-raios de ZnO apresentavam uma série de vantagens em comparação aos equipamentos a carboneto de silício, tais como (SAKSHAUG et al., 1977):

- Melhoramento da confiabilidade de operação em função da simplificação do projeto do para-raios e não utilização de centelhadores;
- Características de proteção superiores aos para-raios convencionais, garantindo uma margem maior de proteção dos equipamentos;
- Capacidade de absorção de energia superior aos para-raios a carboneto de silício.

O trabalho apresentado por Lenk et al. (1988) introduziu uma nova concepção no projeto de para-raios, substituindo o invólucro de porcelana, até então unicamente utilizado, por um encapsulamento em fibra de vidro impregnada em resina epóxi, recoberto por invólucro de material polimérico. Portanto, no final da década de 80, deu-se início a era dos para-raios poliméricos, que utilizavam os resistores não lineares de óxido de zinco. A Figura 2.6 apresenta uma comparação entre os para-raios polimérico e de porcelana.

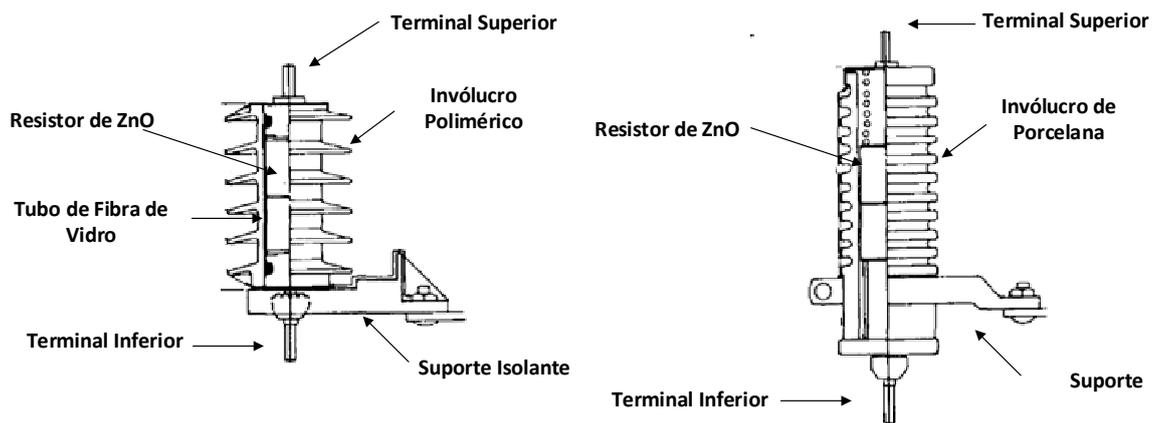


Figura 2.6 – Comparação entre o para-raios polimérico e de porcelana. Adaptada de (LENK et al., 1988).

Os para-raios de óxido de zinco com invólucro polimérico apresentam diversas vantagens em relação aos para-raios com invólucros de porcelana, a saber (MARTINEZ, 1993):

-
- Menor peso em relação aos para-raios de porcelana, representando uma redução de até 50%;
 - Redução das perdas elétricas provenientes da menor corrente de fuga que flui pelos invólucros poliméricos;
 - Aumento da distância de escoamento em função do aumento das saias dos invólucros poliméricos;
 - Ausência de espaçamentos internos em ar, reduzindo substancialmente a entrada de umidade;
 - Aumento da capacidade de dissipação de calor, devido à aderência direta do invólucro ao encapsulamento de fibra de vidro;
 - Melhor desempenho em ambientes com poluição elevada;
 - Simplificação do projeto de para-raios.

Devido às vantagens técnicas e econômicas dos para-raios poliméricos em relação aos de porcelana, atualmente, os para-raios instalados no sistema de distribuição são, em sua grande maioria, equipamentos com invólucros poliméricos. Vale ressaltar que estes equipamentos também vêm sendo fortemente empregados em sistemas de alta tensão de até 500 kV (HE et al., 2006).

2.3 Desempenho de Materiais Poliméricos Comumente Utilizados em Invólucros de Para-raios

Os para-raios, quando instalados no sistema elétrico, estão sujeitos a influência de diversos fatores, tais como, esforços mecânicos, estresses elétricos, poluição, variações de temperatura, radiação UV, entre outros. Estes fatores podem interferir na operação dos para-raios durante sua vida útil. Portanto, os supressores de surtos devem ser ensaiados com o objetivo de verificar seu desempenho diante das condições de trabalho.

2.3.1 Ensaios de Envelhecimento do Invólucro de Para-raios Poliméricos

Sabe-se que os invólucros poliméricos, quando novos, apresentam de uma forma geral, bom desempenho em relação às condições de poluição. No entanto, o material

isolante pode sofrer deteriorização de suas propriedades, ao longo do tempo, quando submetido aos estresses operacionais.

No trabalho de Lenk et al. (1988), foram realizados diversos ensaios de envelhecimento nos para-raios com invólucros poliméricos de EPR. Com o objetivo de avaliar o comportamento do invólucro em face ao trilhamento e a erosão, quatro para-raios poliméricos foram submetidos ao ensaio conhecido como roda de trilhamento, conforme arranjo mostrado na Figura 2.7.

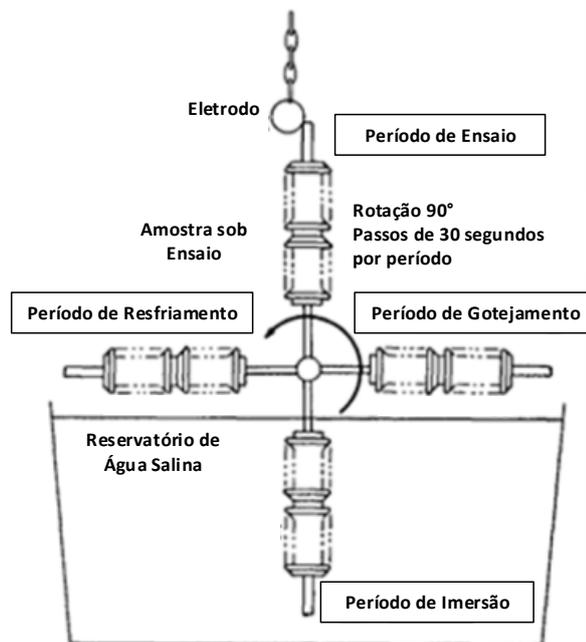


Figura 2.7 – Amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento. Adaptada de (LENK et al., 1988).

Este ensaio de envelhecimento operou em ciclos de dois minutos, sendo que o para-raios foi energizado em uma parte do ensaio e na outra parte do ciclo, permaneceu imerso em uma solução salina. Foram ensaiados apenas os invólucros dos para-raios, sem os resistores não lineares. Os equipamentos foram submetidos a 24 mil ciclos, com tensão de energização de 40 kV e resistividade da água de 400 Ω .cm. Ao final do ensaio, não foram observados sinais de trilhamento ou erosão no invólucro.

Neste mesmo trabalho, também foi realizado o ensaio de envelhecimento em névoa salina, com o objetivo de verificar o comportamento dos para-raios em condições de elevada umidade e poluição. Duas unidades de 16 kV de tensão de operação contínua foram submetidas ao ensaio por 2900 h. Foram observadas ocorrências de várias descargas superficiais durante o experimento, bem como, desligamentos da fonte de tensão. Segundo os autores do trabalho, as inspeções visuais não indicaram a ocorrência de danos severos nos invólucros dos equipamentos.

O trabalho de Chaudhry et al. (1991) analisou o desempenho dos para-raios de distribuição poliméricos em relação ao ensaio de envelhecimento em névoa salina. Dois tipos de invólucros poliméricos foram avaliados: EPDM e EPR, ambos contendo hidróxido de alumínio, que é normalmente utilizado para minimizar os efeitos de trilhamento e erosão. Durante a realização dos ensaios, os autores variaram a concentração de sal em água, com o objetivo de avaliar a influência da condutividade da névoa salina nos resultados obtidos. Portanto, trabalhou-se com a condutividade da água variando de 100 $\mu\text{S/cm}$ a 22000 $\mu\text{S/cm}$. A Tabela 2.1 apresenta os resultados dos ensaios de envelhecimento obtidos para os para-raios de invólucro de EPDM e EPR.

Tabela 2.1 – Resultados dos ensaios de envelhecimento em névoa salina nos para-raios poliméricos. Adaptada do trabalho de (CHAUDHRY et al., 1991).

Identificação do Ensaio	Condutividade da Água ($\mu\text{S/cm}$)	Resultados após 500 h de ensaio	
		Para-raios de EPDM	Para-raios de EPR
1	100	Sem degradação	Sem degradação
2	250	Sem degradação	Trilhamento e Erosão
3	1000	Trilhamento e Erosão	Trilhamento e Erosão
4	2000	Trilhamento e Erosão	Trilhamento e Erosão
5	16000	Sem degradação	Sem degradação
6	22000	Sem degradação	Sem degradação

Não foram observadas degradações com a condutividade da água ajustada em 100 $\mu\text{S/cm}$. No entanto, o para-raios de EPR apresentou sinais de trilhamento e erosão para a condutividade de 250 $\mu\text{S/cm}$. Para valores de condutividade da água de 1000 $\mu\text{S/cm}$ a 2000 $\mu\text{S/cm}$, ambas as amostras de EPR e EPDM apresentaram sinais de trilhamento e erosão. Para valores de condutividade mais elevados (16000 $\mu\text{S/cm}$ e 22000 $\mu\text{S/cm}$), não foram observados trilhamento e erosão em ambos os materiais do invólucro.

Durante os ensaios, também foram monitoradas as correntes de fuga dos para-raios, de acordo com os dados apresentados na Tabela 2.2. Vale ressaltar que a corrente de fuga foi mensurada apenas sobre o invólucro, descontando a corrente dos resistores não lineares.

Os autores notaram, após 20 h de ensaio e sob a presença de descargas superficiais, que a superfície dos invólucros passou a ser hidrofílica, acarretando no aumento da corrente de fuga. Observou-se também que a degradação do polímero era mais acentuada para valores de corrente de fuga da ordem de 10 mA a 20 mA.

Contrariamente, para os valores mais elevados de corrente (80 mA a 100 mA), não foram observadas degradações no material polimérico. Os autores do trabalho atribuíram a não ocorrência de trilhamento e erosão por causa da curta duração dos pulsos de corrente, que ocorriam de forma aleatória, resultando em uma pequena energia de arco, sendo, portanto, insuficiente para quebrar as ligações do polímero.

Tabela 2.2 – Valores típicos de corrente de fuga mensurados durante o ensaio de envelhecimento em névoa salina. Adaptada do trabalho de (CHAUDHRY et al., 1991).

Identificação do Ensaio	Corrente de Fuga (mA)	
	Para-raios de EPDM	Para-raios de EPR
1	<5	<5
2	<10	<10
3	10-15	10-15
4	15-20	15-20
5	80-100	80-100
6	90-100	90-100

Uma análise bastante detalhada sobre o comportamento da corrente de fuga de sete diferentes tipos de para-raios poliméricos comerciais foi realizada, durante ensaios em condições de umidade elevada, a temperatura de 40 °C e umidade relativa de 95%, conforme resultados apresentados no trabalho de Lahti et al. (1999). Foram ensaiados para-raios de distribuição novos, fornecidos por fabricantes europeus e norte americano, com tensão de operação contínua de 17 kV a 20 kV, com e sem espaçamentos internos, com invólucro de SiR, EPDM e EPR, compondo, portanto, uma diversa gama de para-raios de distribuição. A Tabela 2.3 apresenta uma breve descrição dos para-raios ensaiados neste trabalho.

Basicamente, foram realizados os ensaios de aplicação de tensão em ambiente com umidade elevada e imersão em água em ebulição. Para o acompanhamento dos ensaios, os autores do trabalho realizaram medições periódicas da corrente de fuga dos para-raios, sob tensão contínua de 10 kV, a temperatura ambiente. A Figura 2.8 (a) e (b) apresentam alguns dos resultados obtidos no ensaio de tensão aplicada em ambiente com umidade elevada e imersão em água aquecida, respectivamente.

Tabela 2.3 – Descrição dos para-raios comerciais ensaiados. Adaptada do trabalho de (LAHTI et al., 1999).

Tipo dos Para-raios	Material do Invólucro	Tensão de Operação Contínua (kV)	Invólucro Moldado	Espaçamento Interno
A	Silicone	20	X	
B	Silicone	20	X	
C	EPDM	19,5	X	
D	EPDM	18		
E	EPDM	17		X
F	EPR	19,5		X
G	EPR	19,5		X

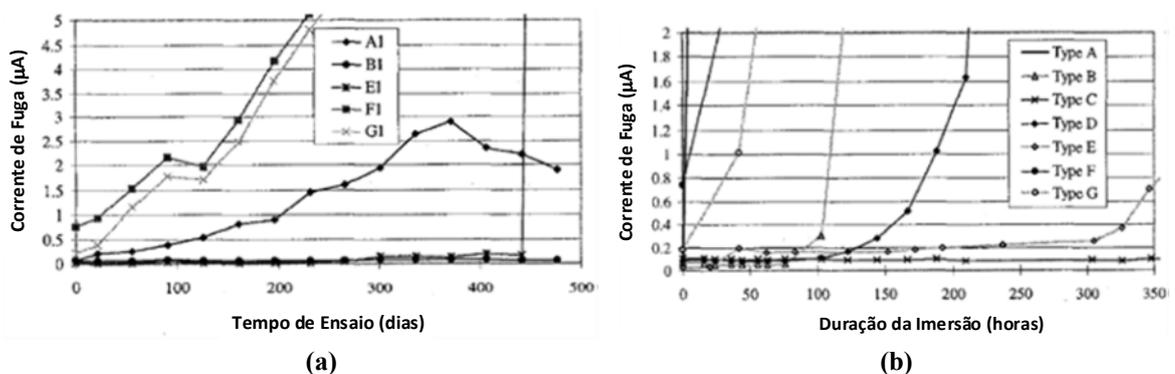


Figura 2.8 – Comportamento da corrente de fuga DC em função do tempo de ensaio. (a) Tensão aplicada em ambiente com elevada umidade; (b) Ensaio de imersão em água aquecida. Traduzida de (LAHTI et al., 1999).

Os autores concluíram, por meio da análise da Figura 2.8 (a) e (b), que a corrente de fuga dos para-raios apresentou um comportamento semelhante ao se comparar os dois tipos de ensaio realizados, sendo que os para-raios dos tipos A, F e G exibiram uma taxa de crescimento da corrente de fuga superior aos demais tipos de para-raios. As amostras F e G apresentavam espaçamento interno de ar, facilitando, portanto, a formação de canais de umidade no interior dos para-raios.

Segundo os autores, a entrada de umidade provavelmente ocorreu nas tampas de vedação do equipamento. Diferentemente das amostras F e G, os para-raios do tipo A são moldados diretamente na estrutura dos resistores de óxido de zinco e fibra de vidro, não possuindo espaçamento interno. Portanto, a entrada de umidade provavelmente ocorreu por difusão através do invólucro do equipamento.

Outras amostras apresentaram aumento da corrente de fuga após um tempo maior de ensaio, conforme pode ser observado na Figura 2.8 (a) e (b), para a amostra E. Já as

amostras C e D praticamente não apresentaram aumento da corrente de fuga durante o ensaio de tensão aplicada em ambiente com umidade elevada.

Através dos experimentos realizados, os autores do trabalho concluíram que o ensaio de imersão em água aquecida é adequado para a avaliação da estanqueidade dos para-raios. Da mesma forma, foi demonstrada a correlação entre os dois tipos de ensaio, em função do comportamento da corrente de fuga.

Outro trabalho realizado pelos mesmos autores traz uma análise complementar do comportamento da corrente de fuga DC medida após o ensaio de imersão em água em ebulição (LAHTI et al., 1998). Os ensaios foram realizados com o objetivo de determinar o tempo de recuperação para que a corrente de fuga voltasse ao patamar inicial. Para tanto, após o ensaio de imersão, os para-raios foram colocados em um ambiente com temperatura de aproximadamente 20 °C, umidade relativa de 40% e pressão atmosférica de 740 mbar.

Normalmente, as medições de corrente eram realizadas com tensão aplicada somente no instante da leitura. No entanto, em alguns ensaios, os autores optaram por manter as amostras energizadas com 12 kV de tensão contínua, objetivando inferir sobre a influência do campo elétrico no comportamento da corrente de fuga. A Figura 2.9 (a) apresenta as medições da corrente de fuga, após o ensaio de imersão, para os para-raios do tipo A e a Figura 2.9 (b) exibe uma comparação da corrente de fuga para os para-raios do tipo A e tipo D.

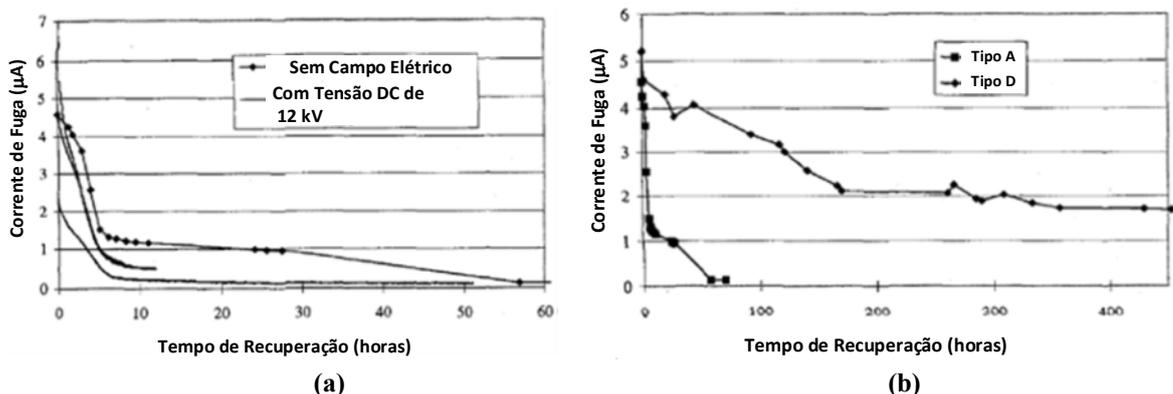


Figura 2.9 – Comportamento da corrente de fuga DC após o ensaio de imersão em água em ebulição. (a) Para-raios do tipo A; (b) Comparação dos para-raios do tipo A e D. Traduzida de (LAHTI et al., 1998).

Observam-se, através da Figura 2.9 (a), que são apresentados os comportamentos da corrente de fuga DC em amostras energizadas durante todo o período de ensaio. Nota-se que a corrente de fuga reduz para 1 µA após aproximadamente cinco horas de ensaio, considerando a presença de campo elétrico durante o período analisado. Observa-se também que a presença do campo elétrico acelerou o processo de recuperação. Comparando os

resultados obtidos para os para-raios do tipo A e D, Figura 2.9 (b), ambos sem a presença do campo elétrico, nota-se que a recuperação do para-raios do tipo D é mais lenta quando comparada com o para-raios do tipo A.

Os autores concluíram que os para-raios sem a presença de espaçamentos internos apresentam um tempo de recuperação relativamente rápido quando comparado aos para-raios com espaçamento interno. Nos para-raios onde o invólucro não é injetado diretamente sobre os varistores e sistema de encapsulamento, o processo de difusão da umidade interna para o meio externo é mais lento, levando meses para atingir a corrente de fuga inicial.

Em 2002, o mesmo grupo de trabalho apresentou uma análise tanto da corrente de fuga, DC e AC, quanto das descargas parciais em para-raios poliméricos submetidos ao ensaio de imersão em água a 50 °C (LAHTI et al., 2002). Os para-raios utilizados foram os descritos na Tabela 2.3, sendo ensaiados de duas a três unidades de cada tipo. O procedimento de ensaio é apresentado na Figura 2.10.

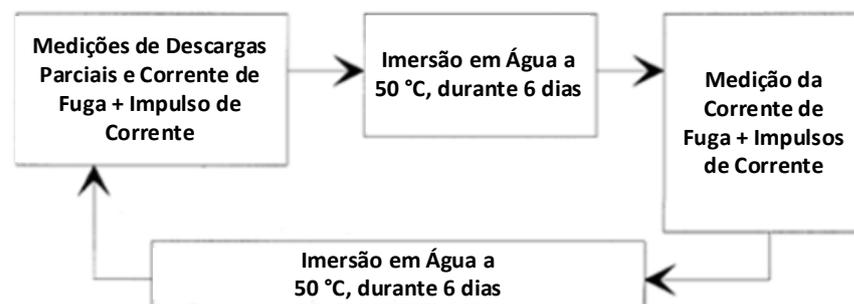


Figura 2.10 – Procedimento de ensaio realizado nos para-raios poliméricos. Traduzida do trabalho de (LAHTI et al., 2002).

Notam-se, por meio da Figura 2.10, que as descargas parciais eram mensuradas a cada duas semanas e a corrente de fuga, tanto DC quanto AC, semanalmente. Os para-raios permaneciam submersos em água a 50 °C durante 6 dias. Posteriormente, os supressores de surto eram submetidos a 10 impulsos de corrente de 2 kA, forma 2,5/70 μ S, com o objetivo de causar estresse na isolação, possibilitando o desenvolvimento de trincas nas interfaces internas dos para-raios. Vale ressaltar que as medições de descargas parciais e corrente de fuga foram realizadas antes da aplicação dos impulsos de corrente e que o ensaio de envelhecimento teve duração de 100 semanas (50 ciclos).

A Figura 2.11 (a), (b), (c) e (d) apresenta o comportamento da corrente de fuga DC, perdas e descargas parciais nos para-raios dos tipos A, B, D e E, respectivamente.

Nota-se, de modo geral, que houve um aumento da corrente de fuga DC e das perdas nos para-raios. Os dispositivos do tipo A e E apresentaram baixos níveis de descargas

parciais, ao passo que os para-raios do tipo B e D apresentaram valores acentuados de descargas. Os autores do trabalho também relataram falhas, devido a *flashover*, ocorridas em algumas amostras do tipo A, B, E e F. Estas falhas foram detectadas após a abertura dos para-raios ao final dos ciclos de ensaio.

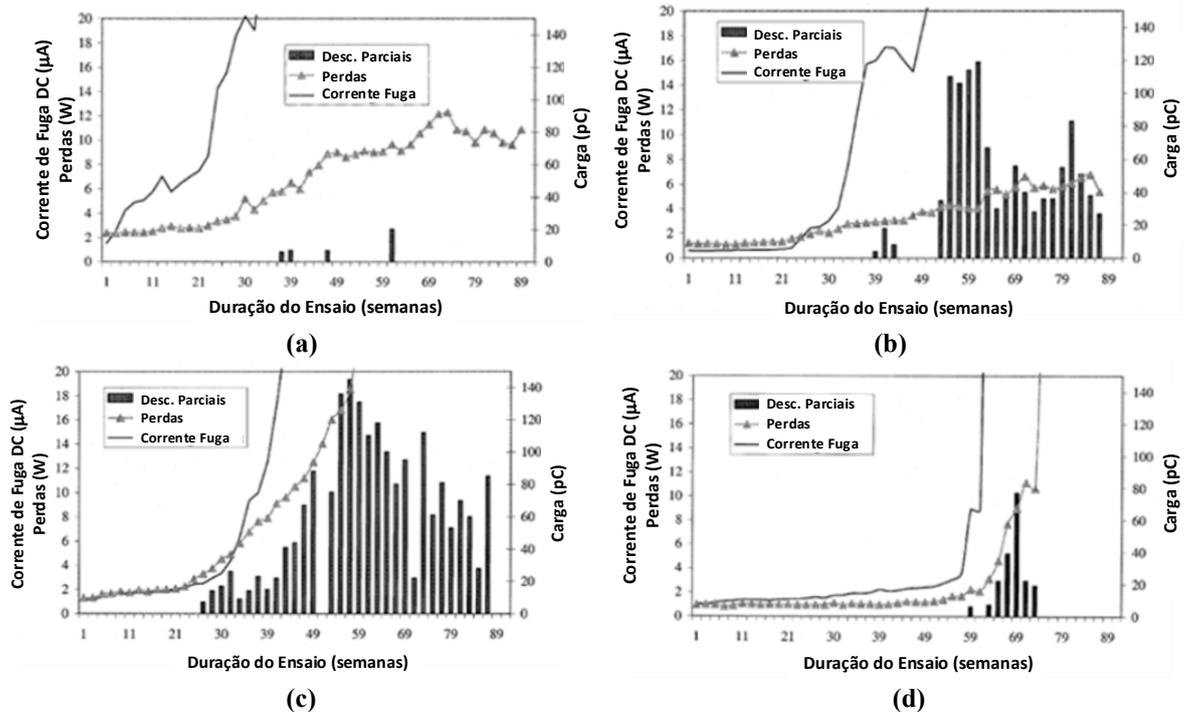


Figura 2.11 – Comportamento da corrente de fuga DC, perdas e descargas parciais durante o ensaio de imersão em água a 50 °C. (a) Para-raios do tipo A; (b) para-raios do tipo B; (c) para-raios do tipo D; (d) para-raios do tipo E. Traduzida do trabalho de (LAHTI et al., 2002).

Por meio dos ensaios realizados, concluiu-se que a medição das perdas e da corrente de fuga DC são métodos que apresentam maior sensibilidade para detectar a penetração de umidade em para-raios poliméricos. Já as medições de descargas parciais nem sempre foram capazes de detectar aumento da umidade interna, devendo, portanto, ser realizadas em conjunto com outros tipos de medições.

O trabalho apresentado por Perrot e Mackinlay (1999) traz uma avaliação do desempenho dos para-raios poliméricos frente à penetração de umidade. Para tanto, foram realizados ensaios cíclicos de imersão em água com para-raios poliméricos de 11 kV e 33 kV, promovendo a variação de temperatura entre -20 °C a +85 °C. Variações bruscas de temperatura promovem estresses termomecânicos consideráveis nos para-raios e, devido aos diferentes graus de expansão volumétrica dos materiais utilizados neste equipamento, podem levar a perda de estanqueidade do dispositivo.

A solução aquosa, a temperatura de 85 °C, foi preparada com uma concentração de 1 kg/m³ de cloreto de sódio em água deionizada. Para a temperatura de -20 °C utilizou-se a

mistura de água deionizada com etileno glicol, na proporção de 50% em volume. Os para-raios permaneciam imersos na solução a 85 °C por 12 h, seguindo de uma rápida transição para a mistura a -20 °C, completando um ciclo ao final de 12 h. Os equipamentos permaneceram nestas condições durante cinco semanas.

Em intervalos semanais, foram realizadas medições da corrente de fuga total dos para-raios, a temperatura ambiente, após os equipamentos passarem por um processo de secagem durante dois dias. A Figura 2.12 (a) e (b) apresenta, respectivamente, o comportamento da corrente de fuga total e a medição das descargas parciais durante a realização dos ensaios cíclicos de imersão.

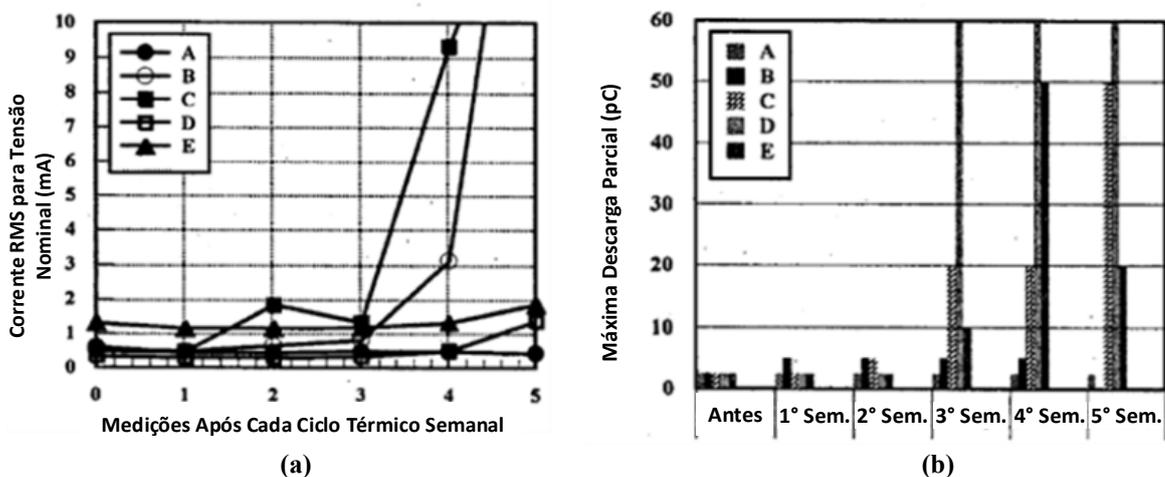


Figura 2.12 – (a) Comportamento da corrente de fuga total em função do tempo de ensaio de imersão. (b) Medição das descargas parciais após cada semana de ensaio. Traduzida de (PERROT e MACKINLAY, 1999).

Observa-se, por meio da Figura 2.12 (a), que as correntes de fuga das amostras B e C aumentaram drasticamente após quatro semanas de ensaio, sendo que não foi possível energizá-las, segundo os autores, ao final do experimento. A amostra C apresentou um aumento das descargas parciais após a terceira semana de experimento, ao passo que a amostra B praticamente não variou seu nível de descargas parciais. Um resultado não esperado pelos autores ocorreu na amostra D, que apresentou altos índices de descargas parciais (>10000 pC) após a terceira semana de ensaio.

Os autores do trabalho concluíram que diferentes tipos de para-raios poliméricos apresentam comportamentos distintos em relação à penetração de umidade e que o ensaio cíclico de imersão em água constitui uma ferramenta importante para a avaliação do desempenho do sistema de vedação dos para-raios.

Cherney et al. (2001) realizaram ensaios de envelhecimento em névoa salina em cinco tipos de para-raios de distribuição, com invólucros poliméricos de SiR e EPDM/SiR,

tensão nominal de 10 kV, com tensão de operação contínua de 8,4 kV. Duas unidades de cada tipo de para-raios foram submetidas ao ensaio de envelhecimento, totalizando dez unidades ensaiadas. Para a geração de névoa salina, utilizou-se uma solução de 1 g/L de cloreto de sódio em água, obtendo uma condutividade de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Os para-raios foram submetidos a nove ciclos de ensaio, com duração de sete dias cada. Durante os cinco primeiros dias de um ciclo, os para-raios eram submetidos à tensão de operação contínua (8,4 kV) na presença de névoa salina. Durante os dois últimos dias do ciclo, os supressores de surto eram submetidos apenas à tensão de operação contínua, sem a presença de névoa salina. A Tabela 2.4 apresenta as características dos para-raios avaliados e a Figura 2.13 exhibe os perfis dos invólucros dos equipamentos.

Tabela 2.4 – Características dos para-raios avaliados. Traduzida do trabalho de (CHERNEY et al., 2001).

Identificação dos Para-raios	Material do Invólucro	Distância de Escoamento (mm)	Distância de Arco (mm)	Perfil das Saias
A1&A2	SiR	367	203	I
A3&A4	SiR	261	183	II
B1&B2	EPDM/SiR	569	236	III
C1&C2	EPDM/SiR	376	202	IV
D1&D2	EPDM/SiR	409	219	V

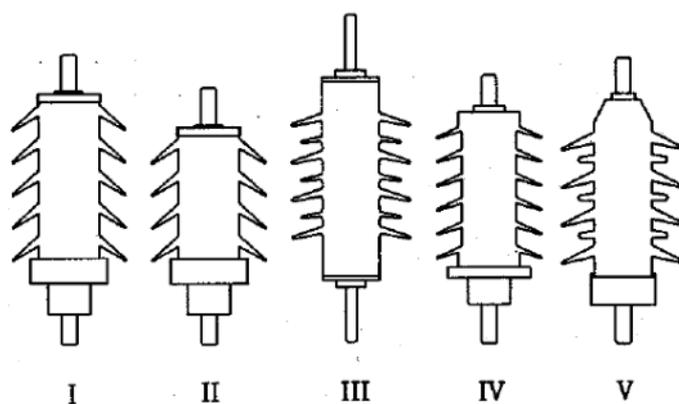


Figura 2.13 – Perfis dos invólucros dos para-raios avaliados. Fonte: (CHERNEY et al., 2001).

A título de exemplo, o monitoramento das perdas totais dos para-raios A1 e A2, B1 e B2 são mostrados na Figura 2.14 (a) e (b), respectivamente. Vale ressaltar que os valores apresentados correspondem às perdas médias, obtidas a cada intervalo de 1000 min.

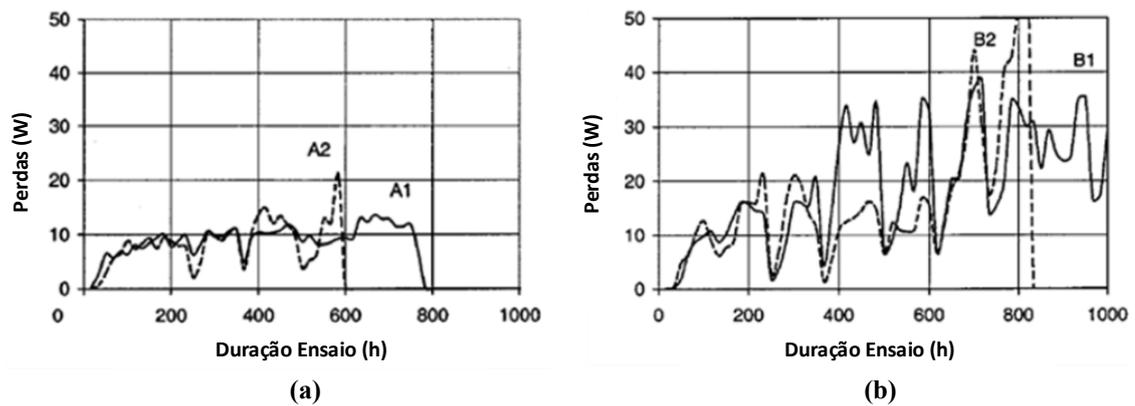


Figura 2.14 – Comportamento das perdas totais dos para-raios em função do tempo de ensaio. (a) Para-raios A1 e A2. (b) Para-raios B1 e B2. Traduzida do trabalho de (CHERNEY et al., 2001).

Os autores observaram, de forma geral, que as perdas dos para-raios aumentaram ao longo do ensaio, indicando a degradação dos invólucros. Nota-se, por meio da Figura 2.14 (a), que a unidade A2 falhou com 600 h de ensaio, sendo que a unidade A1 suportou 800 h de envelhecimento. Observando a Figura 2.14 (b), nota-se que uma unidade do para-raios tipo B (amostra B1) permaneceu durante 1000 h de ensaio, ao passo que a amostra B2 foi retirada com, aproximadamente, 820 h de ensaio.

As unidades A3, C1 e C2, D1 e D2 permaneceram energizadas durante todo procedimento de ensaio, ao passo que unidade A4 suportou 900 h de ensaio. Ressalta-se que a falha do para-raios foi diagnosticada através da atuação da proteção individual de cada unidade, realizada por meio de elo fusível.

A Figura 2.15 (a), (b) e (c) apresenta os principais tipos de falhas observadas nos para-raios ensaiados. Nota-se, por meio da Figura 2.15 (a), que o suporte isolante dos para-raios identificados como A3 e A4 sofreu o processo de degradação durante o ensaio de envelhecimento, que, segundo os autores, foi potencializado por descargas superficiais ocasionadas pelas presenças de bandas secas e bandas úmidas.

A Figura 2.15 (b) traz um exemplo do processo de erosão ocorrido na amostra A1, que falhou com 800 h de ensaio. Observa-se que a erosão ocorreu ao longo da linha do molde. O mesmo fato foi observado para a unidade C1, conforme mostrado na Figura 2.15 (c). No entanto, a unidade C1 permaneceu conectada a fonte de tensão durante todo o ensaio, mesmo com acentuada erosão do material polimérico.

Os autores do trabalho concluíram que o ensaio de envelhecimento em névoa salina é uma ferramenta bastante útil para a avaliação dos para-raios poliméricos, principalmente em relação ao desempenho do invólucro frente à erosão.

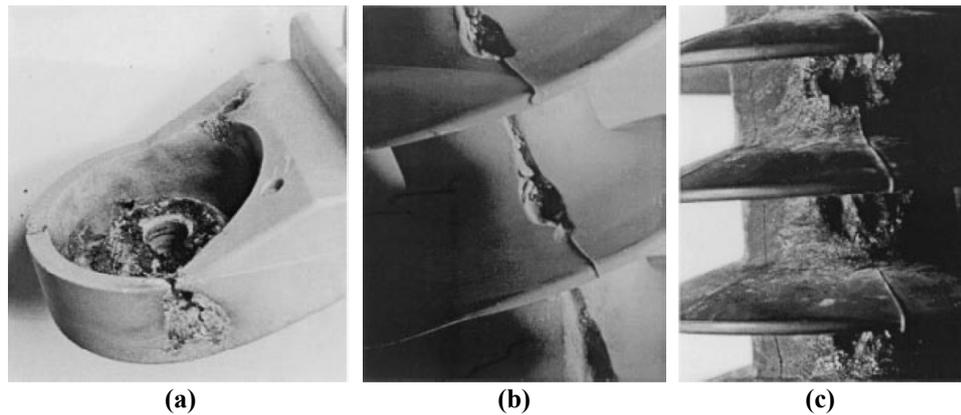


Figura 2.15 – Registros fotográficos obtidos após os ensaios de envelhecimento. (a) Degradação do suporte isolante dos para-raios A3 e A4; (b) erosão ao longo da linha do molde ocorrida na amostra A1; (c) erosão ao logo da linha do molde observada para a amostra C1. Fonte: (CHERNEY et al., 2001).

Uma breve análise das perdas ativas em para-raios poliméricos de distribuição, sob condições climáticas adversas, foi apresentada no trabalho de Miller et al. (1999). Para tanto, foram ensaiados quatro tipos de para-raios poliméricos, com tensões nominais de 10 kV, tensões de operação contínua de 8,4 kV e invólucros constituídos por SiR, EPDM e EPDM/SiR.

Os para-raios foram ensaiados em uma câmara especialmente projetada para simular diversos efeitos climáticos, como, radiação, precipitação, névoa salina e variações térmicas. As mudanças climáticas eram aplicadas em ciclos, de acordo com a estação simulada (verão ou inverno), sendo que os para-raios permaneceram energizados com 8,4 kV durante todo o período de ensaio. A temperatura de ensaio foi ajustada entre 41 °C a 45 °C para o período de verão e 31 °C a 41 °C para o período de inverno. A radiação solar aplicada foi de 1 mW/cm² para ambos os períodos, com comprimento de onda de 350 nm. A condutividade da precipitação foi ajustada entre 50 μS/cm a 70 μS/cm. Para a névoa salina, utilizou-se a solução de 2,5 kg/m³ de sal em água, proporcionando uma condutividade de 4000 μS/cm.

A Figura 2.16 (a) e (b) apresenta o comportamento das perdas nos para-raios de EPDM/SiR e SiR, respectivamente, durante o início do ciclo de ensaio. Analisando a Figura 2.16 (a), nota-se um aumento acentuado das perdas nos para-raios de EPDM/SiR durante os períodos úmidos, caracterizados principalmente pela presença de precipitação. O mesmo fato não foi observado para os para-raios com invólucros de silicone, conforme mostrado pela Figura 2.16 (b). Segundo os autores, este fato pode ser explicado pela perda de hidrofobicidade dos invólucros de EPDM/SiR, acarretando no incremento da corrente de fuga superficial e, conseqüentemente, aumento das perdas. Embora não mostrado, os para-raios com invólucros de EPDM apresentaram resultados semelhantes aos para-raios de EPDM/SiR.

Através dos ensaios realizados, os autores do trabalho chegaram às seguintes conclusões:

- As perdas nos para-raios não são dependentes apenas das perdas internas nos varistores, mas também das perdas no invólucro polimérico, principalmente devido à contaminação;
- Invólucros de EPDM e EPDM/SiR apresentaram valores mais elevados de perdas em comparação com os invólucros de SiR;
- Os para-raios com invólucros de EPDM e EPDM/SiR apresentaram perdas externas 10 vezes maiores que as perdas internas nos varistores, devido à contaminação e perda de hidrofobicidade do material isolante.

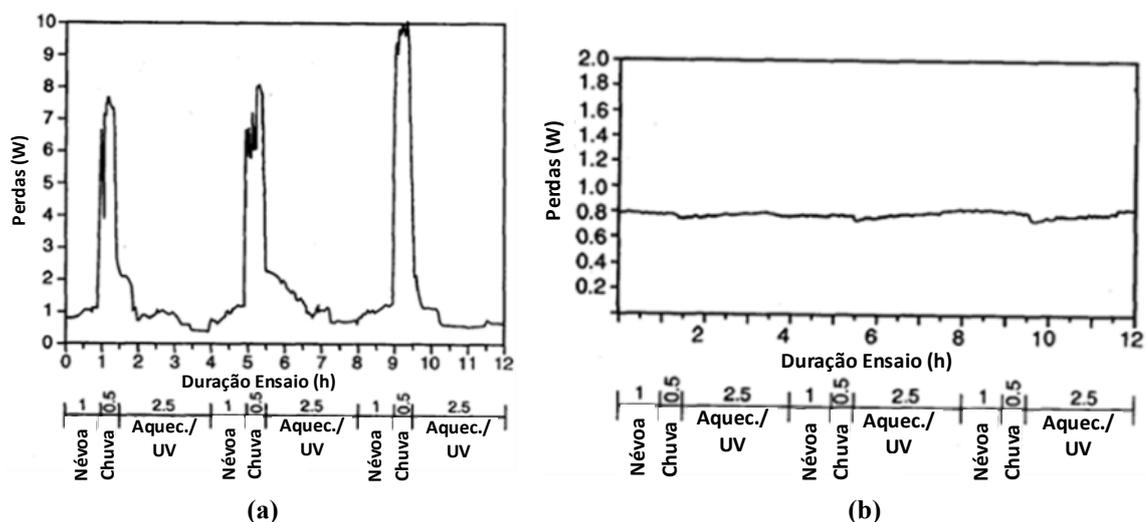


Figura 2.16 – Comportamento das perdas totais dos para-raios ao longo do ciclo de ensaio. (a) Para-raios com invólucros de EPDM/SiR. (b) Para-raios com invólucros de SiR. Traduzida do trabalho de (MILLER et al., 1999).

O trabalho desenvolvido por Kester et al. (1998) apresenta uma análise da corrente de fuga de para-raios poliméricos submetidos a ensaios de envelhecimento multifatorial. Foram ensaiados onze tipos de para-raios de distribuição comerciais, com tensão de operação contínua de 20 kV e invólucros constituídos por borracha de silicone (SiR), acetato de vinila (EVA), blindas de EPDM e SiR (EPDM/SiR) e formulações de EPR. As distâncias de escoamento e de arco dos para-raios ensaiados variaram de 630 mm a 1520 mm e 300 mm a 615 mm, respectivamente, compondo, portanto, uma vasta gama de equipamentos.

Os procedimentos de ensaio foram baseados em repetições contínuas, com ciclos semanais. Cada ciclo semanal era constituído por ciclos diários, conforme detalhes

apresentados na Tabela 2.5. Os ciclos diários eram aplicados desde o dia 1 ao dia 5. Nos dias 6 e 7, os para-raios eram submetidos à radiação ultravioleta e tensão aplicada de 20 kV, finalizando um ciclo semanal. Este procedimento foi repetido durante 39 semanas, contabilizando, portanto, 6500 h de ensaio.

A Figura 2.17 (a) e (b) apresenta o aspecto da corrente de fuga de pico (correspondendo ao valor máximo diário) para os para-raios de EPDM/SiR e borracha de silicone, respectivamente. Nota-se, por meio da Figura 2.17 (a), que a corrente de fuga aumenta com o tempo de ensaio, atingindo valores entre 500 mA a 600 mA ao final do ensaio, indicando o envelhecimento do invólucro. Comparando os resultados dos para-raios de EPDM/SiR e SiR (Figura 2.17 (a) e (b)), nota-se que os equipamentos com invólucros de SiR apresentam níveis mais baixos de corrente de fuga, atingindo picos de 200 mA.

Tabela 2.5 – Descrição do ciclo diário de ensaio. Adaptada do trabalho de (KESTER et al., 1998).

Sequência Ciclo Diário	Duração (h)	Tipo de Estresse	Tensão Aplicada (kV)
1	9,5	Névoa Salina	20
2	3	Período a Seco	20
3	5	Névoa	20
4	1	Período a Seco	20
5	2	Chuva	20
6	1	Período a Seco	20
7	2	Chuva	20
8	0,5	Período a Seco	0

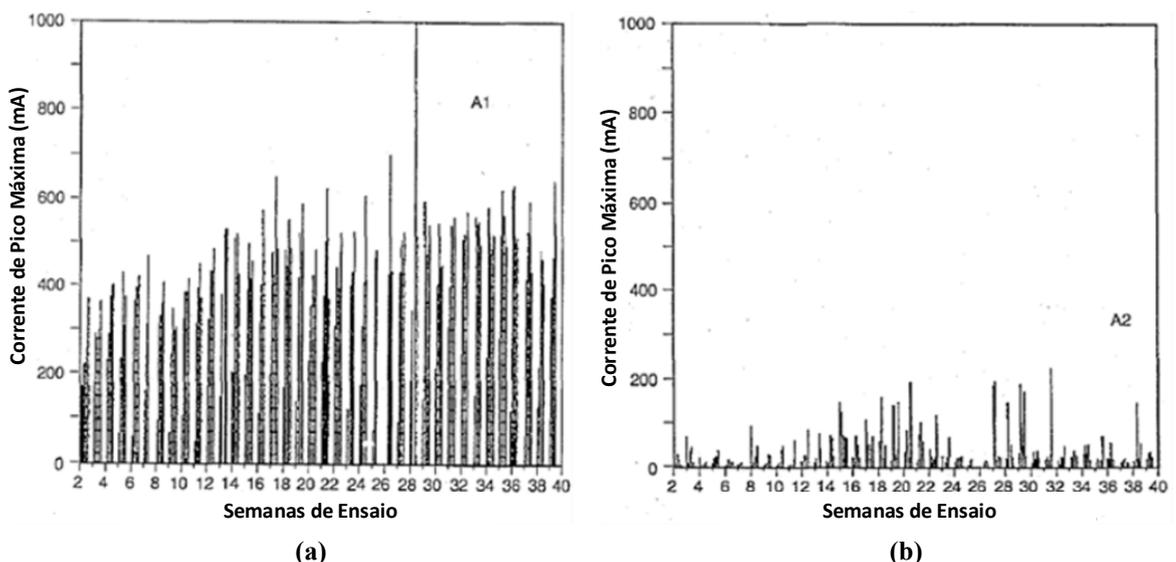


Figura 2.17 – Comportamento da corrente de fuga dos para-raios durante os ensaios de envelhecimento multifatorial. (a) Para-raios com invólucros de EPDM/SiR. (b) Para-raios com invólucros de SiR. Traduzida do trabalho de (KESTER et al., 1998).

Embora não mostrados, os resultados do ensaio de envelhecimento nos para-raios de EVA foram análogos aos resultados dos para-raios de EPDM/SiR. Também foi relatada, pelos autores do trabalho, a perfuração do invólucro de um dos para-raios de EPR durante a décima terceira semana de ensaio.

Do mesmo modo, foram mensuradas as tensões de referência antes e após o ensaio de envelhecimento. Os resultados indicaram variações de +5,0% a -20% nas tensões de referência, sendo os resultados positivos e negativos causados pelo aumento e diminuição da tensão após o ensaio de envelhecimento, respectivamente. No caso da diminuição da tensão em 20%, ocorrida em um para-raios de SiR, os autores do trabalho indicaram que este fato aconteceu devido à penetração de umidade durante o ensaio de envelhecimento.

O trabalho realizado por Sundararajan et al. (2006) teve como objetivo avaliar o desempenho de para-raios poliméricos frente às diversas condições climáticas da zona costeira do estado da Flórida. Para tanto, foram realizados ensaios de envelhecimento multifatorial, simulando condições de chuva, radiação solar, variações de temperatura e umidade, presença de névoa sem e com poluição, aproximando, portanto, das condições reais de operação do para-raios. Foram ensaiados dois tipos de para-raios poliméricos comerciais, com material do invólucro constituído por borracha de silicone (SiR) e blenda de etileno propileno e silicone (EPR/SiR), ambos de tensão nominal de 9 kV e com tensão de operação contínua de 7,4 kV.

Para a obtenção dos parâmetros do ensaio, foram utilizados dados metrológicos da cidade de Miami, representando, portanto, as condições costeiras do estado da Flórida. Foram contabilizados, para os ajustes dos parâmetros de ensaio, a temperatura local máxima e mínima, intensidade de radiação UV, horas de dias ensolarados, quantidade de precipitação, entre outros dados obtidos em um histórico de trinta anos. As condições climáticas foram simuladas em uma câmara de ensaios, contendo lâmpadas UV, válvulas para geração de névoa salina artificial e precipitação e sistema de refrigeração para controle de temperatura. Os para-raios permaneceram nestas condições de ensaio durante 396 dias, simulando, segundo os autores, quinze anos de operação.

Diversas análises foram realizadas durante e após o ensaio de envelhecimento multifatorial, como, por exemplo, análise da hidrofobicidade do invólucro. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 2.18. Vale ressaltar que a Classe 1 diz respeito a superfície hidrofóbica, enquanto que as Classes 6 e 7 representam superfícies hidrofílicas.

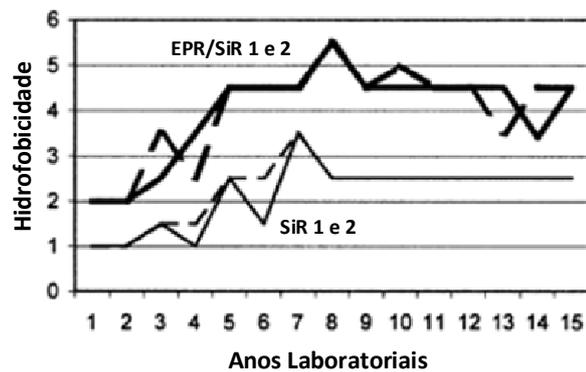


Figura 2.18 – Variação da hidrofobicidade do invólucro durante o ensaio de envelhecimento. Traduzida do trabalho de (SUNDARARAJAN et al., 2006).

Nota-se, por meio da Figura 2.18, que os para-raios de EPR/SiR atingiram a classe de hidrofobicidade entre 5 e 6, ao passo que os para-raios de SiR permaneceram no patamar entre 2 e 3. Isto provavelmente ocorreu devido à hidrofobicidade superior dos materiais a base de borracha de silicone.

Os comportamentos das correntes de fuga de ambos os para-raios poliméricos de EPR/SiR e SiR são mostrados na Figura 2.19 (a) e (b), respectivamente. Nota-se, de forma geral, que a corrente de fuga de ambos os para-raios se iniciou com um valor relativamente baixo, aumentando durante os quatro primeiros anos laboratoriais de ensaio, voltando, posteriormente, a patamares mais baixos de corrente. No entanto, no último período de ensaio, observou-se, novamente, um aumento da corrente de fuga.

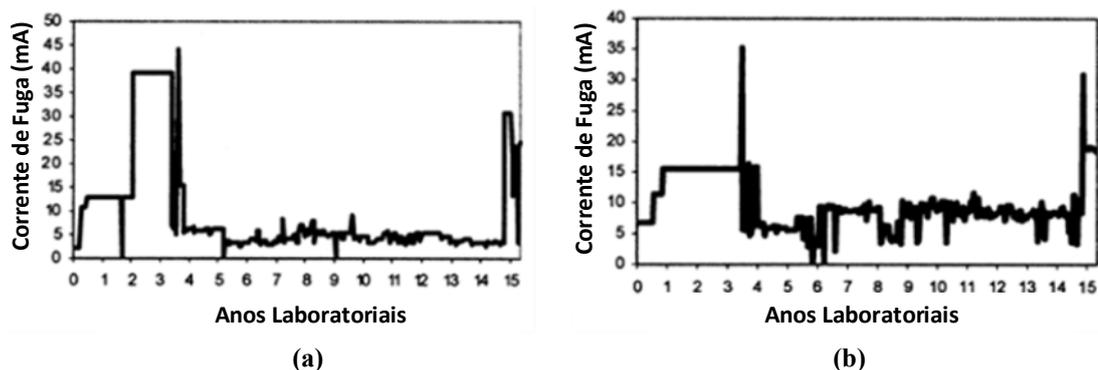


Figura 2.19 – Comportamento da corrente de fuga total em função do tempo de ensaio para os para-raios de (a) EPR/SiR e (b) SiR. Traduzida do trabalho de (SUNDARARAJAN et al., 2006).

Outras análises foram realizadas neste trabalho, tais como estudo da contaminação superficial dos invólucros, acúmulo de carga superficial, cálculo da potência dissipada em função do tempo de ensaio, caracterização físico-química por técnicas de espectroscopia no infravermelho por transformadas de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (SEM). Por meio dos resultados obtidos, os autores concluíram que:

- Os para-raios poliméricos de EPR/SIR e SiR foram capazes de suportar os diversos estresses durante os ensaios, sem a presença de trilhamento e erosão apreciáveis;
- O invólucro de EPR/SIR apresentou descoloração e perda de hidrofobicidade;
- Os ensaios de SEM indicaram presença de degradação/desintegração microestrutural em ambos os invólucros de EPR/SIR e SiR;
- Os resultados do ensaio de envelhecimento multifatorial são representativos das condições de envelhecimento em campo.

2.3.2 Ensaio de Curto-circuito em Para-raios Poliméricos

Os ensaios de curto-circuito têm por objetivo determinar o comportamento dos para-raios durante uma condição de falha. Os para-raios são considerados adequados ao ensaio de curto-circuito desde que não sejam observadas a ocorrência de explosão violenta do dispositivo e a ignição do material polimérico sem a auto-extinção das chamas.

Lenk et al. (1988) realizaram vários ensaios de curto-circuito durante o desenvolvimento dos primeiros para-raios poliméricos de distribuição. Utilizaram-se diversos níveis de corrente de curto-circuito, variando desde 500 A, com duração de 2 s, passando por 5 kA, com duração de 500 ms, a 20 kA durante 170 ms (aproximadamente 10 ciclos de 60 Hz). A Figura 2.20 (a) e (b) apresenta o para-raios antes e após o ensaio, com aplicação de 20 kA.

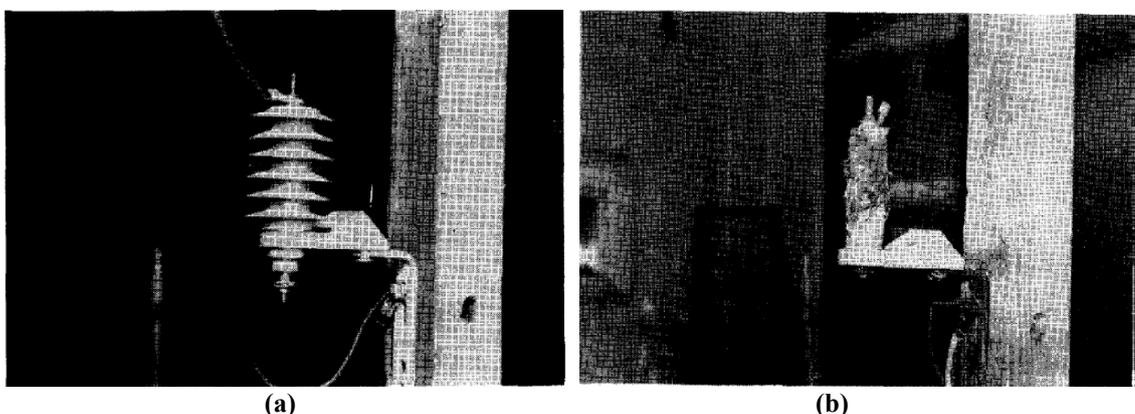


Figura 2.20 – Ensaio de curto-circuito em para-raios poliméricos. (a) Antes e (b) após o ensaio de 20 kA, 17 ms. Fonte: (LENK et al., 1988).

Nota-se que o módulo do para-raios permaneceu praticamente intacto, ao passo que o invólucro foi praticamente destruído durante o ensaio. Os autores não relataram ejeções dos resistores ou ignição do material polimérico.

Os primeiros para-raios poliméricos de classe intermediária foram introduzidos no mercado no início da década de 90, conforme relatado no trabalho de Lenk et al. (1992). Uma série de ensaios de curto-circuito foi realizada nestes tipos de para-raios, que possuíam tensões de operação contínua de 17 kV a 84 kV. As aplicações de corrente variaram de 600 A, com duração de 2 s a 63 kA, com duração de 200 ms. Após a finalização dos ensaios de curto-circuito, os autores relataram que os módulos dos para-raios permaneceram intactos, sem fragmentação dos blocos de resistores.

Na maior parte dos ensaios, foram observadas projeções de materiais poliméricos para fora de determinada área ao redor do para-raios. Em ordem de quantificar os potenciais riscos das partes poliméricas arremessadas durante os ensaios de curto-circuito, os autores realizaram medições da massa e distância percorrida pelos fragmentos. Assim, foram calculadas a energia e velocidade de cada parte polimérica ejetada do ensaio. O maior valor calculado da energia dos fragmentos foi de 119 J, gerado por uma parte polimérica de 150 g, com velocidade horizontal de 34 m/s. Portanto, os autores concluíram que os para-raios falharam de uma forma segura.

Com o objetivo de avaliar o desempenho de para-raios poliméricos de distribuição em situações de falha, Colombo et al. (1996) realizaram mais de 150 ensaios de curto-circuito em seis tipos de para-raios poliméricos comerciais, com tensões nominais (U_N) de 21 kV a 25 kV, tensões de operação contínua (U_C) de 12,7 kV a 20 kV, corrente nominal (I_N) de 5 kA, invólucros de SiR, EPR e EPDM.

A Tabela 2.6 traz informações a respeito dos para-raios ensaiados. Dentre estes equipamentos, foram observados três tipos de projetos. O projeto (1) consistia na alocação dos resistores não lineares inseridos em um tubo de fibra de vidro, com espaçamento interno de ar. No projeto (2), os resistores estavam localizados próximos ao tubo de fibra de vidro e o conjunto foi moldado em resina, sem a presença de ar. Por fim, o projeto (3) era composto por resistores envoltos por fibra de vidro e resina epóxi, com o invólucro polimérico injetado diretamente sobre a parte ativa do equipamento.

Foram utilizados três níveis de corrente de curto-circuito. Os ensaios de alta corrente (HC) foram realizados em 16 kA, os ensaios de média corrente (MC) variaram de 1 kA a 6 kA e os ensaios de baixa corrente (LC) foram realizados em 600 A. Os ensaios de alta e

média correntes tiveram duração de 200 ms, ao passo que os ensaios de baixa permaneceram durante 2 s.

Tabela 2.6 – Descrição do para-raios submetidos aos ensaios de curto-circuito. Adaptada do trabalho de (COLOMBO et al., 1996).

Identificação dos Para-raios	U_N (kV)	U_C (kV)	I_N (kA)	Material Invólucro	Projeto
A	25	20	5	SiR	(3)
B1	24	20	5	EPR	(1)
B2	24	20	5	EPR	(1)
C	24	20	5	EPDM	(2)
D1	24	18	5	EPDM	(2)
D2	24 <td 18	5	EPDM	(2)	
E	21	17	5	EPDM	(2)
F	24	12,7	5	SiR	(3)

A Figura 2.21 (a) e (b) exhibe os resultados dos ensaios em termos de ejeção de fragmentos e separação do para-raios e seus conectores do circuito de potência, respectivamente.

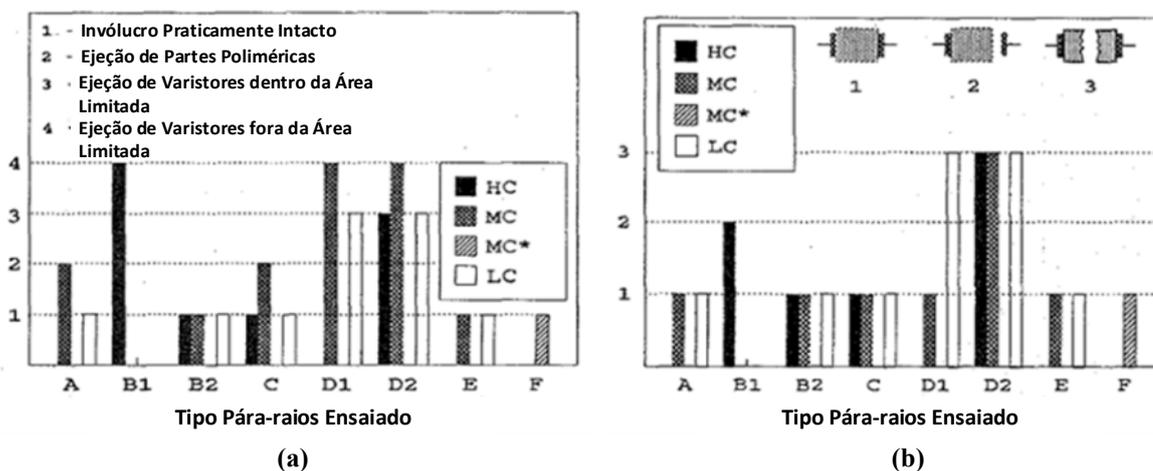


Figura 2.21 – Resultados dos ensaios de curto-circuito. (a) Ejeção de fragmentos; (b) Separação entre o para-raios e seus conectores do circuito de potência. Traduzida do trabalho de (COLOMBO et al., 1996).

Analisando a Figura 2.21 (a), observa-se, de forma geral, que as aplicações de média e baixa correntes causaram, no máximo, ejeções de partes do invólucro polimérico dos para-raios. No entanto, os equipamentos do tipo D apresentaram ejeções de partes dos resistores dentro e fora da área pré-delimitada para os ensaios, nas aplicações de baixa e média correntes, respectivamente.

Os para-raios do tipo B1 e B2 foram produzidos pelo mesmo fabricante, com características bastante semelhantes entre si, representando duas gerações subseqüentes de supressores de surto. Nota-se que pequenas modificações no desenvolvimento dos para-raios podem melhorar significativamente o desempenho desses equipamentos durante os ensaios de curto-circuito, conforme resultados apresentados na Figura 2.21 (a) para os para-raios do tipo B.

A maior parte dos para-raios ensaiados permaneceu conectada ao circuito de potência após o ensaio de curto-circuito, conforme pode ser visualizado na Figura 2.21 (b). Contudo, o equipamento do tipo B1 apresentou a separação dos seus conectores do circuito de potência, e os para-raios do tipo D1 e D2 apresentaram a perda da suportabilidade mecânica, projetando fragmentos dos blocos de resistores.

A Figura 2.22 apresenta os resultados dos ensaios de curto-circuito em relação à ignição do material polimérico. Nota-se que todas as aplicações de baixa corrente propiciaram o início do processo de combustão do invólucro. Normalmente, as chamas foram auto-extintas em até 30 segundos, menos para o para-raios do tipo D2, que permaneceu em ignição por mais tempo.

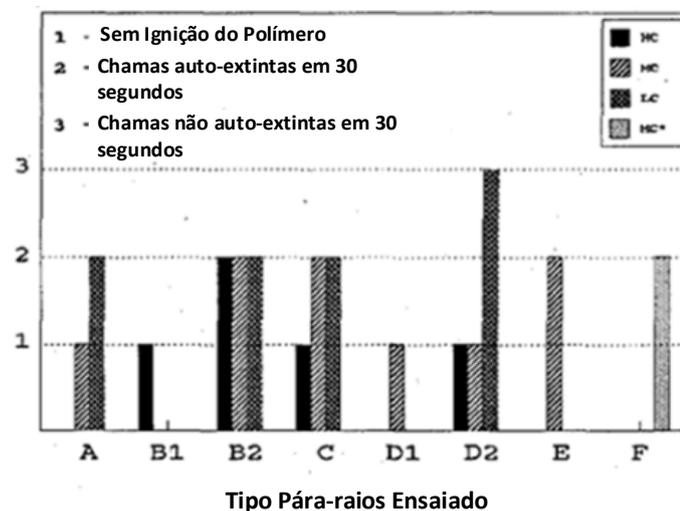


Figura 2.22 – Resultados dos ensaios de curto-circuito em relação a ignição do material polimérico. Traduzida do trabalho de (COLOMBO et al., 1996).

O trabalho realizado por Mobedjina et al. (1998) apresenta uma revisão dos principais aspectos de projeto e ensaios relacionados a para-raios poliméricos. Em relação aos ensaios de curto-circuito, os autores do trabalho discutem sobre alguns aspectos desses testes, tais como preparação das amostras, níveis de correntes de ensaio e duração das

aplicações. A Figura 2.23 apresenta um exemplo bem sucedido de ensaio de curto-circuito realizado em um para-raios polimérico, com aplicação de 50 kA durante 200 ms.

Nota-se, através da Figura 2.23 (b), que o arco elétrico, formado durante o ensaio, rompeu o invólucro do equipamento e se desenvolveu, posteriormente, no lado externo do para-raios. Não foram relatadas ejeções de partes do equipamento, bem como, ignição do invólucro.

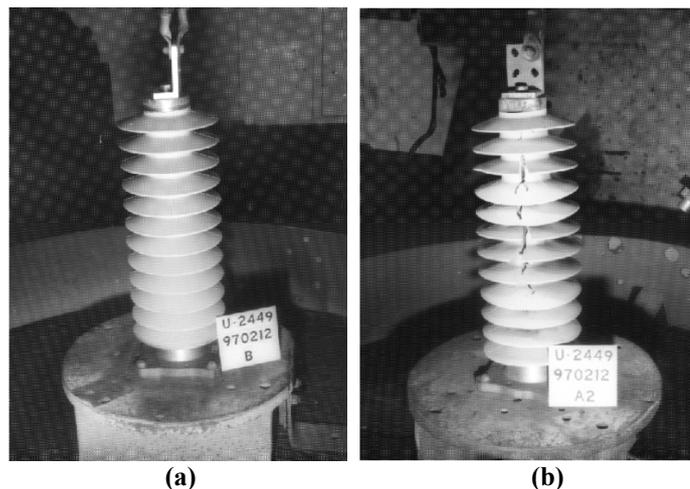


Figura 2.23 – Para-raios polimérico submetido ao ensaio de curto-circuito. (a) Antes e (b) após a aplicação de 50 kA. Fonte: (MOBEDJINA et al., 1998).

Taylor (2000) apresentou algumas características de projeto e desempenho de para-raios poliméricos em relação ao curto-circuito. A Figura 2.24 (a) e (b) apresenta os resultados de ensaios de curto-circuito em para-raios poliméricos. No primeiro caso, Figura 2.24 (a), o para-raios foi reprovado no ensaio, uma vez que foram observadas ejeções de partes do dispositivo durante os testes. Após a modificação do projeto, com o aumento da rigidez mecânica do módulo do equipamento, o para-raios foi considerado aprovado no ensaio de curto-circuito (Figura 2.24 (b)).

Outros exemplos de resultados satisfatórios de ensaios de curto-circuito podem ser encontrados no trabalho de Richter et al. (2013), conforme mostrado pela Figura 2.25 (a) e (b). Nota-se que, em ambos os casos, os invólucros dos para-raios se encontram severamente danificados. No entanto, não foram observadas ejeções de partes pesadas, como os resistores de óxido de zinco e outros acessórios dos para-raios. No caso do equipamento mostrado na Figura 2.25 (b), observou-se a projeção apenas de partes poliméricas do invólucro, podendo-se afirmar que o para-raios falhou de uma forma controlada e segura.

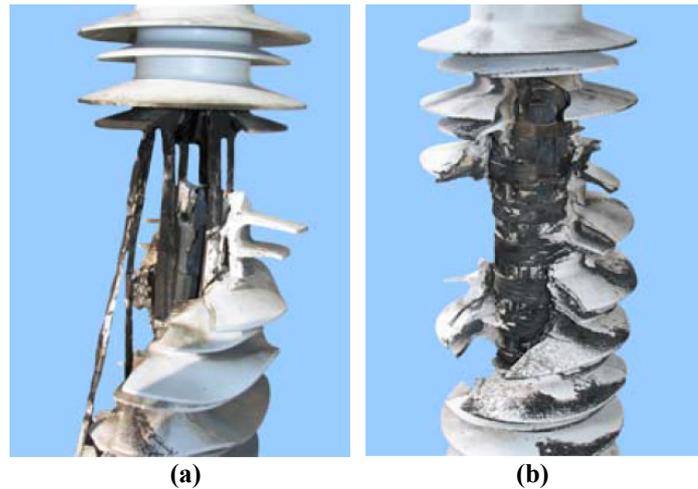


Figura 2.24 – Para-raios polimérico submetido ao ensaio de curto-circuito. (a) Para-raios reprovado no ensaio de curto-circuito; (b) Para-raios aprovado no ensaio de curto-circuito. Fonte: (TAYLOR, 2000).

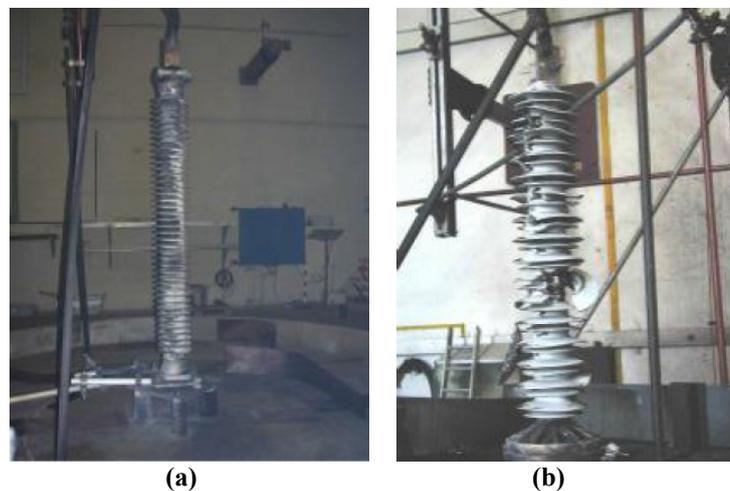


Figura 2.25 – Resultados de ensaios de curto circuito em para-raios poliméricos para corrente de 63 kA com duração de 200 ms. (a) Para-raios Siemens; (b) Para-raios ABB. Fonte: (RICHTER et al., 2013).

2.4 Utilização de Polietileno na Manufatura de Equipamentos Elétricos

O polietileno, de forma geral, é um material dielétrico fortemente empregado na manufatura de equipamentos elétricos, sendo responsável pela isolamento de partes energizadas. Uma breve descrição do polietileno, a aplicação e o desempenho deste material dielétrico são descritos nos itens a seguir.

2.4.1 Breve Descrição sobre o Polietileno

O polietileno é um polímero de hidrocarbonetos formado exclusivamente por carbono e hidrogênio, constituindo macromoléculas também conhecidas como cadeias

poliméricas. Este polímero é produzido a partir do monômero etileno, através do processo de polimerização em altas pressões e temperaturas. As propriedades mais importantes deste material estão relacionadas ao peso molecular, a distribuição de peso molecular, ramificações, reticulações e cristalinidade.

Basicamente, o polietileno é subdividido em seis classes, de acordo com sua cristalinidade, a saber: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de média densidade (PEMD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno linear de baixa densidade (PELBD), polietileno de alto peso molecular (PEAPM) e polietileno reticulado (XLPE). Tais variações são obtidas através de diversas técnicas de síntese do polímero, onde são variáveis de controle o tipo de reator, os perfis de temperatura e pressão e o uso de diversos tipos de catalisadores.

A Figura 2.26 apresenta, de forma simplificada, as cadeias poliméricas e suas ramificações, de acordo com a classificação do polietileno (THUE, 2005). Nota-se que o comprimento das cadeias poliméricas e de suas ramificações varia significativamente, sendo que o tamanho e a distribuição das ramificações afetam as propriedades do polímero, bem como, sua cristalização.

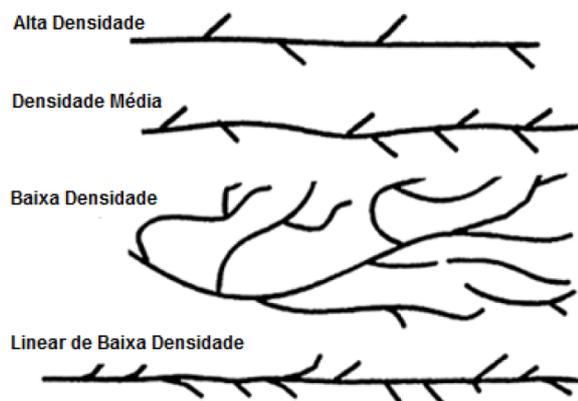


Figura 2.26 – Representação simplificada das cadeias poliméricas e suas ramificações. Traduzida de (THUE, 2005).

Em condições normais de temperatura e pressão, o polietileno é um sólido semicristalino, possuindo lamelas cristalinas e regiões amorfas. As partes cristalinas são formadas pelo alinhamento de porções das cadeias poliméricas, ao passo que as regiões amorfas são caracterizadas pela ausência de alinhamento e formação de estruturas espirais, conforme mostrado pela Figura 2.27.

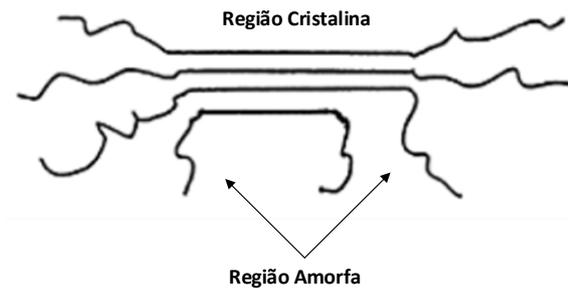


Figura 2.27 – Exemplo simplificado das regiões cristalinas e amorfas do polietileno. Adaptada de (THUE, 2005).

A Figura 2.28 apresenta, de forma mais detalhada, o arranjo estrutural do polietileno, onde as regiões cristalinas se encontram alinhadas e as regiões amorfas são formadas por espiras, junções e conexões das cadeias poliméricas. A região amorfa também acomoda as cadeias poliméricas curtas, as ramificações das cadeias e as reticulações (JONES et al., 2005).

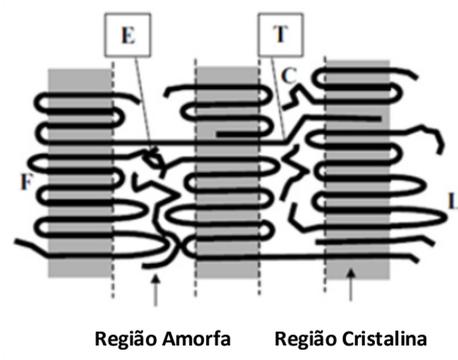


Figura 2.28 – Morfologia do polietileno. F, dobras lamelares da cadeia polimérica. C, projeções. L, espiras. T, junções. E, conexões. Traduzida do trabalho de (JONES et al., 2005).

Vale ressaltar que a região cristalina do polietileno é responsável por importantes propriedades, tais como: dureza, módulo de Young (que é um parâmetro relacionado à rigidez do material) e resistência à penetração de gás e umidade. Já as partes amorfas estão relacionadas à flexibilidade e à facilidade de processamento.

Em geral, o polietileno é um material com excelente resistência química, bom comportamento em relação à fadiga, e com amplas propriedades em função de sua estrutura e peso molecular. O polietileno apresenta boa resistência a solventes orgânicos, água, ácidos e solventes em geral (VASILE e PASCU, 2005). Este material apresenta boas propriedades dielétricas, excelente resistência a intempéries, adequada hidrofobicidade superficial e alta estabilidade térmica e oxidativa (ARORA e MOSCH, 2011; HEGER et al., 2010 e TEYSSÉDRE e LAURENT, 2013). Adicionalmente, aditivos plastificantes e materiais de

preenchimento podem ser incorporados a matriz polimérica para melhorar o desempenho do polietileno em relação aos estresses ambientais (USHAKOV, 2004).

2.4.2 Aplicações do Polietileno em Equipamentos Elétricos de Média e Alta Tensão

A descoberta do polietileno ocorreu no ano de 1938, quando se iniciou a produção de PEBD. Neste mesmo ano, este material isolante foi empregado na produção de cabos telefônicos. Sua utilização nos cabos de potência veio a acontecer em meados da década de 40, com o início da produção nos Estados Unidos em 1944 e, mais tarde, no ano de 1947, foram manufaturados cabos de 20 kV e em 1958 foram instalados cabos com isolamento de 70 kV na Suíça. Na França, em 1969 foram fabricados e instalados cabos de 225 kV, com seção transversal de cobre de 360 mm² e isolamento de 24 mm, trabalhando com um gradiente de 9,5 kV/mm (ARRIGHI, 1984).

A história dos cabos isolados com PEAD ocorreu em paralelo com os cabos de PEBD, porém, com atraso de cerca de 10 anos. A descoberta do PEAD ocorreu logo após a segunda guerra mundial, com o processo de polimerização ocorrendo a temperaturas e pressões mais baixas, comparadas com o PEBD. A estrutura mais linear das cadeias moleculares do PEAD permitiu um melhoramento das propriedades mecânicas e térmicas do polímero, contribuindo para o aumento da temperatura de operação dos cabos. A isolamento de PEAD foi utilizada em cabos de tensão de 60 kV produzidos na Alemanha em 1962. Os primeiros cabos de 225 kV, isolados com PEAD, com seções de 400 mm² de alumínio e 800 mm² de cobre, foram instalados no sistema elétrico francês em 1978.

No final da década de 50, foi desenvolvido o polietileno reticulado por meio da exposição à radiação ou agentes químicos como peróxidos orgânicos. A reticulação consistiu, basicamente, na conexão entre cadeias moleculares, acarretando no aumento da resistência a deformação, melhoria das propriedades térmicas e de envelhecimento. Através da operação de reticulação, foi possível introduzir ao polietileno, de forma geral, aditivos tais como antioxidantes, retardantes de chama, inibidores de trilhamento, entre outros.

A fabricação de cabos isolados com XLPE foi relatada em 1962, no Japão, com a produção do primeiro cabo de 77 kV. Em 1973, cabos de 150 kV, com condutores de cobre de 500 mm² e isolamento em XLPE foram instalados na Suécia. Em 1978, foram produzidos e instalados no Japão os primeiros cabos de 275 kV, com isolamento de 27 mm.

A Figura 2.29 (a), (b) e (c) apresenta exemplos de cabos isolados com PEBD, PEAD e XLPE, respectivamente.

Na década de 50, foram produzidos os primeiros cabos cobertos com isolamento em PVC (Policloreto de Vinila). Estes cabos foram utilizados em redes compactas, onde os condutores eram mantidos distanciados entre si por espaçadores de acrílico (*Pexiglas*). As primeiras redes compactas operavam sob tensão de 5 kV. Posteriormente, no ano de 1954, os sistemas migraram para a tensão de operação de 15 kV, onde começaram a surgir os primeiros problemas desta topologia, tais como trilhamento na cobertura dos condutores e erosão dos espaçadores.

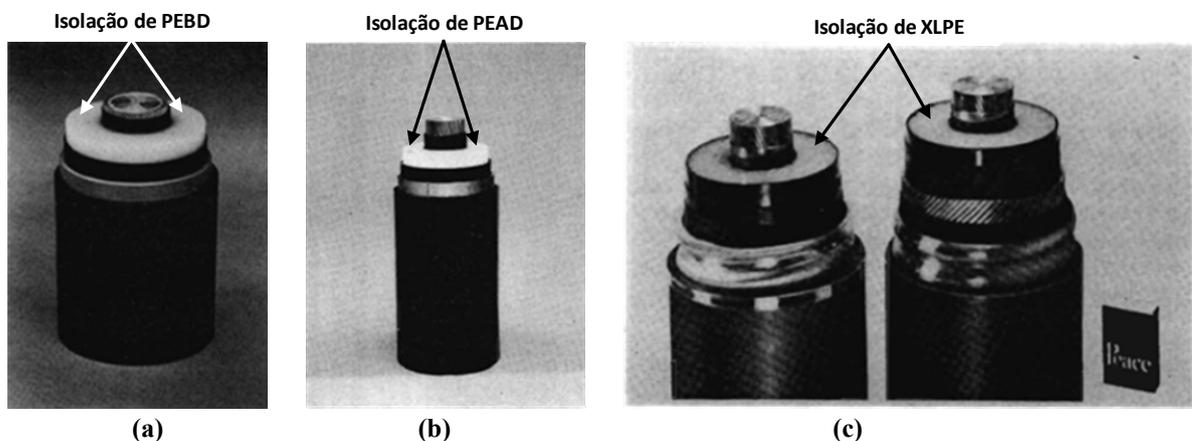


Figura 2.29 – Exemplos de cabos com isolamento de polietileno. (a) Isolação de PEBD, condutor de cobre de 1600 mm^2 , tensão nominal de 400 kV; (b) Isolação de PEAD, condutor de cobre de 800 mm^2 , tensão nominal de 225 kV; (c) Amostras de cabos isolado de XLPE. Adaptada de (ARRIGHI, 1984).

Em 1960, os sistemas de distribuição passaram a operar nos níveis de tensão de 25 kV e 35 kV. Para operar com tensões mais elevadas, os cabos cobertos passaram a utilizar o PEBD e o PEAPM, compondo, desta forma, a cobertura destes equipamentos. Os espaçadores passaram a ser fabricados a partir de PEAD, que apresentava melhores propriedades quanto à moldabilidade, resistência ao trilhamento, baixa constante dielétrica e melhores características térmicas. Posteriormente, no final da década de 60, foram desenvolvidos os isoladores tipo pino de PEAD, colaborando com a compatibilidade dielétrica nas topologias de redes compactas (NÓBREGA, 2013).

A Figura 2.30 (a) e (b) apresenta, respectivamente, espaçadores monofásico e trifásico, ambos feitos de PEAD, utilizados em redes compactas de distribuição. A Figura 2.31 (a) e (b) exibe exemplos de isoladores poliméricos de PEAD tipo pino e pilar, respectivamente.

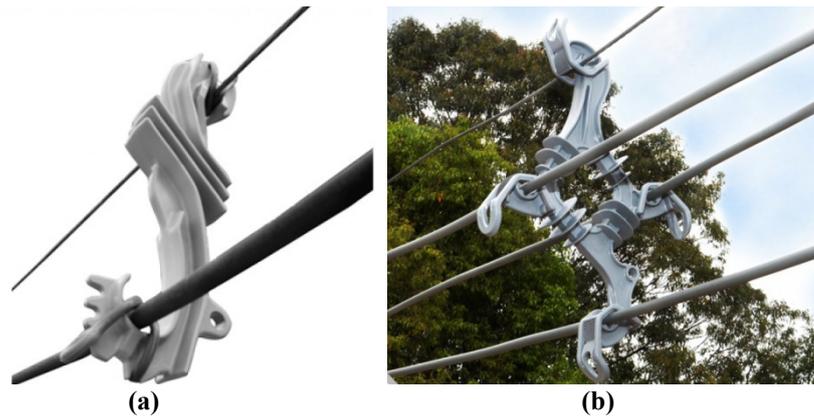


Figura 2.30 – Exemplos de espaçadores de PEAD. (a) Espaçador monofásico; (b) espaçador losangular trifásico. Fonte: (PLP, 2015).

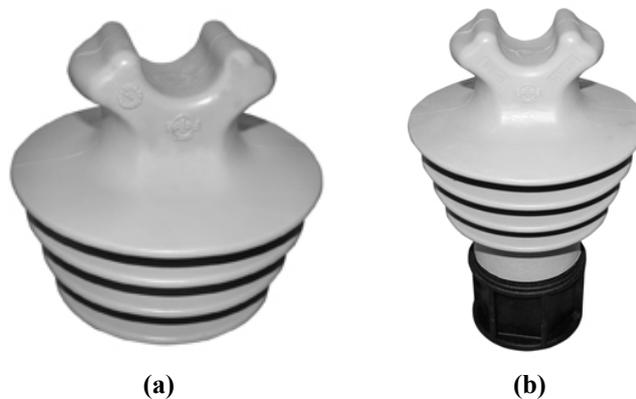


Figura 2.31 – Exemplos de isoladores de PEAD. (a) Isolador tipo pino; (b) isolador tipo pilar. Fonte: (PLP, 2015).

2.4.3 Desempenho do Polietileno em Equipamentos Elétricos de Média e Alta Tensão

O trabalho realizado por Crowdes (1959) apresenta detalhes do projeto e instalação de cabos isolados com PEAPM e cobertura em PVC, operando em 35 kV. Os cabos foram projetados para uma potência de 20 MVA, sendo a máxima temperatura de operação do condutor limitada a 70 °C, com temperatura ambiente de 40 °C.

Vários ensaios foram realizados neste tipo de cabo durante seu desenvolvimento, tais como, ensaios de tensão aplicada AC e DC, impulso atmosférico, ensaios de ciclos de carga entre outros, sendo que os resultados dos testes foram considerados satisfatórios. Os autores afirmaram que durante dois anos de operação, foram registrados quatro desligamentos devido a descargas atmosféricas. No entanto, não foram relatadas falhas na isolação dos cabos e o sistema voltou a operar normalmente após os desligamentos.

Davini et al. (1967) apresentou dados sobre a fabricação e instalação, bem como, ensaios elétricos realizados em quatro cabos isolados com borracha de etileno propileno

(EPR) e cobertura em polietileno, de tensões nominais variando de 20 kV a 60 kV. A Figura 2.32 exibe uma amostra de cabo isolado em EPR de 45 kV, com cobertura em polietileno.

Os cabos passaram por uma série de ensaios elétricos, tais como, tensão aplicada, tangente de delta, medições de resistência do isolamento, impulsos atmosféricos e ciclos de carregamento. Também foram efetuados ensaios mecânicos em amostras da isolação, tais como, ensaios de tração, módulo de elasticidade e alongação na ruptura, tanto em amostras novas como em envelhecidas termicamente.

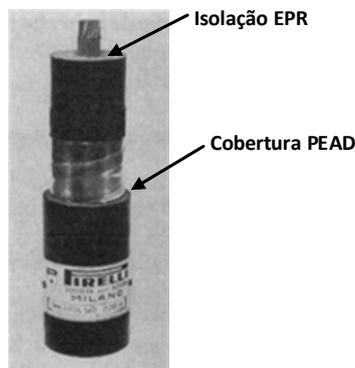


Figura 2.32 – Amostra de cabo isolado em EPR de 45 kV, com cobertura de polietileno. Adaptada de (DAVINI et al., 1967).

Este trabalho também apresentou uma avaliação de vários tipos de materiais isolantes sólidos, como polietileno, PVC, EPR, borracha natural e sintética. Alguns dos resultados obtidos são apresentados na Figura 2.33 (a), (b) e (c), que exibe, respectivamente, o comportamento da permissividade dielétrica em relação à temperatura, a resistência a descargas parciais e a resistividade térmica dos materiais dielétricos avaliados. Nota-se que, em geral, tais materiais não apresentam variação da constante dielétrica em relação à temperatura, com exceção do PVC (Figura 2.33 (a)) e que o polietileno possui a menor resistividade térmica entre os materiais analisados (Figura 2.33 (c)).

Os autores do trabalho concluíram, por meio dos ensaios realizados, que os materiais dielétricos ensaiados apresentam propriedades promissoras para utilização como isolante e que os ensaios elétricos mostraram que os cabos de EPR com cobertura de polietileno apresentaram suportabilidade dielétrica suficientemente alta para as tensões de trabalho, garantindo margens de segurança adequadas em relação à tensão de operação e impulso atmosférico.

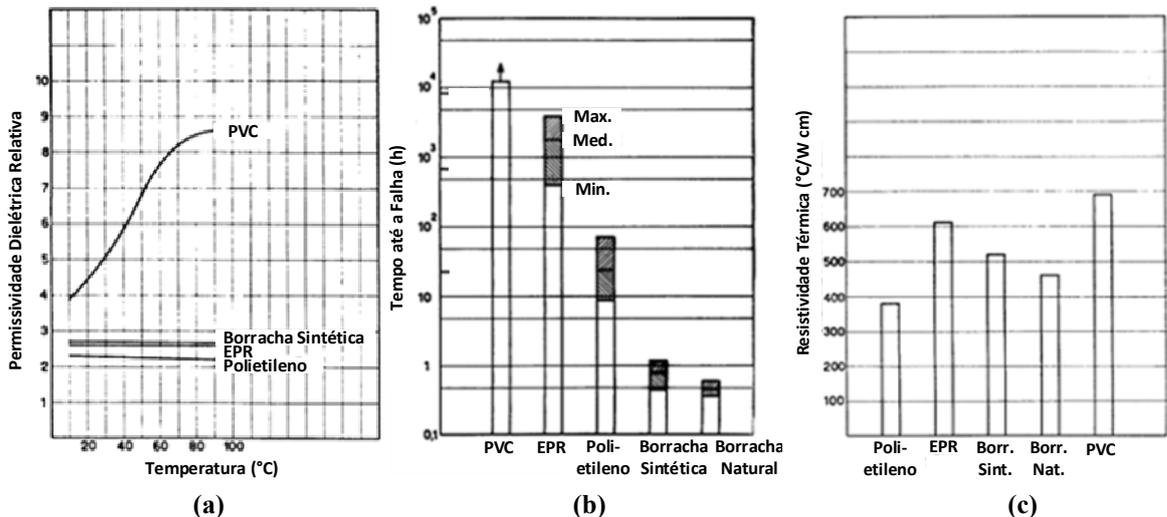


Figura 2.33 – Resultados dos ensaios realizados em materiais isolantes. (a) Permissividade dielétrica relativa em função da temperatura; (b) resistência a descargas parciais e (c) resistência térmica. Traduzida do trabalho de (DAVINI et al., 1967).

Kellam (1963) realizou uma avaliação em cabos isolados cobertos por polietileno, utilizados em redes subterrâneas, por meio de ensaios simulando condições de carregamento, curto-circuito e surtos de manobra. As condições de carregamento foram simuladas por meio da imersão dos cabos em água, com temperatura controlada e variando de 30 °C a 60 °C. Os cabos permaneceram nestas condições durante 15 meses de teste. Os resultados observados durante os ensaios foram satisfatórios, sendo que o polietileno manteve a proteção adequada da blindagem dos cabos. No entanto, foi observada a falha da cobertura de um dos cabos três dias antes do final dos ensaios, conforme mostrado na Figura 2.34.

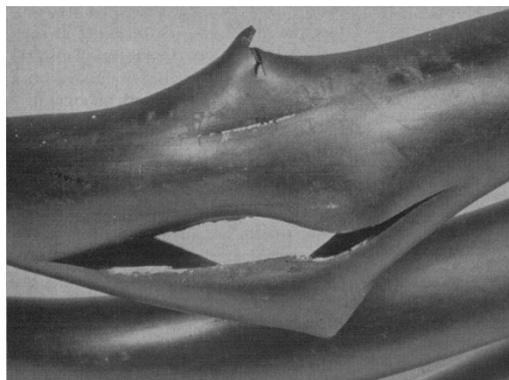


Figura 2.34 – Falha na cobertura de um dos cabos ensaiados. Fonte: (KELLAM, 1963).

Nos ensaios de corrente de curto-circuito, a cobertura de polietileno permaneceu visualmente intacta, mesmo para correntes da ordem de 20 kA, com duração de 5 a 240 ciclos.

Nos anos de 1972 e 1973, foram reportadas falhas em cabos isolados de polietileno de 15 kV e 22 kV, que se encontravam em operação há oito anos. Pequenas amostras do material dielétrico foram colhidas e foram detectadas presenças de arborescência no meio isolante. Uma vez que a expectativa de vida destes cabos era de 30 anos ou mais, as falhas prematuras e as presenças de sinais de arborescência causaram impacto significativo na indústria de cabos. A Figura 2.35 (a) e (b) apresenta alguns exemplos de arborescências observadas em cabos de média tensão isolados com PEAPM e XLPE (VAHLSTROM, 1972).

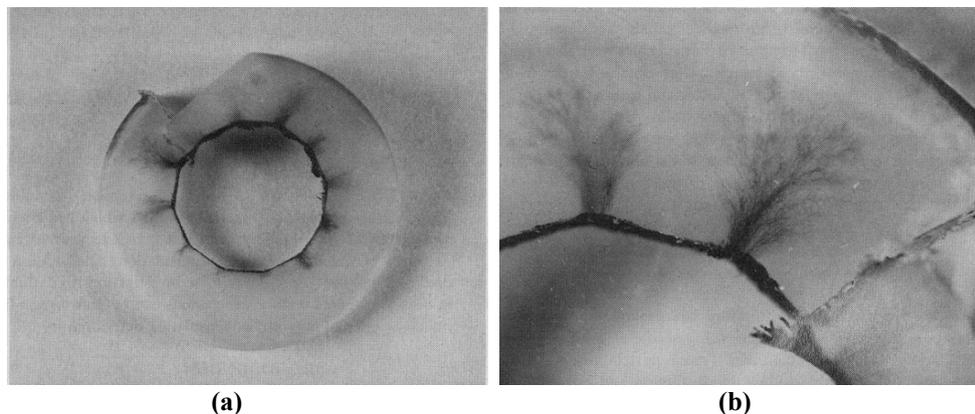


Figura 2.35 – Arborescência observada em cabos de média tensão com isolamento em PEAPM e XLPE. (a) Vista da seção transversal do cabo; (b) detalhe da arborescência. Fonte: (VAHLSTROM, 1971).

Amostras de mais de cento e sessenta cabos retirados de operação de vinte e oito concessionárias de energia foram analisadas no trabalho de Lawson e Vahlstrom (1973). De acordo com os dados analisados, os sinais de arborescência eram evidentes em praticamente metade das amostras retiradas de cabos com cinco ou mais anos de operação. Também foram identificados os diversos formatos de arborescência e a presença de pequenas imperfeições na isolação dos cabos, conforme mostrado na Figura 2.36 (a) e (b), respectivamente.

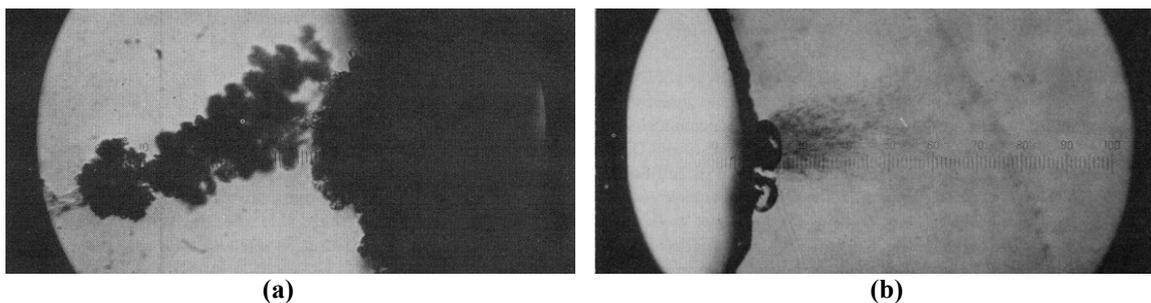


Figura 2.36 – (a) Formato diferenciado de arborescência; (b) presença de micro cavidades e sinais de arborescência. Fonte: (LAWSON e VAHLSTROM, 1972).

A partir da identificação de falhas em cabos isolados devido à presença de arborescência, muitos trabalhos passaram a ser realizados nesta área, com o objetivo de entender melhor o fenômeno da degradação da isolação, bem como, prover meios de minimizar tal efeito. Após diversos trabalhos de investigação a respeito do tema, foram propostas classificações para os sinais de arborescência, tais como: arborescência elétrica; arborescência em água e arborescência eletroquímica. A Figura 2.36 (a) e (b) apresenta sinais de arborescência elétrica e em água, respectivamente (EICHHORN, 1976).

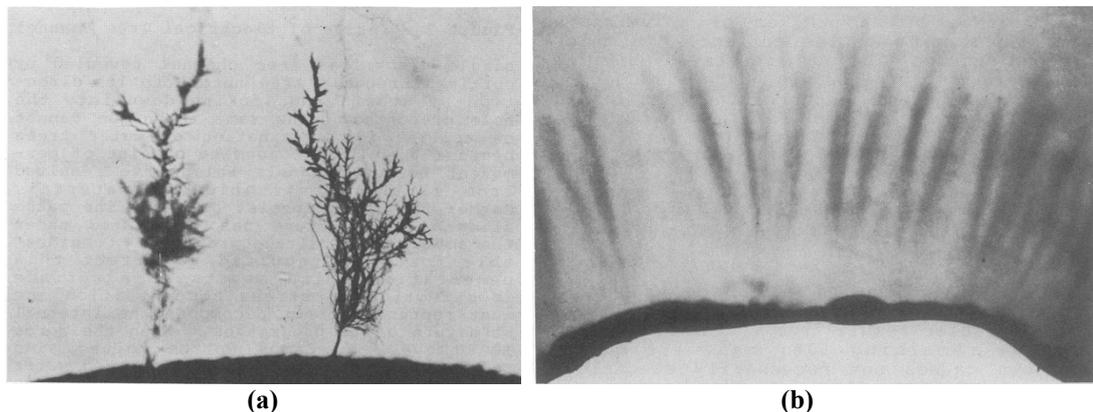


Figura 2.37 – Diferentes tipos de arborescência. (a) Arborescência elétrica; (b) arborescência em água. Fonte: (EICHHORN, 1976).

Os sinais de arborescência elétrica, Figura 2.36 (a), são formados por canais profundos e ramificados, produzidos pela degradação do material frente a descargas parciais. Este tipo de fenômeno pode ser iniciado devido a imperfeições na blindagem do condutor e do aterramento, presença de impurezas no dielétrico ou distorções no campo elétrico. Surtos de manobra e atmosféricos também propiciam o início da arborescência elétrica. Já a arborescência em água, Figura 2.36 (b), tem uma aparência difusa, consistindo de caminhos estreitos com presença de umidade. Normalmente, sua difusão é mais lenta e, por este motivo, é mais comum de ser observada nos cabos.

A Figura 2.38 apresenta um exemplo de arborescência eletroquímica. Este fenômeno está associado à presença de íons dissolvidos em água, os quais podem se mover na presença de campo elétrico.

Com o aprofundamento sobre os mecanismos envolvidos na arborescência e tendo em vista as falhas dielétricas observadas, os fabricantes de cabos passaram a controlar melhor o processo de manufatura, evitando a formação de micro cavidades com o desenvolvimento de novos métodos de extrusão, redução da presença de contaminação no polietileno com controle de temperatura e filtragem do material, entre outros (KOJIMA et al., 1981).

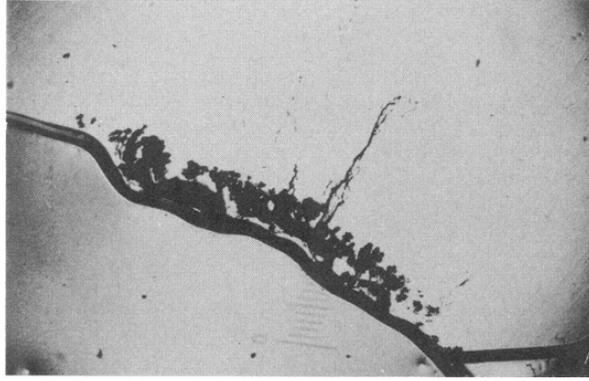


Figura 2.38 – Arborescência eletroquímica. Fonte: (EICHHORN, 1976).

Inibidores de arborescência passaram a ser desenvolvidos com o objetivo de melhorar o desempenho do polietileno utilizado na isolação de cabos, conforme descrito no trabalho de (MCMAHON, 1981). Diversos tipos de aditivos foram utilizados. No entanto, o que obteve melhor desempenho foi à adição de dodecanol na matriz polimérica. Algumas vantagens deste tipo de inibidor de arborescência foram descritas como material atóxico, economicamente viável e inerte às propriedades elétricas do isolante.

A Figura 2.39 (a) e (b) exhibe o comportamento da arborescência no PEAPM convencional e PEAPM com inibidor, respectivamente. Nota-se que a presença de dodecanol atuou neutralizando a propagação da arborescência no material dielétrico. Vale ressaltar que foi realizada uma série de outros ensaios, comprovando a eficácia do inibidor desenvolvido.

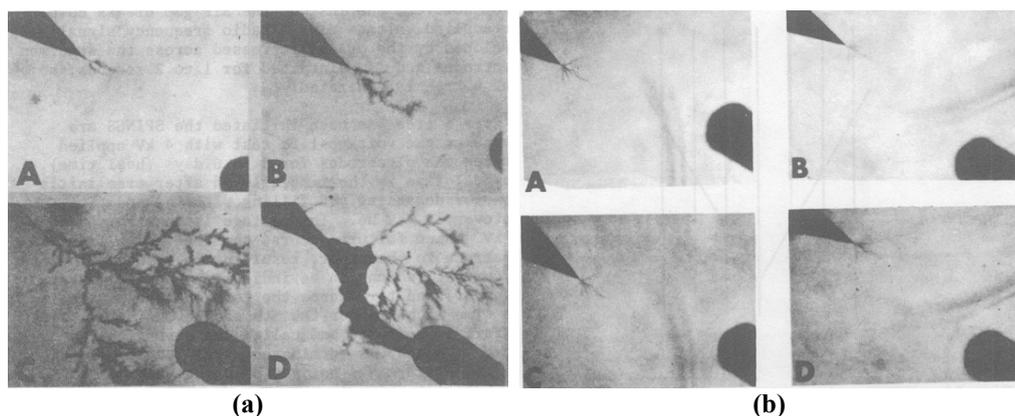


Figura 2.39 – Comportamento da arborescência em dielétricos. (a) PEAPM convencional e (b) PEAPM com inibidor de arborescência (dodecanol). Fonte: (MCMAHON, 1981).

Watanabe et al. (1986) desenvolveram um novo tipo de supressor de arborescência em água para aplicação em cabos isolados com XLPE. Derivado do ácido carboxílico alifático foi relatado pelos autores como sendo o melhor tipo de inibidor contra arborescência em água.

Utilizando cabos isolados com XLPE e inibidores de arborescência, também conhecidos como TR-XLPE (*Tree Retardant Cross-linked Polyethylene*), Sarma (1997) realizou ensaios de envelhecimento em diversas amostras de 15 kV, submetidas à tensão aplicada e ciclos de carga. Com o intuito de comparar variações de materiais isolantes, foram ensaiados cabos convencionais, isolados de XLPE, e dois tipos de cabos de TR-XLPE.

De acordo com os cálculos de envelhecimento realizados utilizando distribuições de probabilidade, foi possível prever que os cabos com isolamento de TR-XLPE possuem o dobro da vida útil quando comparados com os cabos convencionais em XLPE, nas condições de ensaio realizadas. Através das medições de absorção de água, perdas dielétricas e microscopia eletrônica de varredura, foi possível identificar as diferenças dos comportamentos dos cabos com e sem inibidores de arborescência, comprovando a eficácia da isolamento em TR-XLPE (SARMA,1997).

Seis tipos de cabos isolados de 35 kV foram retirados de serviço para avaliação em laboratório, conforme mostrado no trabalho de Katz e Walker (1998). Os cabos eram compostos por isolamento em XLPE, TR-XPLE e EPR, todos com cobertura em PEAD, com tempo de operação variando de cinco a sete anos. Uma série de avaliações foi realizada, incluindo ensaios de tensão disruptiva a frequência industrial e ao impulso atmosférico. Os resultados destes ensaios são mostrados na Figura 2.40 (a) e (b), respectivamente.

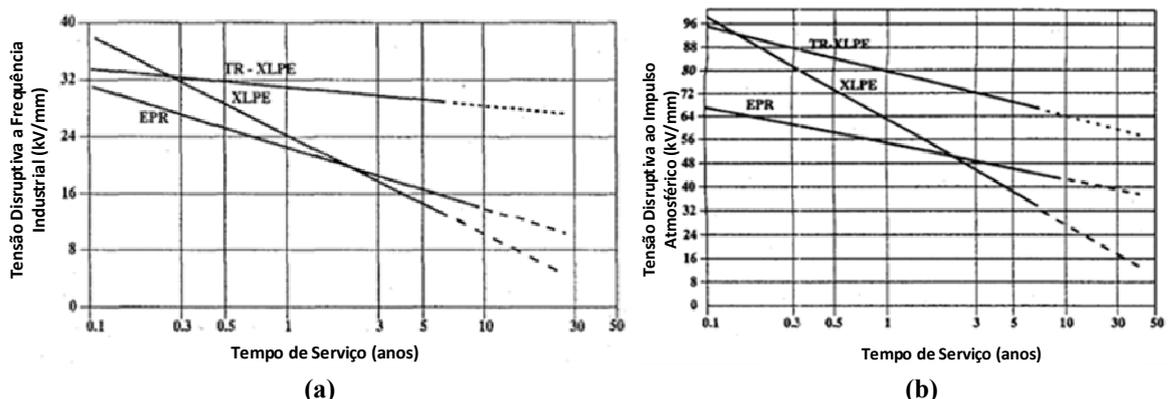


Figura 2.40 – Tensão disruptiva dos cabos isolados: (a) frequência industrial; (b) impulso atmosférico. Traduzida de (KATZ e WALKER (1998)).

Os cabos isolados com TR-XLPE apresentaram melhores desempenhos, quando comparados com os demais materiais isolantes, em relação à tensão disruptiva a frequência industrial e ao impulso atmosférico (Figura 2.40 (a) e (b)). Segundo os autores, este fato indica que os cabos com isolamento em TR-XLPE têm expectativa de vida útil maior que os demais dielétricos avaliados.

Com o objetivo de analisar o comportamento das redes compactas de distribuição frente ao impulso atmosférico de tensão, Gill et al. (1967) levantaram as características de tensão disruptiva versus tempo de disrupção (curva $V \times t$) para diversas configurações de espaçadores e cabos cobertos. O esquemático do circuito de ensaio e o comportamento obtido para os cabos cobertos com polietileno ou borracha de isobutileno isopreno são mostrados na Figura 2.41 (a) e (b), respectivamente.

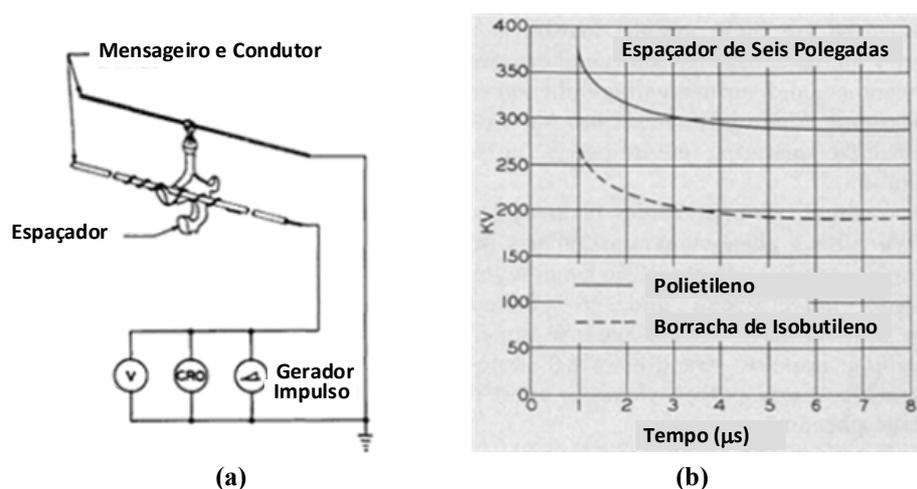


Figura 2.41 – (a) Esquemático do circuito de ensaio utilizado; (b) exemplo de curva $V \times t$ obtida para espaçadores e cabos cobertos utilizados em redes compactas. Traduzida de (GILL et al., 1967).

A tensão crítica suportável obtida para o conjunto espaçador e cabo coberto de polietileno foi de 287 kV, ao passo que o cabo coberto de borracha de isobutileno isopreno alcançou o valor de 192 kV. Este resultado indicou que a cobertura de polietileno contribuiu substancialmente para o aumento da suportabilidade das redes compactas frente ao impulso atmosférico de tensão.

Outras análises foram realizadas com espaçadores constituídos de porcelana e polietileno. Os resultados obtidos entre os dois materiais analisados foram praticamente os mesmos, mostrando que os espaçadores poliméricos apresentam bom desempenho frente ao impulso atmosférico de tensão.

Um método para estimar a vida útil de cabos cobertos de PEBD foi apresentado no trabalho de Harrold e Dakin (1976). Para tanto, foram realizados ensaios de envelhecimentos em cabos e espaçadores submetidos à tensão de operação, chuva e névoa salina. Por meio do cálculo da resistência, capacitância e medições das descargas superficiais ocorridas nos ensaios, foi possível obter a correlação entre o acúmulo dos efeitos das descargas superficiais e o tempo de falha do dielétrico, conforme mostrado na Figura 2.42.

Os cabos passaram por uma série de ensaios elétricos, tais como, tensão aplicada, tangente de delta, medições de resistência do isolamento, impulsos atmosféricos e ciclos de carregamento. Também foram efetuados ensaios mecânicos em amostras da isolação, tais como, ensaios de tração, módulo de elasticidade e alongação na ruptura, tanto em amostras novas como em envelhecidas termicamente.

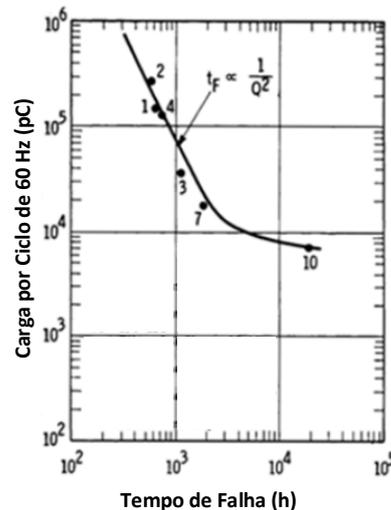


Figura 2.42 – Expectativa de vida útil de cabos cobertos de PEBD em função das descargas superficiais. Traduzida de (HARROLD e DAKIN, 1976).

Os autores concluíram que o tempo para a ocorrência de uma falha na cobertura dos cabos é inversamente proporcional ao quadrado do acúmulo de cargas elétricas, as quais ocorrem devido às intensas atividades de descargas superficiais nos ensaios de envelhecimento.

Um extenso estudo sobre redes compactas, as quais utilizam cabos cobertos de XLPE e espaçadores de PEAD, foi apresentado no trabalho de Nobrega (2011). Para avaliação proposta, foram realizados ensaios de compatibilidade dielétrica e simulações computacionais utilizando o software COMSOL, com o objetivo de se obter a distribuição de campo elétrico nos componentes empregados nesta topologia de rede.

Em função das falhas observadas durante os ensaios de compatibilidade dielétrica e com o objetivo de verificar a influência de diferentes configurações na distribuição de campo elétrico, foram realizadas várias simulações alterando, por exemplo, a permissividade dielétrica dos isolantes, o tipo de isolador, a presença de gotas de água, a excentricidade dos cabos, o efeito da camada semicondutora, entre outros.

A Figura 2.43 (a) e (b) exibe o resultado da simulação do campo elétrico considerando isoladores de pino polimérico e de porcelana, respectivamente. Os resultados

obtidos indicaram que o gradiente de campo elétrico dentro da cobertura dos cabos em XLPE variaram de 1,23 kV/mm para 4,56 kV/mm, comparando a utilização de isoladores polimérico e de porcelana, respectivamente. Portanto, observou-se um aumento de 270% no valor do gradiente elétrico quando da utilização de isoladores de pino de porcelana.

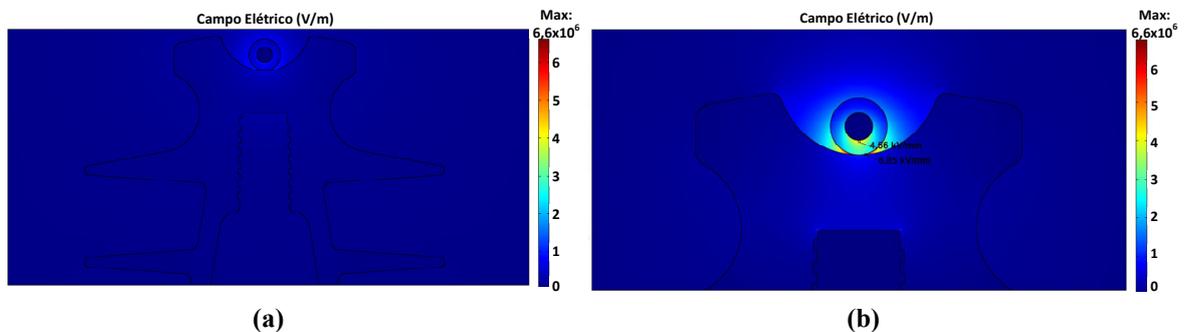


Figura 2.43 – Comparação dos resultados obtidos entre isoladores e cabos cobertos. (a) Isolador e pino poliméricos; (b) isolador de porcelana e pino metálico aterrado. Fonte: NOBREGA (2011).

De forma geral, os resultados deste trabalho possibilitaram identificar potenciais problemas capazes de gerar falhas em redes compactas, principalmente investigando a compatibilidade dielétrica entre cabos cobertos e espaçadores poliméricos, isoladores de pino, influência da presença de gotas de água, entre outros fatores (NOBREGA, 2011).

2.5 Considerações Finais

Por meio do levantamento bibliográfico realizado, foi possível identificar os principais ensaios utilizados para avaliar o desempenho dos invólucros de para-raios poliméricos. Dentre estes, pode-se destacar os ensaios de envelhecimento em névoa salina, tensão aplicada em ambiente com elevada umidade, imersão em água, ciclos térmicos, envelhecimento multifatorial e ensaio de curto-circuito.

Posteriormente, foram relatadas as aplicações do polietileno em equipamentos elétricos, tais como cabos, espaçadores e isoladores. Desta forma, foi possível observar que o PEAD é um material amplamente utilizado nos sistemas de média e alta tensão, possuindo um histórico de operação de mais de 50 anos. Diversas vantagens desse material podem ser listadas, como altas taxas de produção, custos de aquisição relativamente baixos, excelente resistência ao intemperismo e propriedades dielétricas adequadas.

Os principais desafios relacionados ao emprego do PEAD consistem em adequar as propriedades do material aos requisitos da aplicação final. Normalmente, esta adequação é feita através da aditivação do polímero base com, por exemplo, compostos anti-trilhamen-

inibidores de arborescência, aditivos anti-chama, protetores contra radiação UV, plastificantes, dissipadores de calor, entre outros.

Por fim, a eficácia do dispositivo ou equipamento elétrico que faz uso do PEAD depende também das condições do processo de manufatura, sendo que o controle de qualidade da produção exerce um papel fundamental no desempenho do produto final. Portanto, pode-se dizer que a escolha do polímero base e seus aditivos, o projeto do produto, somados ao emprego das técnicas adequadas de processamento são fundamentais para o correto desempenho do produto final.

Capítulo 3

Ensaaios Elétricos e Análise do Desempenho do Primeiro Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma sucinta, a etapa de desenvolvimento do primeiro protótipo de para-raios em PEAD. Posteriormente, são descritos, de forma detalhada, os ensaios elétricos realizados nestes primeiros protótipos, bem como os resultados e as análises alcançadas através dos experimentos realizados.

Os ensaios de curto-circuito foram realizados no Laboratório de Alta Potência do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, localizado na cidade de Nova Iguaçu, RJ. Os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT-EFEI), da Universidade Federal de Itajubá.

3.2 Construção do Primeiro Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD

As etapas de projeto e construção do primeiro protótipo de para-raios de PEAD foram integralmente desenvolvidas através da parceria com a empresa PLP Brasil – *Preformed Line Products Company*, localizada no município Cajamar/SP, certificada de acordo com os parâmetros de qualidade ISO 9001.

O projeto do para-raios foi concebido com base na experiência da PLP na manufatura de para-raios de distribuição com invólucro em borracha de silicone e isoladores tipo pino de PEAD. A Figura 3.1 exibe a vista frontal do projeto de para-raios de PEAD, classe 15 kV, com a respectiva altura do dispositivo, diâmetro da saia superior, distâncias de arco e de escoamento.

A primeira etapa da manufatura dos para-raios consistiu na confecção da parte ativa do dispositivo, também conhecida como módulo do equipamento, que é formado basicamente por um conjunto de resistores não lineares (varistores) de óxido de zinco. Os resistores não lineares foram agrupados em série, alinhados e, posteriormente, pressurizados axialmente, formando uma coluna de elementos resistivos, de forma a garantir adequada rigidez mecânica ao conjunto, bem como, apropriado contato elétrico entre os varistores.

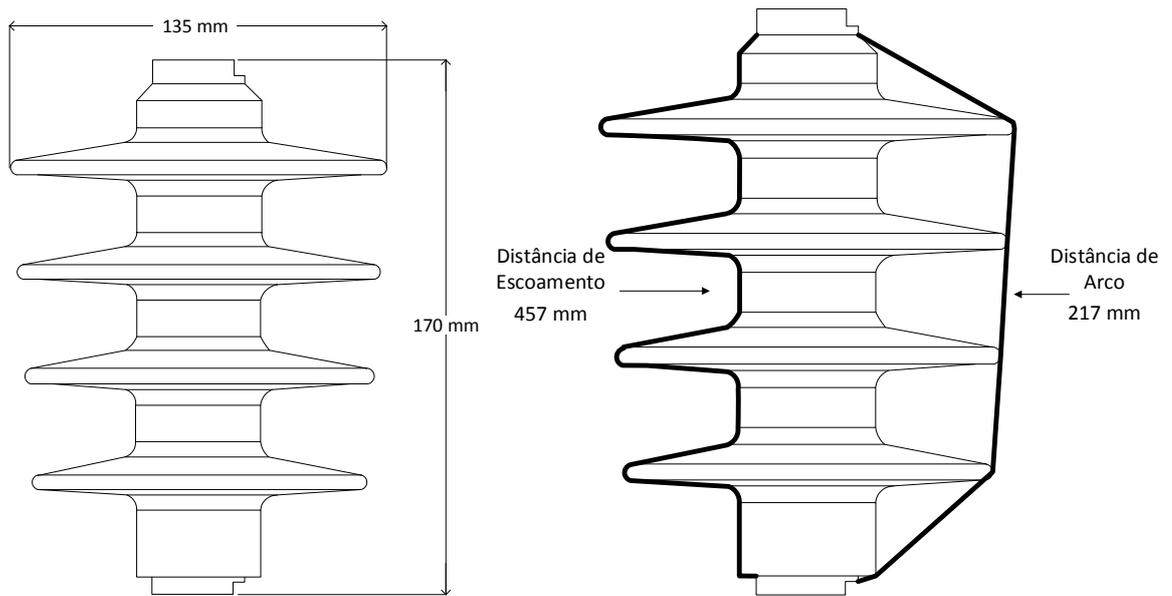


Figura 3.1 – Vista frontal do primeiro protótipo de para-raios de classe 15 kV.

Posteriormente, foram colocadas fitas adesivas de poliéster ao redor das junções dos resistores, com o objetivo de proteger as conexões entre os elementos resistivos frente à penetração de resina durante o processo de manufatura das peças. Em seguida, a coluna de varistores, devidamente pressurizada, foi encapsulada em fibra de vidro impregnada em resina epóxi. A Figura 3.2 (a) e (b) exibe o esquemático do processo de fabricação da parte ativa do para-raios e o módulo do dispositivo com o encapsulamento em fibra de vidro impregnada em resina epóxi, respectivamente.

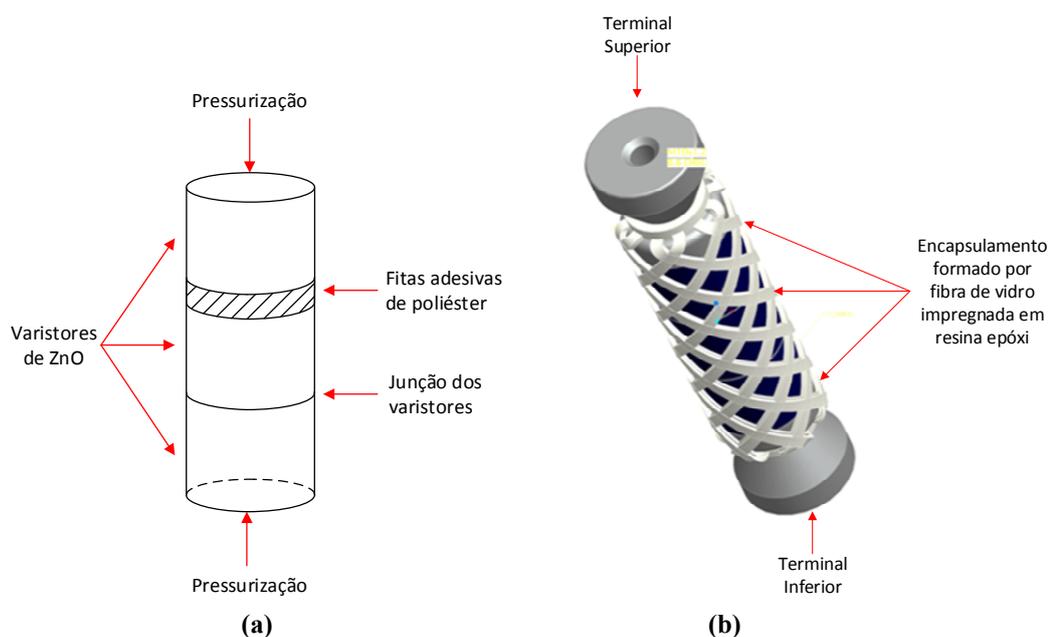


Figura 3.2 – (a) Esquemático do processo de fabricação da parte ativa do para-raios; (b) detalhe do módulo do para-raios após encapsulamento em fibra de vidro e resina epóxi.

O encapsulamento do bloco de resistores por fibra de vidro e resina epóxi tem como objetivo:

- Manter a pressurização do bloco de resistores, garantindo, desta forma, o alinhamento e o adequado contato elétrico entre os elementos resistivos;
- Garantir a resistência mecânica dos para-raios frente aos esforços físicos permanentes e dinâmicos;
- Manter a integridade física dos para-raios durante uma eventual falha seguida da passagem da corrente de curto-circuito do sistema;
- Facilitar as etapas posteriores do processo de manufatura do dispositivo.

Após o processo de encapsulamento e cura da resina, obteve-se o módulo do para-raios, conforme ilustrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Exemplo de um módulo dos para-raios de tensão nominal de 15 kV produzido pela PLP e utilizado nesse trabalho.

Desta forma, com os módulos montados, deu-se continuidade ao processo de manufatura dos para-raios, iniciando a etapa de injeção do invólucro em PEAD. Para tanto, foi utilizada uma injetora industrial marca *Battenfeld*, modelo HM 500/5100, razão L/D 22 para o processo de injeção do invólucro. Os parâmetros de processamento por injeção, tais como perfil de temperatura do canhão e do molde, velocidade de injeção, pressões de preenchimento de injeção e de recalque, tempo de resiliência e de resfriamento, entre outros foram ajustados de acordo com as propriedades físico-químicas e reológicas do polímero (HARADA e UEKI, 2012).

Empregou-se, nesta etapa, o PEAD comercial, fornecido pela Braskem, como polímero base para a composição do invólucro. Adicionou-se, na proporção de 5% em massa, um segundo composto (*masterbatch*), contendo aditivos antioxidantes e protetores contra radiação UV, buscando, desta forma, adequar as propriedades físico-químicas do composto final à aplicação como invólucro de para-raios.

Por fim, o para-raios com invólucro em PEAD foi produzido através da técnica de moldagem por injeção (HARADA e UEKI, 2012), sendo que o material polimérico foi aplicado diretamente ao redor dos módulos do para-raios. Através desta técnica, o invólucro adere diretamente à parte ativa, minimizando a probabilidade de penetração de umidade nas interfaces formadas entre o módulo e o invólucro do equipamento. Outra vantagem desta técnica é em relação a não necessidade de utilização de flanges para o fechamento do para-raios, reduzindo substancialmente a entrada de umidade por efeito capilaridade (LAHTI, 2003).

A Figura 3.4 apresenta o primeiro protótipo de para-raios com invólucro de PEAD, com tensão nominal de 15 kV. Vale destacar que foram produzidos para-raios de tensões nominais de 10 kV, 15 kV e 24 kV, com correntes de descarga nominais de 5 kA.

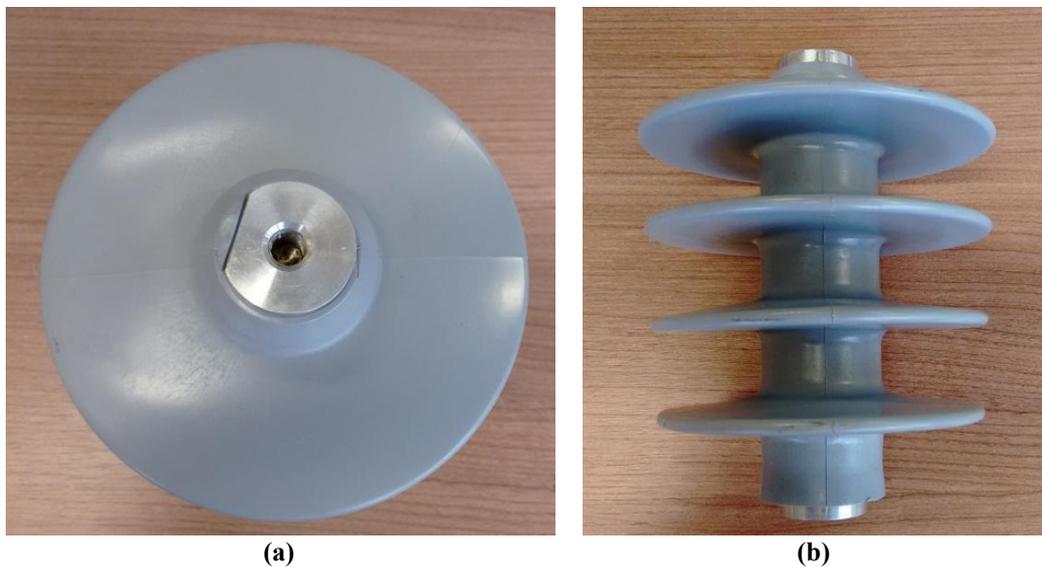


Figura 3.4 – Unidade do primeiro protótipo de para-raios produzidos com invólucros de PEAD. (a) Vista superior; (b) vista frontal.

As características físicas dos para-raios, tais como altura, distância de arco e escoamento, diâmetro e distância das saias, diâmetro da região entre saias e o peso dos equipamentos são mostradas na Tabela 3.1, de acordo com suas tensões nominais.

Após o processo de fabricação do primeiro protótipo de para-raios com invólucros de PEAD, iniciou-se a etapa dos ensaios elétricos, conforme descrito nos itens subsequentes.

Tabela 3.1 – Características do primeiro protótipo de para-raios de PEAD.

	Para-raios 10 kV	Para-raios 15 kV	Para-raios 24 kV
Altura (mm)	170	170	230
Distância de Arco (mm)	217	217	298
Distância de Escoamento (mm)	457	457	740
Peso (kg)	1,1	1,2	1,5

3.3 Ensaio Elétricos

Os ensaios elétricos realizados nos para-raios têm por finalidade avaliar o seu desempenho frente às condições de operação. Especificamente, para o primeiro protótipo de para-raios com invólucros de PEAD, foram realizados os seguintes ensaios elétricos:

- Ensaio de curto-circuito;
- Ensaio de envelhecimento em névoa salina;
- Ensaio de tensão suportável de longo prazo sob chuva;
- Ensaio de ciclo térmico.

Os dois últimos ensaios foram realizados em para-raios injetados apenas com a parte polimérica, sem o conjunto de varistores. Estas amostras foram produzidas sem a parte ativa, com o objetivo de ensaiar especificamente o invólucro dos para-raios. Entretanto, os ensaios de curto-circuito e envelhecimento em névoa salina foram realizados nos para-raios completos (parte ativa e invólucro de PEAD).

3.3.1 Ensaio de Curto-circuito

Os para-raios são dispositivos de proteção, utilizados com o objetivo de limitar sobretensões no sistema. No entanto, durante sua vida útil, os para-raios podem falhar, causando curtos-circuitos no sistema. Diversos fatores podem levar os para-raios à condição de falha, a saber: penetração de umidade por perda de estanqueidade do invólucro; falha de um ou mais varistores devido à distribuição de tensão não uniforme, ao desalinhamento da coluna ativa, entre outros (WANDERLEY NETO, 2007).

O projeto dos para-raios é considerado adequado se, durante uma eventual falha, não ocorrer à fragmentação violenta tanto do invólucro quanto da parte ativa do dispositivo e,

caso haja a presença de chamas, estas devem ser auto-extintas em um período de tempo pré-determinado. De acordo com a norma (IEC 60099-4, 2009), os para-raios são considerados adequados nos ensaios de curto-circuito se os seguintes critérios forem observados:

- Não ocorrer uma fragmentação violenta do para-raios;
- Caso haja uma fragmentação do para-raios, não é permitido que partes do dispositivo sejam arremessadas para fora de uma área pré-delimitada, exceto se os fragmentos possuírem massas menores que 60 g cada;
- Caso ocorra a ignição do material, as chamas devem ser auto-extintas em, no máximo, 2 min após o final do teste, independentemente se o material em ignição estiver dentro ou fora da área pré-delimitada ao redor do para-raios.

Portanto, o ensaio de curto-circuito tem como objetivo avaliar o comportamento dos para-raios durante uma condição de falha. Os ensaios foram realizados em duas classes de tensão nominal: 15 kV e 24 kV, ambas com correntes de descarga nominal de 5 kA, forma 8/20 μ s. Os para-raios foram posicionados no centro de uma estrutura circular, com diâmetro de 1,8 m e altura de 0,4 m. A Figura 3.5 apresenta a montagem do para-raios durante a realização do ensaio de curto-circuito.



Figura 3.5 – Montagem do primeiro protótipo de para-raios de PEAD de tensão nominal de 24 kV para o ensaio de curto-circuito. Fonte: CEPEL.

Quatro unidades do primeiro protótipo de para-raios foram submetidas à corrente de curto-circuito de 3 kA, com duração de 200 ms. A quinta unidade foi submetida à corrente

de curto-circuito de 600 A, com duração de 1 s. Os procedimentos de ensaio foram realizados de acordo com o indicado na norma (IEC 60099-4, 2009).

Os resultados dos ensaios não se mostraram satisfatórios devido às seguintes observações resultantes dos ensaios:

- Para a corrente de curto-circuito de 3 kA, aplicada na unidade de tensão nominal de 24 kV, observou-se o arremesso de partes do invólucro do para-raios, com massa superior a 60 g, para fora da área delimitada pela estrutura circular. Na Figura 3.6 (a) é apresentada uma das partes arremessadas durante esta aplicação.
- Observaram-se, para as aplicações de corrente de 600 A, que houve a ignição da parte polimérica em ambas as tensões nominais de 15 kV e 24 kV, sendo que a chama não se auto-extinguiu após 2 minutos. Na Figura 3.6 (b) é apresentada, em maiores detalhes, a ignição da parte polimérica do para-raios.

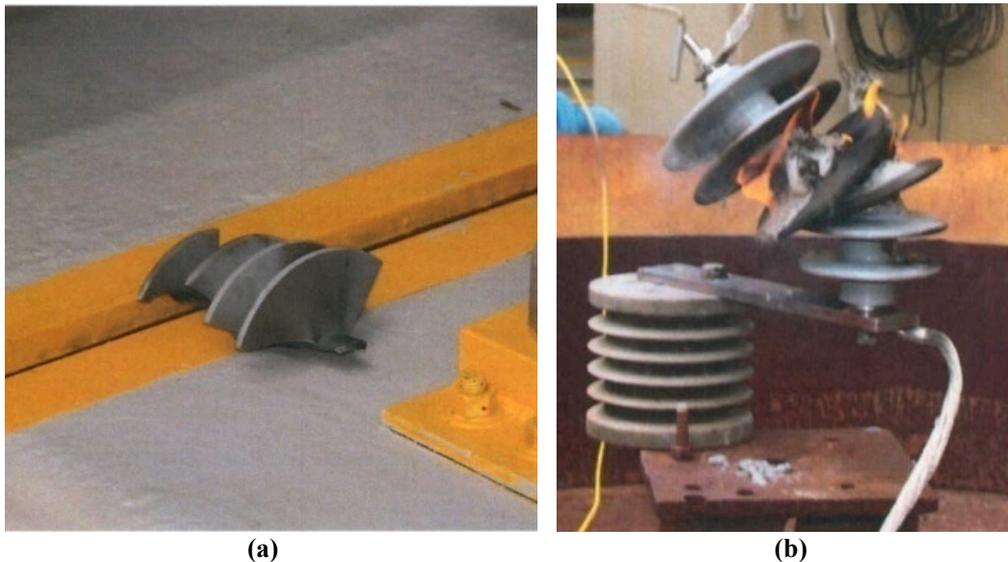


Figura 3.6 – Registros fotográficos do ensaio de curto-circuito. (a) Parte polimérica arremessada durante a aplicação de corrente de 3 kA; (b) Ignição do para-raios sem a auto-extinção das chamas no intervalo de 2 minutos. Fonte: CEPEL.

Na Figura 3.7 é mostrada a estrutura do para-raios após o ensaio de curto-circuito de 3 kA. Nota-se que grande parte da estrutura do invólucro em PEAD foi ejetada da peça, sendo que a parte ativa do para-raios permaneceu conectada ao sistema.



Figura 3.7 – Estrutura do para-raios após o ensaio de curto-circuito de 3 kA. Fonte: CEPEL.

Portanto, os resultados do ensaio de curto-circuito no primeiro protótipo de para-raios de PEAD foram essenciais para se obter as seguintes conclusões:

- Não foram observadas ejeções dos varistores em nenhuma das aplicações, demonstrando que o projeto do módulo do para-raios é capaz de suportar as solicitações mecânicas durante uma falha do equipamento.
- O desprendimento de partes do invólucro em PEAD demonstrou que este tipo de polímero possui índice de cristalinidade relativamente elevado, dificultando, desta forma, a transferência do arco elétrico da região interna do para-raios para o meio externo. Conseqüentemente, houve um aumento da pressão interna do para-raios, levando-o a falhar de maneira indesejada. De acordo com o trabalho de (MACKEVICH, 1994), se o arco elétrico não se transferir da região interna do para-raios polimérico para o meio externo em meio ciclo após o curto-circuito, há grande probabilidade do dispositivo falhar de modo não seguro, arremessando partes internas após a ruptura do invólucro.
- A quantidade de aditivos anti-chama incorporada ao *masterbatch* não foi suficiente para promover a auto-extinção da combustão do PEAD após o ensaio de curto-circuito.
- As aplicações de alta corrente com duração de 200 ms demonstraram ser mais severas sob o ponto de vista estrutural, causando a ejeção de partes do para-raios. As aplicações de baixa corrente com maior duração (600 A, 1 s) demonstraram ser mais rigorosas no sentido de avaliar a flamabilidade do material polimérico.

Portanto, em função dos resultados obtidos, o primeiro protótipo de para-raios de PEAD foi considerado reprovado no ensaio de curto-circuito, de acordo com os critérios estabelecidos na norma (IEC 60099-4, 2009).

3.3.2 Ensaio de Envelhecimento em Névoa Salina

Mesmo com a reprovação do primeiro protótipo de para-raios de PEAD no ensaio de curto-circuito, optou-se por realizar o ensaio de envelhecimento em névoa salina, uma vez que os objetivos desses ensaios são distintos. Enquanto o ensaio de curto-circuito visa analisar se a falha do para-raios ocorrerá de forma segura, o ensaio de envelhecimento tem por objetivo avaliar o comportamento do invólucro diante da erosão, do trilhamento e da penetração de umidade, analisando o desempenho em longo dos supressores de surtos.

Para tanto, três unidades do primeiro protótipo de para-raios de PEAD de tensão nominal de 15 kV foram submetidas a sua tensão de operação contínua (12,7 kV) na presença de névoa salina artificial por um período de 1000 h. A Figura 3.8 apresenta a ilustração do circuito de ensaio.

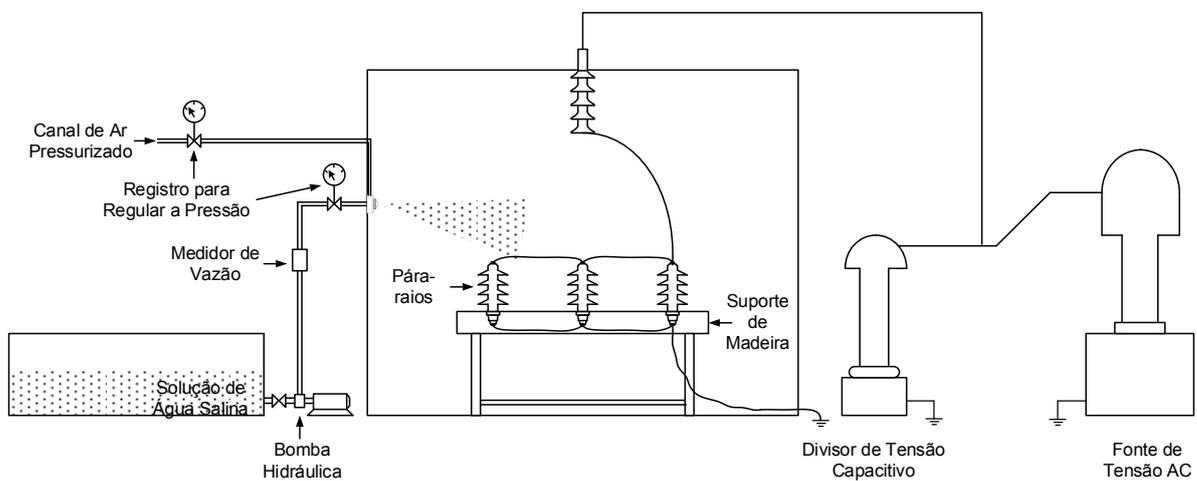


Figura 3.8 – Esquemático do circuito de ensaio de envelhecimento em névoa salina. Fonte de tensão AC de 150 kV, 20 kVA; divisor de tensão capacitivo de relação de transformação de 1000:1.

De acordo com a norma (IEC 60099-4, 2009), a concentração de sal em água pode variar de 1 kg/m^3 a 10 kg/m^3 . Para tanto, neste ensaio, a concentração de sal em água foi ajustada em seu limite máximo de 10 kg/m^3 , correspondendo a uma condutividade de aproximadamente $17000 \text{ }\mu\text{S/cm}$. A vazão de água foi ajustada em 9 l/h , em função das dimensões da câmara de névoa salina e do valor estabelecido em norma.

Foram observados, após as primeiras 200 h de ensaio, que o nível de descargas superficiais ao longo do invólucro aumentou consideravelmente, tanto em frequência quanto em intensidade.

Com aproximadamente 500 h de ensaio, ocorreu a atuação da proteção do sistema, com o desligamento da fonte de tensão. As inspeções visuais nas peças identificaram pequenas trincas abaixo das saias dos para-raios, acúmulo de partículas de sal ao longo do corpo do dispositivo e aumento da rugosidade da superfície do invólucro. Entretanto, não foram constatadas perfurações que atingissem o módulo do dispositivo. Desta forma, os para-raios foram novamente submetidos ao ensaio, com o religamento da fonte de alimentação do sistema.

Completadas 720 h de ensaio, foi observado o segundo desligamento do sistema em função da atuação da proteção. As inspeções visuais detectaram a falha de duas das três unidades, notando-se a perfuração do invólucro com sinais de carbonização da região, aumento das trincas no corpo do para-raios, presença acentuada de partículas de sal abaixo das saias e aumento da rugosidade superficial do invólucro. Na Figura 3.9 são apresentadas as falhas observadas nos invólucros dos para-raios.



Figura 3.9 – Falha observada durante a realização do ensaio de envelhecimento em névoa salina no primeiro protótipo de para-raios de PEAD. Perfuração e queima do material polimérico, trincas e acúmulo de sal na parte inferior das saias dos para-raios.

Mediante os resultados obtidos, optou-se por realizar novamente o ensaio de envelhecimento em três novas unidades do primeiro protótipo de para-raios. Porém, reduziu-se a concentração de sal em água de 10 kg/m^3 para 5 kg/m^3 , com o objetivo de verificar a influência desse parâmetro nos resultados de ensaio. A condutividade da solução salina para a nova concentração foi aproximadamente $8700 \text{ }\mu\text{S/cm}$. Os demais parâmetros de ensaio não foram alterados.

Entretanto, mesmo com a diminuição da condutividade da solução salina, as amostras não suportaram por 1000 h as condições de ensaio, em função de duas peças terem falhado após, aproximadamente, 800 h de experimento. A Figura 3.10 apresenta a falha ocorrida durante o ensaio de envelhecimento em névoa salina.



Figura 3.10 – Falha no invólucro do primeiro protótipo de para-raios de PEAD durante o ensaio de envelhecimento com concentração salina reduzida para 5 kg/m^3 de sal em água.

Os resultados obtidos para os ensaios realizados levaram as seguintes conclusões:

- A formação natural de bandas secas e bandas úmidas na superfície do invólucro induz o aumento de descargas superficiais, principalmente nas regiões de menor diâmetro do para-raios, ou seja, entre as saias. Regiões de menor diâmetro proporcionam maior densidade de corrente superficial e, portanto, colaboram para a maior ocorrência da formação de bandas secas (MARUNGSRI et al., 2006).
- A frequente presença de descargas superficiais no invólucro faz com que haja um aumento localizado de temperatura, criando, portanto, uma distribuição térmica não uniforme.
- As saias dos invólucros dos para-raios atuam de certa forma, como aletas dissipadoras de calor. Naturalmente, suas temperaturas são menores do que as temperaturas das regiões entre as saias, fato que contribui ainda mais para o aumento do gradiente térmico.
- As diferenças de temperatura, causadas pelas frequentes descargas superficiais, produzem expansões/contrações volumétricas não homogêneas, principalmente

sob as saias, criando, desta forma, esforços de tração/compressão ao longo do invólucro, culminando no surgimento das trincas.

- A presença das trincas superficiais no invólucro acarreta na penetração de umidade e poluição, criando um processo cíclico, que finaliza ao ocorrer à perfuração completa do invólucro.

Portanto, o primeiro protótipo de para-raios de PEAD foi considerado reprovado no ensaio de envelhecimento em névoa salina, de acordo com os critérios estabelecidos na norma (IEC 60099-4, 2009).

3.3.3 Ensaio de Tensão Suportável de Longo Prazo sob Chuva

Em função das falhas observadas no primeiro protótipo de para-raios de PEAD durante o ensaio de envelhecimento em névoa salina, optou-se por realizar ensaios complementares, tais como tensão suportável de longo prazo sob chuva e ciclo térmico.

O ensaio de tensão suportável de longo prazo sob chuva tem por objetivo acelerar o envelhecimento do invólucro dos para-raios em função da aplicação de tensão e poluição (precipitação a base de solução salina). Devido à presença de corrente de fuga aliada à umidade e poluição, observa-se a formação de bandas secas e bandas úmidas, podendo levar a ocorrência de descargas disruptivas ao longo do invólucro. Outro aspecto a ser observado nesse tipo de ensaio é a ocorrência de choques térmicos entre os períodos com e sem a presença de chuva.

Três unidades do primeiro protótipo de para-raios, de tensão nominal de 15 kV, foram submetidas ao ensaio. Os seguintes procedimentos foram realizados:

- A condutividade da água deionizada utilizada no ensaio foi ajustada em 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ através da adição de cloreto de sódio;
- A precipitação foi ajustada para operar em ciclos, sendo duas horas com período chuvoso e uma hora com período seco;
- Os valores das taxas de precipitação médias, tanto na horizontal quanto na vertical, foram ajustados em 2 mm/min;
- Os invólucros dos para-raios foram submetidos à tensão de operação contínua (MCOV) de 12,7 kV durante 1000 h de ensaio.

A Figura 3.11 apresenta o esquemático do sistema de ensaio e a Figura 3.12 (a) e (b) exibem os para-raios durante e após o ensaio de tensão suportável de longa duração sob chuva, respectivamente.

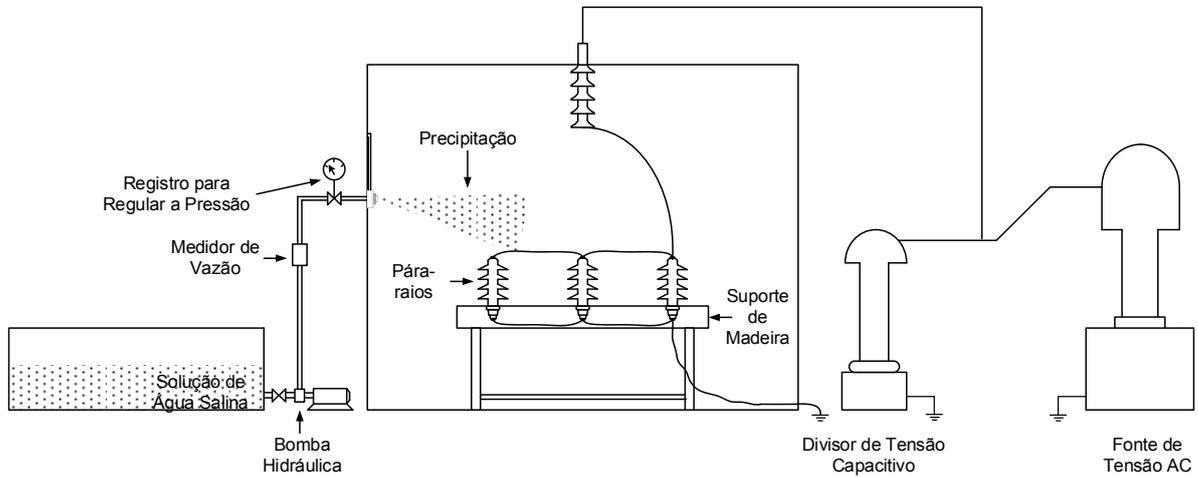


Figura 3.11 – Ilustração do sistema de ensaio de tensão suportável de longa duração sob chuva. Fonte de tensão AC de 150 kV, 20 kVA; divisor de tensão capacitivo de relação de transformação de 1000:1.

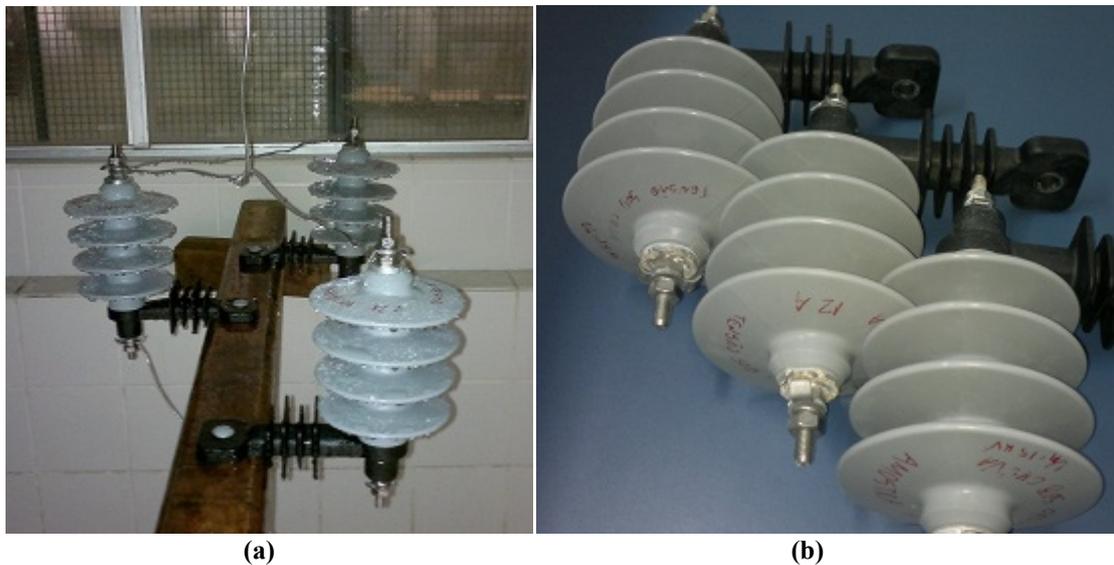


Figura 3.12 – (a) Três unidades do primeiro protótipo de para-raios durante o ensaio de tensão suportável de longa duração sob chuva. (b) Para-raios após a finalização dos ensaios.

Após a finalização do ensaio, foram realizadas inspeções visuais nas peças e não foram constatadas quaisquer modificações na estrutura dos invólucros, tais como fraturas, trincas, perfurações ou sinais de trilhamento.

3.3.4 Ensaio de Ciclo Térmico

O objetivo do ensaio de ciclo térmico é submeter os invólucros a variações térmicas, de modo a determinar o comportamento do material isolante diante das mudanças de temperatura. O ensaio foi realizado em duas unidades do primeiro protótipo de para-raios submetidas a ciclos de temperatura variando entre 10 °C e 60 °C, durante 1000 h.

Os supressores de surtos foram colocados em uma estufa, provida de resistores de aquecimento e torres de resfriamento, capaz de promover o controle da temperatura interna. Adicionalmente, a umidade do ambiente de ensaio foi controlada por meio de um canal de água vaporizada. O ensaio foi realizado de acordo com as seguintes condições:

- Umidade relativa ambiente ajustada em 95%;
- Taxa de aquecimento e resfriamento de 2,2 °C/min;
- Nível de temperatura máxima de 60 °C durante 60 min;
- Nível de temperatura mínima de 10 °C durante 105 min.

Na Figura 3.13 é possível observar o gráfico que representa o ciclo térmico, ou seja, o gráfico da temperatura em função do tempo. Verifica-se que a temperatura varia dentro da faixa aproximada de 10 °C a 60 °C. Os níveis máximos e mínimos da temperatura foram mantidos por um determinado intervalo de tempo, de acordo com os procedimentos de ensaio.

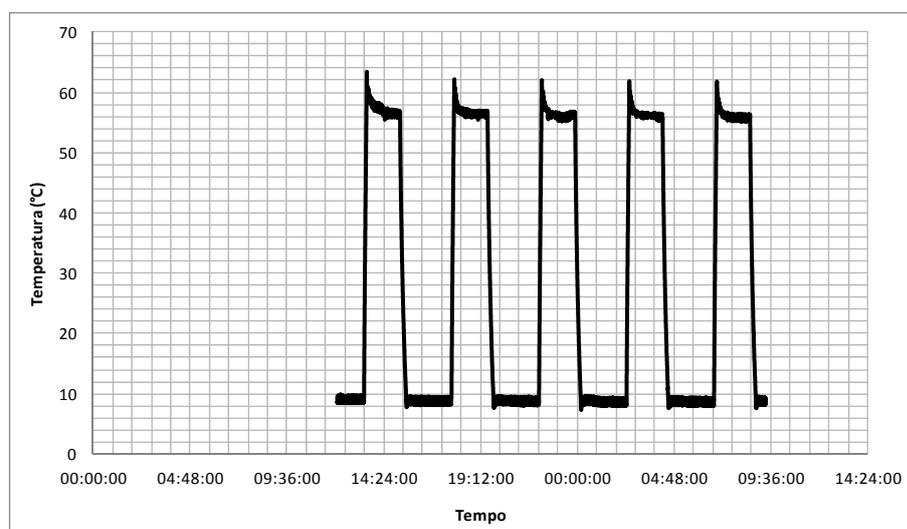


Figura 3.13 – Apresentação dos ciclos térmicos aplicados ao invólucro do primeiro protótipo de para-raios.

Após a realização do ensaio, não foram observadas modificações na estrutura dos invólucros, tais como fraturas ou trincas no material isolante. Na Figura 3.14 é apresentada uma fotografia das duas unidades do primeiro protótipo de para-raios após o ensaio de ciclo térmico.



Figura 3.14 – Amostras após o ensaio de ciclo térmico.

3.4 Considerações Finais

Por meio dos ensaios realizados no primeiro protótipo de para-raios de PEAD, foi possível constatar que o projeto do dispositivo não atende às solicitações dos ensaios de curto-circuito e envelhecimento em névoa salina estabelecidas na norma (IEC 60099-4, 2009). Ao que tudo indica, os resultados obtidos parecem estar relacionados com o índice de cristalinidade do PEAD. Portanto, há a necessidade de promover alterações na composição cristalina do invólucro buscando alternativas para alcançar resultados satisfatórios em ambos os ensaios.

Capítulo 4

Ensaaios Elétricos e Análise do Desempenho do Segundo Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta as modificações realizadas no polímero base, com a finalidade de adequar o material do invólucro as necessidades de desempenho requisitadas nos ensaios elétricos. Portanto, iniciaram-se os trabalhos com o segundo protótipo de para-raios com invólucros de PEAD. Os ensaios elétricos realizados e os resultados obtidos são mostrados nos itens a seguir.

4.2 Construção e Ajustes no Segundo Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD

Em função dos resultados obtidos nos ensaios de curto-circuito e envelhecimento em névoa salina, realizados no primeiro protótipo de para-raios de PEAD, observou-se a necessidade de realizar alterações na fração cristalina do polímero base. Os demais elementos do projeto do para-raios, tais como a estrutura da parte ativa, as características dos varistores utilizados, a estrutura das saias, as distâncias de escoamento e de arco, entre outras, permaneceram idênticas ao primeiro protótipo, conforme descrito no Capítulo 3, item 3.2.

Objetivando a redução no módulo de elasticidade e mantendo a identidade do PEAD, as seguintes alterações no polímero base foram promovidas como necessárias, a saber:

- **Plastificação do PEAD:** Em função da ejeção de material polimérico durante os ensaios de curto-circuito, notou-se a necessidade de plastificar o PEAD base, com o objetivo de reduzir seu índice de cristalinidade, tornando-o mais flexível. Desta forma, espera-se que haja maior facilidade para que o arco elétrico interno ao para-raios rompa o invólucro no primeiro semi-ciclo e se desenvolva no meio externo, sem o arremesso de partes do dispositivo. Espera-se, da mesma forma, que o processo de plastificação do polímero auxilie também no ensaio de envelhecimento em névoa salina, uma vez que, com o aumento da elasticidade do material, haverá também melhor desempenho frente aos esforços de tração/compressão impostos pelas diferenças de temperatura.

- **Aditivo Anti-chama:** Uma vez que foi observada a auto-ignição do primeiro protótipo de para-raios de PEAD, torna-se necessário a adição de compostos com propriedades anti-chama. Nesse caso, os aditivos anti-chama tem como objetivo promover a auto-extinção, caso existam, das chamas durante o ensaio de curto-circuito, fato não observado durante os ensaios no primeiro protótipo de para-raios de PEAD.
- **Melhoramento do Comportamento frente ao Trilhamento Elétrico e Erosão:** Observou-se a ocorrência de trilhamento elétrico e erosão de material polimérico durante o ensaio de envelhecimento em névoa salina. Desta forma, notou-se a necessidade de aprimorar as propriedades do material de forma a alcançar melhor desempenho frente às diversas solicitações impostas durante este ensaio.
- **Aumento da Capacidade de Dissipação de Calor:** Por fim, pretende-se alterar as propriedades térmicas do composto polimérico de forma a aumentar a capacidade de dissipação de calor do invólucro, contribuindo para a diminuição dos gradientes térmicos ao longo do corpo do para-raios.

Portanto, em função das alterações propostas, houve a necessidade de realizar a etapa de processamento da matéria prima de forma a adequá-la aos requisitos necessários para aplicação como invólucros de para-raios. Os itens a seguir descrevem sucintamente a etapa de processamento do material polimérico.

4.2.1 Etapa de Processamento do Material Polimérico

A etapa de processamento do material polimérico a ser utilizado no segundo protótipo de para-raios com invólucros de PEAD foi inteiramente desenvolvida no Instituto Nacional de Tecnologia – INT, localizado na cidade do Rio de Janeiro, RJ, na divisão de Processamento e Caracterização de Materiais. Este instituto está vinculado ao Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT.

Com o objetivo de reduzir o índice de cristalinidade do PEAD, propôs-se trabalhar com aditivos plastificantes através do uso de óleos vegetais incorporados durante o processamento do material polimérico. Para tanto, optou-se por utilizar dois tipos de óleos vegetais: óleo de mamona comum e óleo de mamona soprada de média viscosidade.

Além dos aditivos plastificantes baseados nos óleos vegetais, utilizou-se também a parafina clorada, que é um composto amplamente utilizado para promover a plastificação de polímeros (CRAVER e CARRAHER, 2000).

Em relação ao melhoramento das propriedades anti-chama, trilhamento elétrico, erosão e aumento da capacidade de dissipação de calor, foram utilizadas as cargas minerais compostas por trióxido de antimônio (Sb_2O_3) e hidróxido de alumínio ($Al(OH)_3$). Estes aditivos são comumente utilizados nos materiais isolantes de base polimérica aplicados em equipamentos e dispositivos elétricos, tais como invólucros de para-raios, cabos cobertos e isolados, isoladores de pino, entre outros (HACKAM, 1999; MACKEVICH e SIMMONS, 1997 e GORUR et al., 1997).

Portanto, foram preparadas seis formulações, variando, basicamente, o tipo de plastificante e sua quantidade, sendo que os percentuais de trióxido de antimônio e hidróxido de alumínio foram mantidos constantes. A Tabela 4.1 apresenta a descrição das formulações utilizadas na etapa de processamento do material polimérico do segundo protótipo de para-raios.

Tabela 4.1 – Descrição das formulações utilizadas no processamento do material polimérico.

	Sb_2O_3 (%)	$Al(OH)_3$ (%)	Plastificante (%)	Tipo Plastificante
Formulação 1	10	20	5	Parafina Clorada
Formulação 2	10	20	10	Parafina Clorada
Formulação 3	10	20	5	Óleo Mamona Comum
Formulação 4	10	20	10	Óleo Mamona Comum
Formulação 5	10	20	5	Óleo Mamona Soprada
Formulação 6	10	20	10	Óleo Mamona Soprada

Desta forma, com as formulações definidas, inicializou-se a etapa de mistura do PEAD com o agente plastificante. Posteriormente, adicionaram-se as cargas minerais e promoveu-se a mistura destas com o PEAD e agente plastificante até que a homogeneização fosse atingida. Vale ressaltar que todo este procedimento foi realizado de forma manual, sem o auxílio de misturadores comumente utilizados na etapa de processamento.

Finalmente, realizada a mistura dos compostos, inicializou-se o efetivo processamento do material polimérico. Para tanto, fez-se o uso de uma extrusora de dupla rosca, marca Extrusão Brasil, razão L/D 26, mostrada na Figura 4.1.



(a) (b)
Figura 4.1 – (a) Extrusora de dupla rosca utilizada para o processamento do material polimérico; (b) Detalhe da saída de material processado. Fonte: INT/MCT.

Durante a etapa de processamento do material polimérico, os seguintes itens foram observados:

- **Mistura não Uniforme:** Como todo o processo de mistura do PEAD ao agente plastificante e às cargas minerais foi realizado de forma manual, observou-se, para a concentração de 5% de plastificante, que o composto final não estava completamente homogeneizado, conforme pode ser observado na Figura 4.2. Nota-se que grande parte dos *pellets* de PEAD não está completamente revestida pelo agente plastificante juntamente com as cargas minerais, formando, portanto, uma mistura não uniforme.

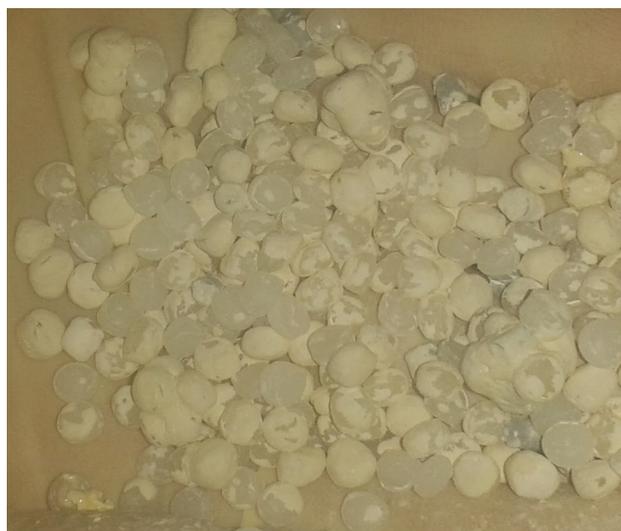


Figura 4.2 – Detalha da mistura de PEAD juntamente com o agente plastificante (concentração de 5% em massa) e as cargas minerais.

- **Aumento da Concentração de Plastificante:** Com o aumento da concentração de plastificante para 10% do valor em massa do PEAD, observou-se que os efeitos de aglomeração dos *pellets* foram acentuados e que houve um aumento da não homogeneidade da mistura, conforme destacado na Figura 4.3.

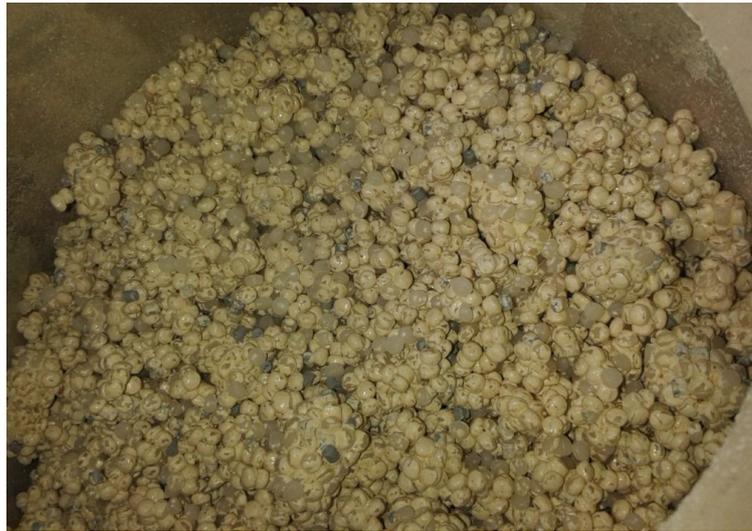


Figura 4.3 – Aumento da não homogeneidade da mistura de PEAD com aditivos plastificantes (concentração de 10% em massa) e cargas minerais.

- **Deslizamento do Material na Extrusora:** Foram observadas várias interrupções no processamento em função do deslizamento do material dentro da extrusora de dupla rosca. Dessa forma, o material se concentrava no alimentador do equipamento, impedindo a continuidade do processo. Esse fato acabou ocorrendo em função da adição do plastificante, que atuava como lubrificante, reduzindo o atrito entre as roscas da extrusora com o material a ser processado.
- **Variação das Temperaturas da Extrusora:** Outro fato observado foi o comportamento térmico das zonas de temperatura controlada da extrusora. Notou-se uma dificuldade do sistema de controle em manter a temperatura das zonas nos valores pré-determinados, acarretando, muitas das vezes, na interrupção do processamento em função da deteriorização do material dentro da extrusora por sobreaquecimento.

Finalizada a etapa de processamento do material polimérico, iniciou-se a construção do segundo protótipo de para-raios de PEAD.

4.2.2 Etapa de Injeção do Segundo Protótipo de Para-raios

Uma vez preparadas as formulações para o segundo protótipo de para-raios, iniciou-se a etapa de manufatura do dispositivo, utilizando os materiais poliméricos plastificados na composição do invólucro do equipamento. Esta etapa de fabricação foi realizada conforme apresentado no item 3.2, sendo produzidas dez unidades de cada formulação, constituindo, portanto, 60 unidades do segundo protótipo de para-raios de PEAD.

Os parâmetros de processamento por injeção, tais como perfil de temperatura do canhão e do molde, velocidade de injeção, pressões de preenchimento de injeção e de recalque, tempo de resiliência e de resfriamento, entre outros foram mantidos conforme os ajustes realizados para o primeiro protótipo de para-raios de PEAD.

Após a injeção dos para-raios, foram observadas algumas pré-falhas nas peças, tais como rugosidade superficial elevada e pequenas trincas na junção das saias com o corpo do para-raios, conforme destacado nas Figura 4.4 e Figura 4.5.



Figura 4.4 – Vista superior da saia do segundo protótipo de para-raios em PEAD, evidenciando a rugosidade superficial.

Outro fator observado após a injeção das peças foi a delaminação em camadas do material polimérico utilizado no segundo protótipo de para-raios de PEAD, para a concentração de 10% de aditivos plastificantes, de acordo com a Figura 4.6.



Figura 4.5 – Detalhe das pequenas trincas observadas entre as junções das saias e do corpo do para-raios.



Figura 4.6 – Delaminação do material polimérico observado para 10% de concentração de aditivo plastificante.

Em função da gravidade das pré-falhas encontradas no segundo protótipo de para-raios com 10% de plastificante, optou-se por realizar os ensaios elétricos apenas nas peças com 5% de aditivos plastificantes.

4.3 Ensaio Elétrico

Os resultados dos ensaios elétricos realizados no primeiro protótipo de para-raios de PEAD indicaram que as maiores solicitações ocorrem nos ensaios de curto-circuito e envelhecimento em névoa salina. Portanto, para o segundo protótipo de para-raios de PEAD, iniciou-se a avaliação do supressor de surto com o ensaio de envelhecimento em névoa salina, conforme descrito a seguir.

4.3.1 Ensaio de Envelhecimento em Névoa Salina

Em função do comportamento do primeiro protótipo de para-raios de PEAD, optou-se por acompanhar, de forma mais rigorosa, o desenvolvimento do ensaio de envelhecimento em névoa salina. Para tanto, a cada intervalo de 100 h, o ensaio foi interrompido para a inspeção visual e térmica dos para-raios, com o objetivo de acompanhar possíveis falhas. Vale ressaltar que a duração de cada interrupção não ultrapassou 10 min, garantindo a menor interferência possível no andamento do ensaio. A corrente de fuga das três unidades ensaiadas também passou a ser monitorada por meio da medição realizada a cada intervalo de 100 h.

Portanto, o segundo protótipo de para-raios de PEAD, nas formulações 1, 3 e 5, foi submetido ao ensaio de envelhecimento em névoa salina, de acordo com os procedimentos indicados no Capítulo 3, item 3.3.2. A concentração de cloreto de sódio em água foi mantida em 5 kg/m^3 , correspondendo a condutividade de $8700 \text{ }\mu\text{S/cm}$.

Com o objetivo de organizar as observações realizadas durante o ensaio de envelhecimento, optou-se por classificar os eventos ocorridos em quatro tipos, a saber:

- **Tipo 1:** Diz respeito à condição normal do para-raios, ou seja, o equipamento se encontra em uma condição semelhante à inicial, conforme exemplificado pela Figura 4.7;
- **Tipo 2:** Refere-se ao acúmulo de partículas de NaCl ao longo do corpo do para-raios, conforme mostrado pela Figura 4.8;
- **Tipo 3:** Diz respeito, além do acúmulo de partículas de NaCl ao longo do corpo do para-raios, a queima das extremidades das saias e ao aumento das trincas do invólucro, de acordo com a Figura 4.9;
- **Tipo 4:** Refere-se à falha completa do para-raios, com a perfuração do invólucro e queima do material polimérico, conforme mostrado pela Figura 4.10.



Figura 4.7 – Exemplo de observações do Tipo 1: Para-raios em condições normais de operação.

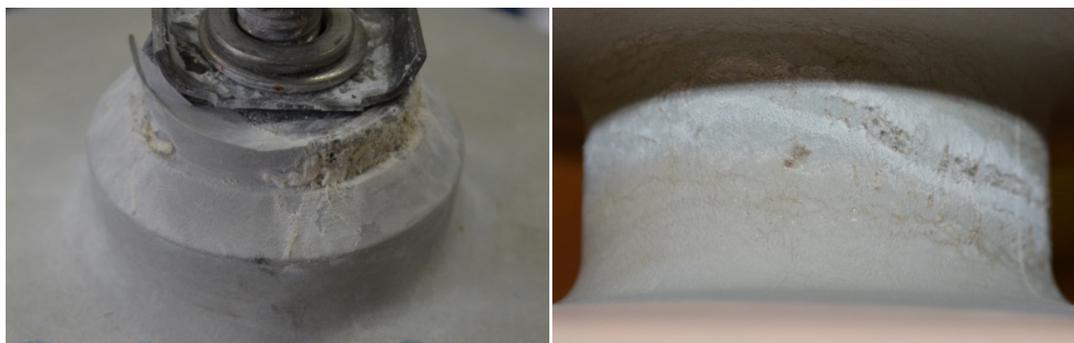


Figura 4.8 – Exemplo de observações do Tipo 2: Acúmulo de partículas de sal ao longo da estrutura do para-raios.



Figura 4.9 – Exemplo de observações do Tipo 3: Aumento das trincas ao longo do corpo do para-raios.

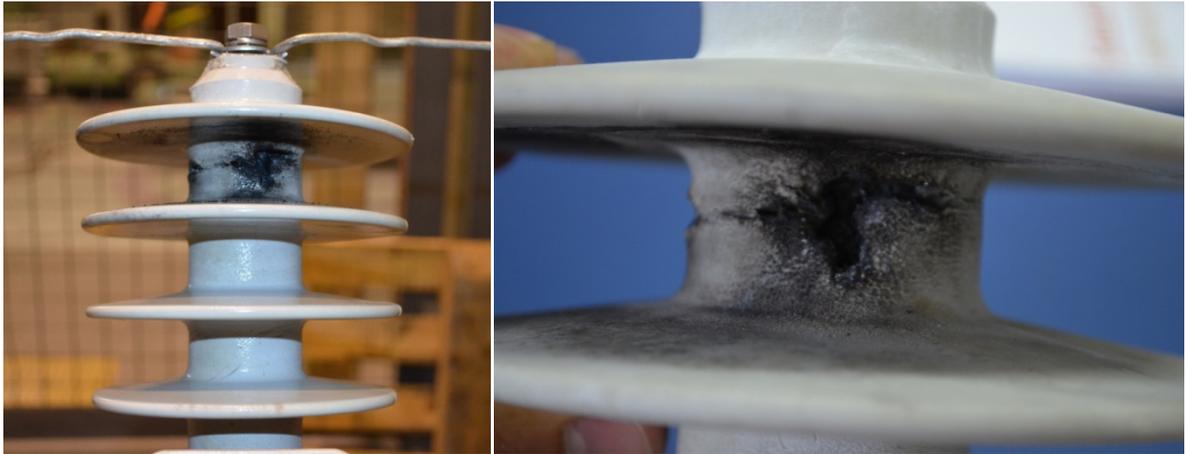


Figura 4.10 – Exemplos de observações do Tipo 4: Falha do para-raios durante o ensaio de envelhecimento.

As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os resumos dos acompanhamentos dos ensaios de envelhecimento realizados no segundo protótipo de para-raios de PEAD para as formulações 1, 3 e 5, respectivamente.

O nível das descargas superficiais foi analisado de forma qualitativa, indicando a frequência das descargas. Foram utilizados três níveis de discretização classificados como baixo, médio e alto. O nível baixo corresponde à ocorrência de até dez descargas por minuto. O nível médio indica a ocorrência entre onze a vinte descargas por minuto e o nível alto corresponde à observação de mais de vinte descargas por minuto. As observações foram realizadas a cada intervalo de 100 h, correspondendo aos valores médios das três unidades de para-raios ensaiadas.

A Figura 4.11 ilustra a ocorrência de descargas superficiais durante o ensaio de envelhecimento em névoa salina.

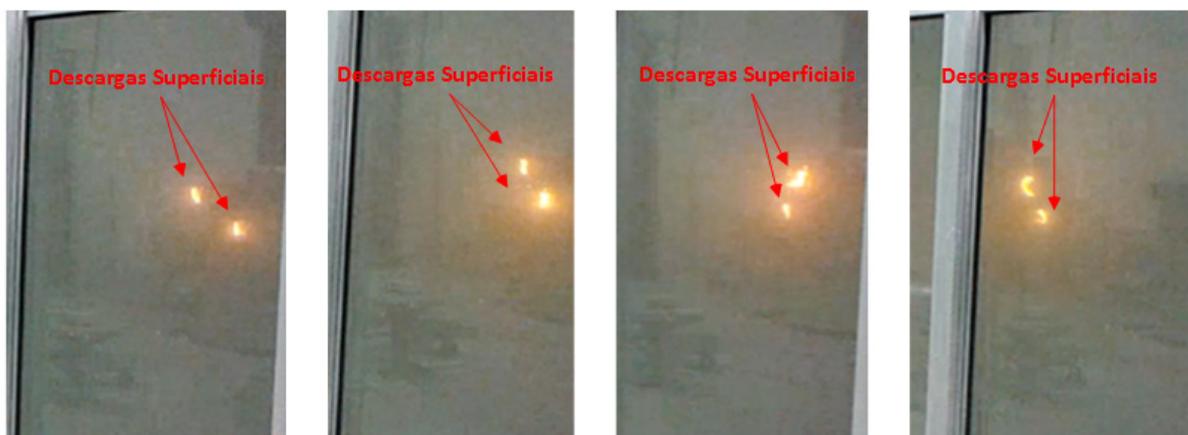


Figura 4.11 – Ilustrações das descargas superficiais observadas durante os ensaios de envelhecimento em névoa salina.

A corrente de fuga foi mensurada no ponto comum de aterramento das três unidades submetidas ao ensaio de envelhecimento. Portanto, refere-se à corrente total dos três para-raios sob ensaio. Os valores das correntes indicadas nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 correspondem aos valores eficazes máximos registrados durante as medições a cada 100 h de ensaio.

Tabela 4.2 – Resumo do acompanhamento do ensaio de envelhecimento realizado no segundo protótipo de para-raios de PEAD – Formulação 1.

Tempo [h]	Nível das Descargas	I_{Fuga} [mA]	T_{Max} [°C]	Tipo das Observações
0	Baixo	4	25	1
100	Baixo	12	35	1
200	Baixo	12	40	1
300	Médio	36	38	2
400	Médio	38	44	3
500	Médio	40	32	3
600	Médio	40	36	3
700	Alto	80	40	3
800	Alto	80	38	3
900	–	–	–	4

Tabela 4.3 – Resumo do acompanhamento do ensaio de envelhecimento realizado no segundo protótipo de para-raios de PEAD – Formulação 3.

Tempo [h]	Nível das Descargas	I_{Fuga} [mA]	T_{Max} [°C]	Tipo das Observações
0	Baixo	4	23	1
100	Baixo	35	35	1
200	Baixo	40	38	1
300	Médio	40	39	2
400	Médio	60	33	2
500	Médio	60	33	2
600	Alto	80	42	3
700	Alto	100	32	3
800	–	–	–	4

Tabela 4.4 – Resumo do acompanhamento do ensaio de envelhecimento realizado no segundo protótipo de para-raios de PEAD – Formulação 5.

Tempo [h]	Nível das Descargas	I_{Fuga} [mA]	T_{Max} [°C]	Tipo das Observações
0	Baixo	4	26	1
100	Baixo	25	33	1
200	Baixo	30	34	2
300	Médio	35	36	3
400	Médio	60	32	3
500	Alto	70	38	3
600	–	–	–	4

Os resultados dos ensaios mostraram, de forma geral, que houve aumento da intensidade das descargas observadas após 300 h de operação, atingindo um nível mais elevado entre 500 h e 700 h de ensaio. Este fato também foi comprovado pela medição da corrente de fuga dos para-raios, que indicou aumento gradual da corrente em função do tempo de ensaio, em concordância com o aumento da intensidade das descargas. A Figura 4.12 apresenta, graficamente, o comportamento da corrente de fuga do segundo protótipo de para-raios durante o ensaio de envelhecimento.

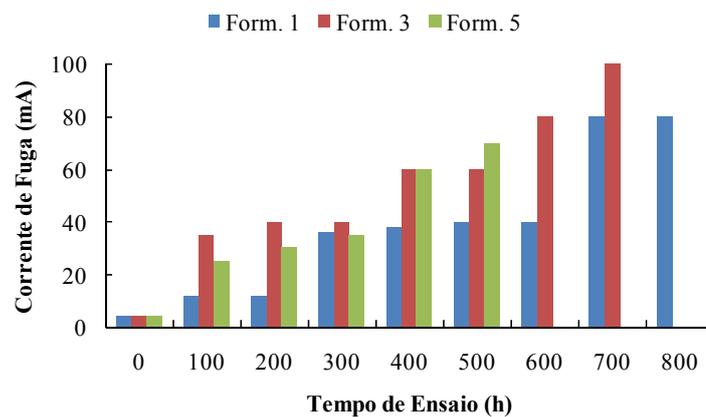


Figura 4.12 – Comportamento da corrente de fuga durante o ensaio de envelhecimento do segundo protótipo de para-raios.

Conforme mostrado pelas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, não foi observada uma evolução crescente da temperatura dos para-raios durante o ensaio de envelhecimento. Sendo assim, não foi possível estabelecer uma correlação direta entre o valor da temperatura máxima e a intensidade das descargas observadas.

A Figura 4.13 apresenta um exemplo de imagem térmica registrada durante o ensaio de envelhecimento. Observa-se que a distribuição de temperatura é não uniforme ao longo da estrutura do para-raios, existindo, portanto, regiões com maiores solicitações térmicas.

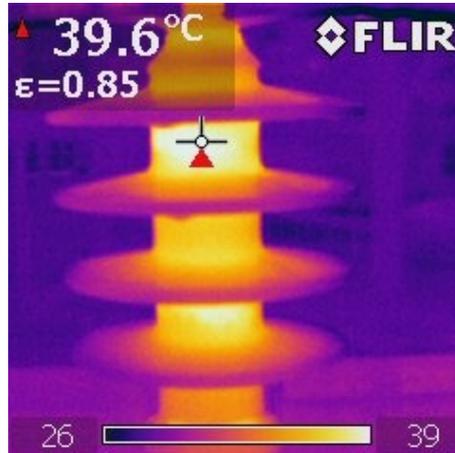


Figura 4.13 – Exemplo de imagem térmica registrada durante o ensaio.

Embora não tenha sido possível correlacionar o aumento da intensidade das descargas com a temperatura, o monitoramento térmico permitiu acompanhar a evolução das regiões mais quentes até a falha do equipamento, conforme pode ser observado pelas Figuras 4.14 e 4.15, registradas durante os ensaios no segundo protótipo de para-raios, formulações 1 e 5, respectivamente.

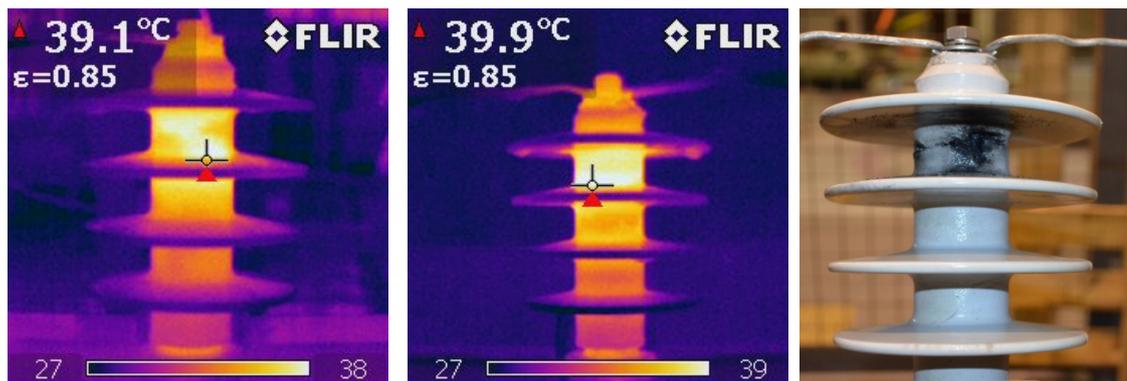


Figura 4.14 – Detecção da região de maior solicitação térmica culminando, posteriormente, na falha do segundo protótipo de para-raios, formulação 1.

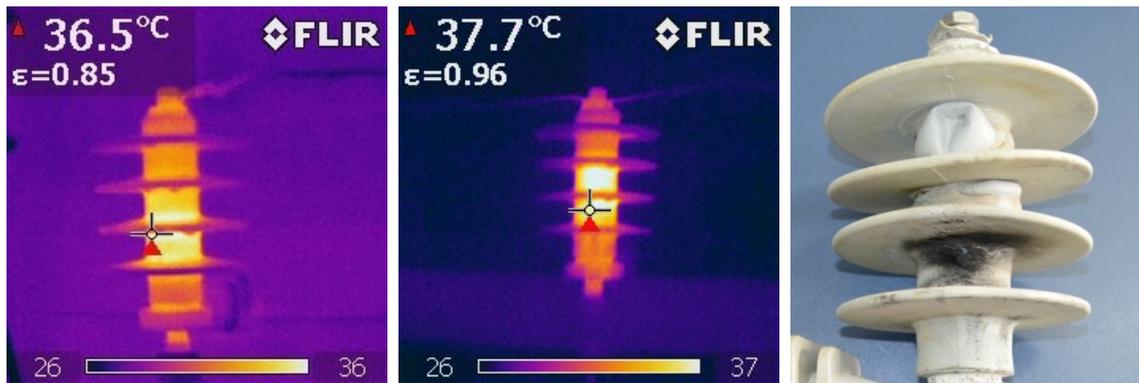


Figura 4.15 – Detecção da região de maior solicitação térmica culminando, posteriormente, na falha do segundo protótipo de para-raios, formulação 5.

As imagens térmicas foram obtidas após a desenergização dos para-raios, não representando, portanto, a temperatura no momento da ocorrência das descargas superficiais. O monitoramento térmico foi realizado segundo este procedimento em função da imprecisão das leituras em ambiente com elevada poluição (MCGEE, 1988).

A Figura 4.16 exibe uma bolha de gás obtida após a falha do segundo protótipo de para-raios – formulação 5. Este fato levou ao questionamento de possíveis pré-falhas durante a injeção dos para-raios, como, por exemplo, presença de umidade, formando pequenas bolhas ao longo do invólucro do equipamento.



Figura 4.16 – Bolha formada após a falha do segundo protótipo de para-raios, formulação 5.

Desta forma, selecionaram-se algumas unidades não ensaiadas para a verificação de possíveis pré-falhas ocorridas durante a injeção do para-raios. Após a inspeção interna das peças, notaram-se a presença de diversas micro-cavidades ao longo do invólucro, conforme exibido na Figura 4.17.



Figura 4.17 – Detalhe das micro-cavidades existentes ao longo do invólucro do segundo protótipo de para-raios.

Os resultados obtidos para o ensaio de envelhecimento em névoa salina levaram às seguintes conclusões:

- As condições não ideais de processamento do material polimérico, tais como mistura manual do PEAD com os aditivos plastificantes e cargas minerais, causando não uniformidade e aglomeração do composto final; deslizamento de material na extrusora; dificuldade de controle de temperatura durante o processamento, entre outras podem ter afetado toda a cadeia de produção dos para-raios e, conseqüentemente, influenciado nos resultados dos ensaios realizados.
- As pré-falhas encontradas após a injeção do segundo protótipo de para-raios, tais como rugosidade superficial acentuada, pequenas trincas abaixo das saias, formação de bolhas de gás ao longo do corpo do invólucro, entre outras podem ter influência significativa nos resultados dos ensaios realizados.
- Sabe-se que quanto mais rugosa for à superfície isolante, maior será o seu acúmulo de poluição, contribuindo, assim, para o aumento da corrente de fuga, formação de bandas secas e úmidas, diminuição da hidrofobicidade, entre outros fatores.
- As pequenas trincas observadas abaixo das saias dos para-raios podem estar relacionadas aos esforços mecânicos gerados durante o processo de injeção das peças, criando, assim, tensões mecânicas residuais ao longo do invólucro do segundo protótipo de para-raios de PEAD.

- A combinação das pré-falhas de processamento e injeção dos para-raios somada às condições severas de ensaio levou o segundo protótipo de para-raios à condição de reprovação no ensaio de envelhecimento em névoa salina.

Portanto, o segundo protótipo de para-raios com invólucro de PEAD foi considerado reprovado no ensaio de envelhecimento em névoa salina.

4.4 Considerações Finais

Os resultados do ensaio de envelhecimento em névoa salina mostraram que o segundo protótipo de para-raios de PEAD foi considerado reprovado nos testes realizados. Desta forma, nota-se que as tentativas de melhoramento do material polimérico não resultaram no desempenho desejado, principalmente devido às falhas no processamento e injeção dos para-raios.

Capítulo 5

Ensaaios Elétricos e Análise do Desempenho do Terceiro Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD

5.1 Considerações Iniciais

Os resultados dos ensaios de curto-circuito realizados no primeiro protótipo de para-raios de PEAD foram considerados insatisfatórios, em função da projeção e ignição de partes poliméricas. Falhas prematuras foram observadas nos ensaios de envelhecimento realizados no primeiro e no segundo protótipo de para-raios. A tentativa de plastificar o polímero base, apresentada no desenvolvimento do segundo protótipo, não produziu os resultados esperados.

Sendo assim, optou-se por substituir o polietileno de alta densidade, até então utilizado, por um PEAD plastificado, constituindo, portanto, o terceiro protótipo de para-raios. Os ensaios elétricos e as análises dos resultados obtidos são mostrados nos itens subsequentes.

5.2 Construção e Ajustes no Terceiro Protótipo de Para-raios com Invólucro de PEAD

Em função dos resultados obtidos nos ensaios de curto-circuito e envelhecimento em névoa salina, realizados no primeiro e segundo protótipos de para-raios de PEAD, observou-se a necessidade de realizar alterações no polímero base, por meio de aditivos plastificantes.

A plastificação do polímero base através da mistura de óleos vegetais ou parafina clorada não foi considerada satisfatória, uma vez que o segundo protótipo de para-raios foi reprovado nos ensaios elétricos realizados. No entanto, foram observadas diversas falhas durante as etapas de processamento do material polimérico e injeção dos para-raios, tais como: mistura não uniforme devido ao processo manual de homogeneização; deslizamento de material na extrusora; variações de temperatura ao longo do canhão da extrusora; rugosidade superficial elevada das peças injetadas; pequenas trincas ao longo das saias dos para-raios e delaminação em camadas do invólucro dos supressores de surtos.

Observa-se que a maior parte das falhas relatadas durante o desenvolvimento do segundo protótipo de para-raios ocorreu durante a tentativa de plastificação do PEAD e, posteriormente, refletindo na etapa de injeção das peças. Em função das falhas observadas e levando em consideração as dificuldades encontradas na etapa de processamento do material polimérico, optou-se por adquirir um PEAD plastificado, contendo os aditivos anti-chama e

protetores UV, sem a necessidade de realizar quaisquer modificações na matéria prima antes do processo de injeção propriamente dito.

Desta forma, foi realizada uma triagem em contratipos de PEAD a fim de obter um material com propriedades mais adequadas à aplicação como invólucro de para-raios, principalmente no que tange ao índice de cristalinidade do material. Após a seleção preliminar, optou-se por utilizar o PEAD plastificado fornecido pela Dow Co. Dois ensaios foram utilizados para esta escolha, a saber: calorimetria exploratória diferencial (DSC), com o objetivo de determinar o índice de cristalinidade e ensaio mecânico de tração, objetivando obter o comportamento elástico do material.

No ensaio de DSC, foram medidas as temperaturas de cristalização e fusão, bem como calculadas as entalpias de fusão e cristalização experimentais. Foi utilizado o equipamento DSC 2910, TA *Instruments* com acessório LNCA (*Liquid Nitrogen Cooling Accessory*), em atmosfera de argônio com o seguinte programa de aquecimento: pré-aquecimento de 25 °C a 225 °C a uma taxa de 10 °C/min, permanecendo constante a temperatura por 10 min, sendo posteriormente resfriado até -110 °C, à taxa de 10 °C/min e por último, aquecimento até 225 °C sob a mesma taxa de aquecimento.

O índice de cristalinidade pode ser obtido pela razão entre as entalpias de fusão experimental e a entalpia de fusão para o polímero 100% cristalino, de acordo com a equação (5.1).

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f^{obs}}{\Delta H_f^o} \quad (5.1)$$

Sendo $X_c (\%)$ o índice de cristalinidade do polímero; ΔH_f^{obs} a entalpia de fusão experimental do PEAD e ΔH_f^o a entalpia de fusão para o polímero 100% cristalino. Foi utilizado o valor de 290 J/g para a entalpia de fusão para o PEAD 100% cristalino, de acordo com (BRANDRUP et al., 2003).

Os resultados comparativos dos ensaios de DSC para as amostras de PEAD e PEAD plastificado são mostrados na Tabela 5.1. Nota-se que o índice de cristalinidade do PEAD plastificado foi reduzido em torno de 27% em comparação ao PEAD não plastificado.

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio DSC para as amostras de PEAD e PEAD plastificado.

	PEAD	PEAD Plastificado
Início da Temperatura de Fusão (°C)	124,2	118,3
Término da Temperatura de Fusão (°C)	136,0	128,0
Temperatura de Fusão – Pico (°C)	131,4	125,2
Entalpia de Fusão (J/g)	181,6	133,3
Índice de Cristalinidade (%)	62,6	46,0

Os ensaios de tração mecânica foram realizados, a temperatura de 25 °C, através do equipamento da marca INSTRON, modelo 4204, com taxa de deformação constante e ajustada em 5 mm/min, de acordo com (ASTM D882-09, 2009). Foram ensaiados cinco corpos-de-prova de cada tipo de material (PEAD e PEAD plastificado). Os resultados dos ensaios realizados se encontram na Tabela 5.2. Como esperado, a adição de plastificante causou a redução do módulo de Young e resistência a tração e aumentou significativamente a deformação na ruptura. Nota-se que o valor da deformação da ruptura aumentou em torno de 76 vezes comparando o PEAD plastificado com o PEAD não plastificado.

Tabela 5.2 – Resistência a tração, deformação na ruptura e módulo de Young para o PEAD e PEAD plastificado.

	Resistência a Tração (MPa)	Deformação na Ruptura (%)	Módulo (MPa)
PEAD	29,7±1,1	8,8±3,8	1435±312
PEAD Plastificado	24,2±1,0	680,0±112,6	891±98

A ação do plastificante pode ser explicada através da diminuição da atração intermolecular e enfraquecimento das interações polímero-polímero, fazendo com que haja um aumento da mobilidade das cadeias poliméricas (CRAVER e CARRAHER, 2000). A redução nas forças intermoleculares ao longo das cadeias de PEAD previne a formação de redes rígidas, aumentando a flexibilidade, a maciez e a alongação do PEAD plastificado.

Assim, pode-se afirmar que a adição de agentes plastificantes tem influência direta no índice de cristalinidade do material e nas propriedades mecânicas analisadas, conforme os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 5.1 e Tabela 5.2.

Portanto, para a fabricação do terceiro protótipo de para-raios de PEAD, utilizou-se o PEAD plastificado fornecido pela Dow Co. Vale ressaltar que o projeto do para-raios, tais

como a estrutura da parte ativa, as características dos varistores utilizados, a estrutura das saias, as distâncias de escoamento e de arco entre outras permaneceram idênticas ao primeiro e segundo protótipos, conforme descrito no item 3.2. Após o processo de injeção, que teve seus parâmetros reajustados de acordo com as propriedades do polietileno plastificado, foram obtidas as primeiras peças do terceiro protótipo de para-raios de PEAD, conforme pode ser visualizado através da Figura 5.1.

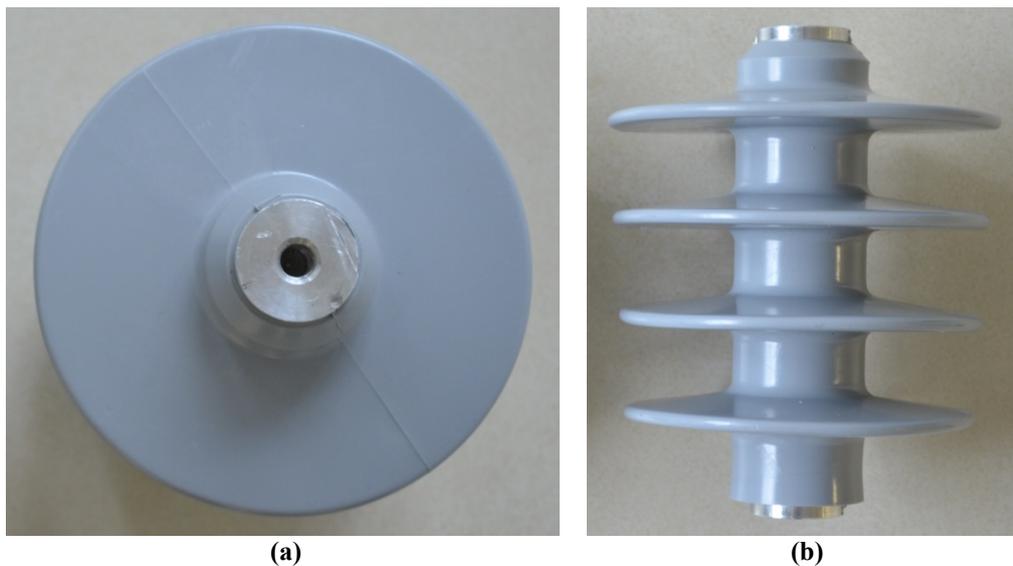


Figura 5.1 – Terceiro protótipo de para-raios de PEAD: (a) vista superior; (b) vista frontal.

Observou-se que a superfície do invólucro do terceiro protótipo de para-raios não apresentava elevada rugosidade superficial. Da mesma forma, não foram evidenciadas as pequenas trincas observadas no segundo protótipo de para-raios.

Nos itens a seguir, são apresentados os ensaios elétricos realizados no terceiro protótipo de para-raios e os resultados obtidos.

5.3 Ensaio Elétrico

Conforme observado para o primeiro protótipo de para-raios, os dois tipos de ensaios elétricos mais críticos, do ponto de vista do invólucro, são os ensaios de curto-circuito e envelhecimento em névoa salina. Portanto, estes foram os primeiros ensaios realizados no terceiro protótipo de para-raios. Adicionalmente, foram realizados os ensaios de ciclo de operação e imersão em água, conforme descritos nos itens a seguir.

5.3.1 Ensaio de Envelhecimento em Névoa Salina

O ensaio de envelhecimento em névoa salina foi realizado de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 3, item 3.3.2. Adicionalmente, e com o objetivo de acompanhar o ensaio de forma mais rigorosa, foram adotados também os procedimentos descritos no Capítulo 4, item 4.3.1, tais como classificação dos eventos em tipos; observação das intensidades das descargas; medição da corrente de fuga e monitoramento térmico dos para-raios durante o ensaio. A concentração de cloreto de sódio em água foi mantida em 5 kg/m^3 , correspondendo a condutividade de $8700 \text{ }\mu\text{S/cm}$.

A Tabela 5.3 apresenta o resumo do acompanhamento do ensaio de envelhecimento realizado no terceiro protótipo de para-raios de PEAD.

Tabela 5.3 – Resumo do acompanhamento do ensaio de envelhecimento realizado no terceiro protótipo de para-raios de PEAD.

Tempo [h]	Nível das Descargas	I_{Fuga} [mA]	T_{Max} [°C]	Tipo das Observações
0	Baixo	2	26	1
100	Baixo	2	30	1
200	Baixo	3	33	1
300	Baixo	3	32	1
400	Baixo	3	34	1
500	Baixo	4	31	1
600	Baixo	8	34	1
700	Baixo	11	35	1
800	Baixo	12	36	2
900	Médio	12	35	2
1000	Médio	12	32	2

Os resultados dos ensaios mostraram, de forma geral, que houve um aumento da intensidade das descargas observadas após 800 h de ensaio. Este fato também foi novamente comprovado pela corrente de fuga dos para-raios, que apresentou aumento gradual em função do tempo de ensaio, em concordância com o aumento da intensidade das descargas.

A Figura 5.2 exibe o comportamento da corrente de fuga do terceiro protótipo de para-raios em função do tempo de ensaio. Nota-se que houve um aumento mais acentuado da corrente entre 500 h e 700 h, alcançando um patamar estável após 800 h de ensaio.

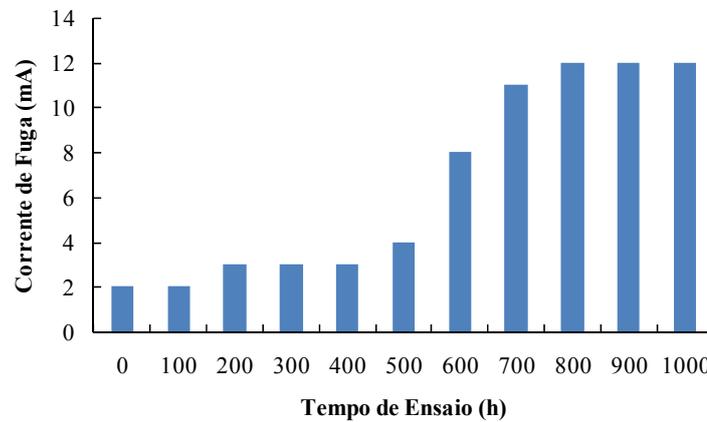


Figura 5.2 – Comportamento da corrente de fuga do terceiro protótipo de para-raios em função do tempo de ensaio.

Conforme mostrado pela Tabela 5.3, não foi observada uma evolução crescente da temperatura dos para-raios durante o ensaio de envelhecimento. Sendo assim, não foi possível estabelecer uma correlação direta entre o valor da temperatura máxima e a intensidade das descargas observadas.

Nota-se também, por meio da Tabela 5.3, que a corrente de fuga do terceiro protótipo de para-raios permaneceu em um patamar relativamente baixo comparada com as correntes de fuga medidas durante o ensaio do segundo protótipo de para-raios (Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4). A Figura 5.3 apresenta a comparação gráfica do comportamento das correntes de fuga do segundo e terceiro protótipo de para-raios.

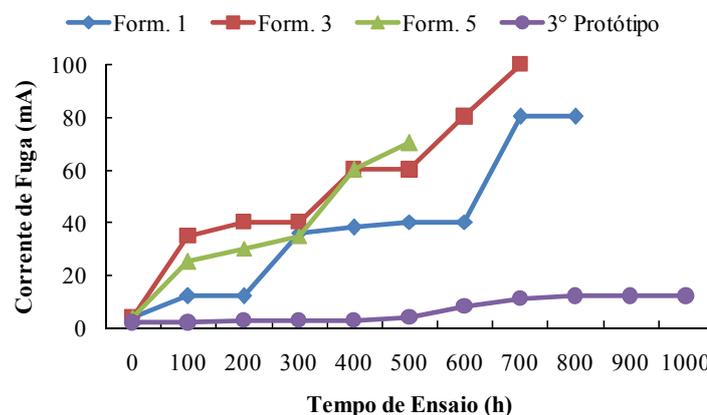


Figura 5.3 – Comparação da corrente de fuga do segundo e terceiro protótipo de para-raios de PEAD.

Conforme resultados obtidos no trabalho de CHAUDHRY et al. (1991), os valores de pico da corrente de fuga de para-raios de EPDM, submetidos ao ensaio de envelhecimento em névoa salina, variam de 15 mA a 20 mA e 80 mA a 100 mA, para a

condutividade da água ajustada em 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 16000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Destaca-se que os valores de corrente apresentados no trabalho de CHAUDHRY et al. (1991) corresponderam as medições individuais em cada para-raios de tensão nominal de 9 kV.

As medições realizadas no trabalho de KESTER et al. (1998) indicaram valores de pico da corrente de fuga da ordem de 500 mA a 600 mA em para-raios de EPDM/SiR, e valores de pico de até 200 mA em para-raios de SiR, ambos com tensões de 20 kV.

Portanto, comparando-se os resultados deste trabalho com os da literatura, nota-se que os valores da corrente de fuga do terceiro protótipo de para-raios de PEAD foram condizentes com os resultados obtidos nos para-raios de EPDM, EPDM/SiR e SiR. Adicionalmente, sem levar em consideração as diferenças nas metodologias de ensaio e medição de corrente, o terceiro protótipo de para-raios de PEAD aparentemente indicou níveis de corrente de fuga inferiores aos invólucros poliméricos atuais.

Após a finalização do ensaio de envelhecimento em névoa salina, observou-se um aumento da rugosidade superficial do invólucro dos para-raios, especialmente nas regiões entre as saias. Adicionalmente, foi observado o acúmulo de partículas de sal, principalmente ao longo das regiões mais rugosas do para-raios.

A Figura 5.4 (a) e (b) apresenta a superfície entre as saias dos para-raios antes e após o ensaio de envelhecimento, respectivamente. Nota-se, por meio da Figura 5.4 (b), que houve um acréscimo considerável da rugosidade superficial do invólucro, bem como acúmulo das partículas de sal nas regiões mais rugosas.

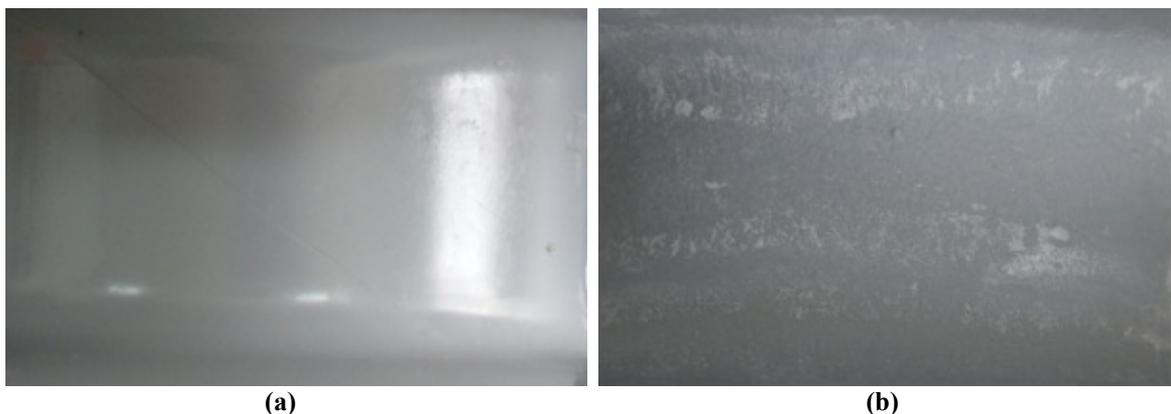


Figura 5.4 – Detalhe da região entre as saias dos para-raios: (a) para-raios antes do ensaio; (b) para-raios após o ensaio.

Embora evidenciadas as pequenas modificações superficiais no invólucro dos para-raios, nenhuma evidência de erosão, trilhamento, perfuração ou qualquer outra degradação severa foi observada nas peças ensaiadas do terceiro protótipo de para-raios. Portanto, o

terceiro protótipo de para-raios de PEAD foi considerado aprovado no ensaio de envelhecimento em névoa salina.

5.3.2 Ensaio de Curto-circuito

Os ensaios de curto-circuito foram realizados no terceiro protótipo de para-raios, de tensão nominal de 15 kV, corrente nominal de 5 kA. Os para-raios foram submetidos a quatro condições de curto-circuito, conforme mostrado na Tabela 5.4. Os supressores de surtos foram instalados em um suporte isolante localizado no centro de uma estrutura de madeira de 1,8 x 1,8 m com 0,4 m de altura, conforme mostrado na Figura 5.5.

Tabela 5.4 – Valores padronizados para o ensaio de curto-circuito de acordo com a norma (IEC 60099-4, 2009).

	Valor Eficaz da Corrente de Curto (kA)	Duração do Ensaio (ms)
1º Aplicação	16,0	200
2º Aplicação	6,0	200
3º Aplicação	3,0	200
4º Aplicação	0,60	1000



Figura 5.5 – Detalhe do ensaio de curto-circuito. Fonte: VEIKI-VNL.

A Tabela 5.5 apresenta as medições realizadas durante os ensaios de curto-circuito para o terceiro protótipo de para-raios. Vale ressaltar que os experimentos foram realizados no VEIKI-VNL *Electrical Large Laboratories Ltda*, localizado em Budapeste, Hungria, em função da sua disponibilidade para ensaio.

Tabela 5.5 – Medições realizadas durante os ensaios de curto-circuito. Fonte: VEIKI-VNL.

	1º Pico de Corrente (kA)	Valor Eficaz da Corrente (kA)	Potência do Arco Elétrico (kW)	Energia do Arco Elétrico (kJ)	Duração do Ensaio (ms)
1º Ensaio (16 kA, 200 ms)	26,1	16,57	24522	5173	210,5
2º Ensaio (6 kA, 200 ms)	10,5	6,48	11756	2366	201,3
3º Ensaio (3 kA, 200 ms)	5,47	3,38	4239	854	201,5
4º Ensaio (600 A, 1 s)	1,56	0,63	876	876	1003,3

As Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam os para-raios antes e após os ensaios de curto-circuito, para as aplicações de 16 kA, 6 kA e 3 kA, com duração de 200 ms e 600 A com duração de 1 s, respectivamente.

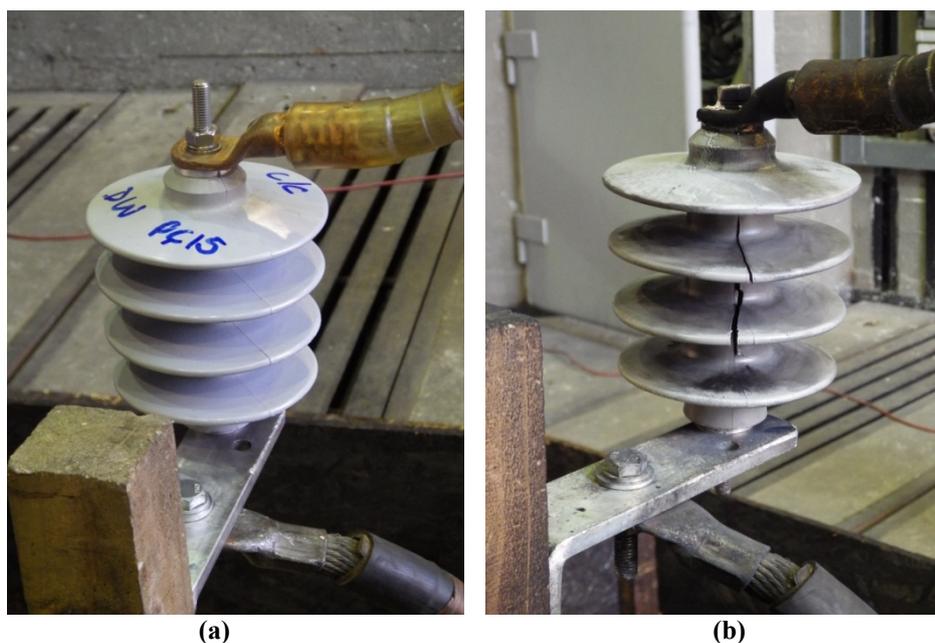


Figura 5.6 – Detalhe do para-raios: (a) antes e (b) após o ensaio de curto-circuito de 16 kA, 200 ms. Fonte: VEIKI-VNL.

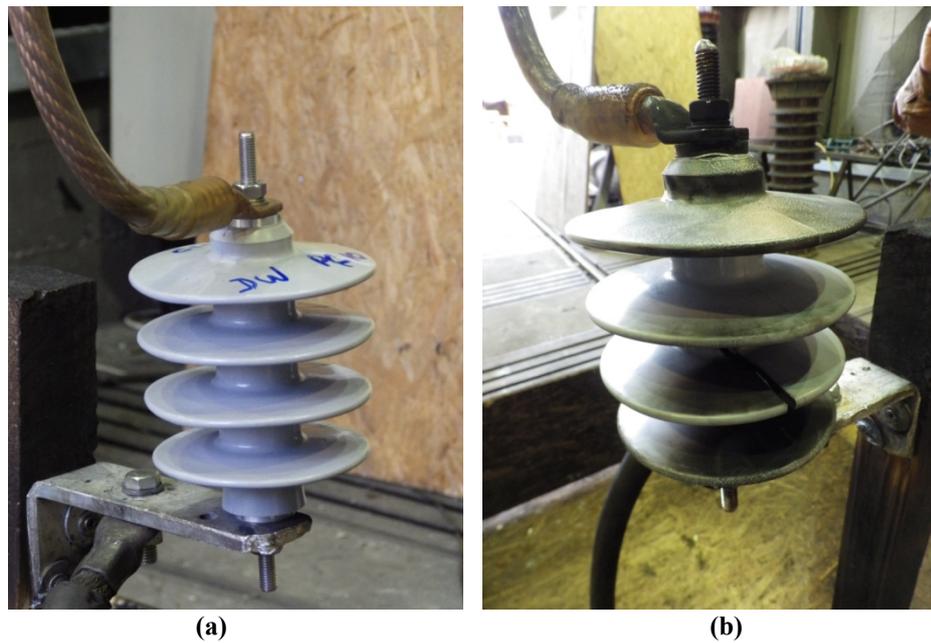


Figura 5.7 – Detalhe do para-raios: (a) antes e (b) após o ensaio de curto-circuito de 6 kA, 200 ms.
Fonte: VEIKI-VNL.

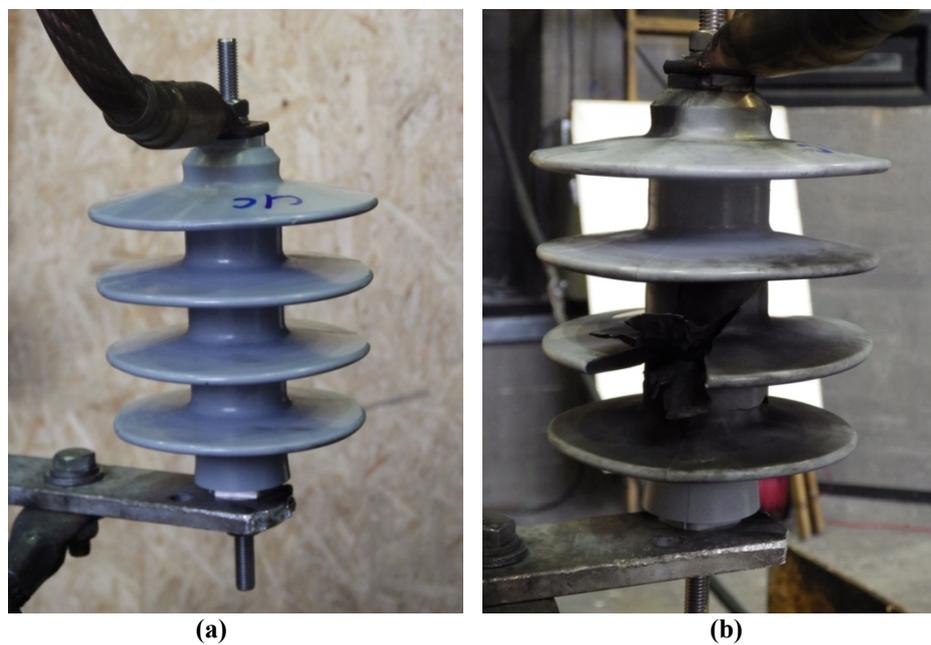


Figura 5.8 – Detalhe do para-raios: (a) antes e (b) após o ensaio de curto-circuito de 3 kA, 200 ms.
Fonte: VEIKI-VNL.

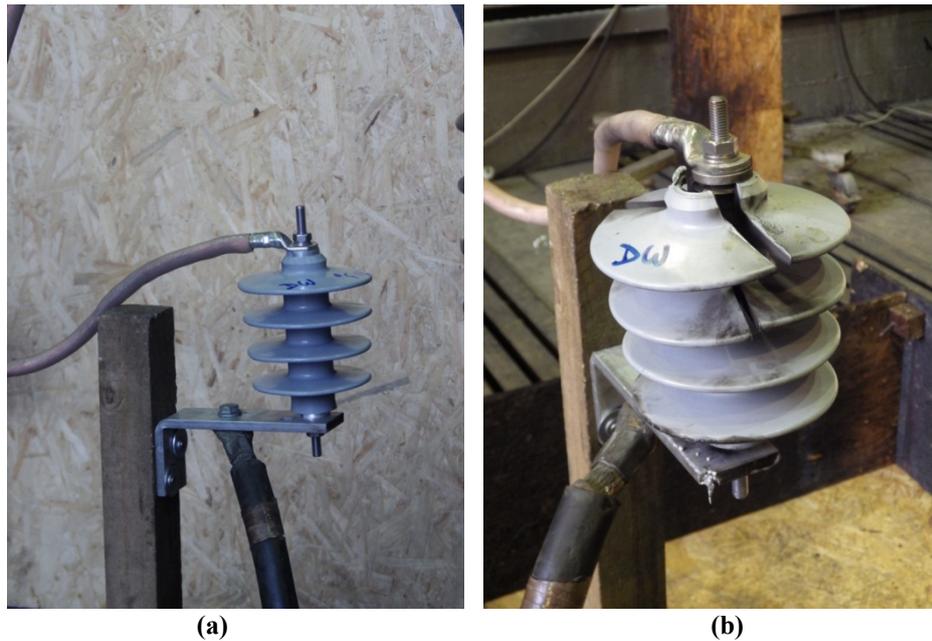


Figura 5.9 – Detalhe do para-raios: (a) antes e (b) após o ensaio de curto-circuito de 600 A, 1 s. Fonte: VEIKI-VNL.

Nota-se, para todos os casos, que o invólucro rompeu-se durante o ensaio, permitindo que o arco elétrico se desenvolvesse na parte externa do para-raios.

Observa-se, através da Figura 5.8 (b), que parte da saia do invólucro do para-raios se desprendeu da estrutura do equipamento. No entanto, por meio da análise após o ensaio, verificou-se que a parte da saia despreendida foi fragmentada em pedaços menores que 60 g cada, sendo que a maioria ficou confinada na área de 1,8 m² ao redor do para-raios.

A Figura 5.10 apresenta a imagem obtida do para-raios durante o ensaio de curto-circuito de 16 kA, 200 ms. Pode-se observar que o arco elétrico, após romper o invólucro, se desenvolve na parte externa do para-raios.

Após os ensaios de curto-circuito, não foram observadas fragmentações violentas do invólucro de PEAD, bloco de varistores ou qualquer outro componente do para-raios, sendo que o invólucro foi capaz de auto-extinguir as chamas, quando existentes, em poucos segundos. Após todo o procedimento de ensaio, os para-raios se mantiveram conectados ao circuito. Portanto, pode-se considerar que o terceiro protótipo de para-raios de PEAD foi aprovado nos ensaios de curto-circuito, de acordo com os critérios apresentados na norma (IEC 60099-4, 2009).



Figura 5.10 – Detalhe do arco elétrico formado durante o ensaio de curto-circuito de 16 kA, 200 ms.
Fonte: VEIKI-VNL.

5.3.3 Ensaio de Ciclo de Operação

O ensaio de ciclo de operação tem por objetivo avaliar as condições de serviço dos para-raios, com base na aplicação de determinado número de impulsos de corrente, seguida da energização do equipamento. O principal requerimento para que o para-raios seja considerado aprovado neste tipo de ensaio é a não ocorrência do fenômeno denominado *Thermal Runaway*, ocasionado pela elevação da temperatura do dispositivo acima do seu limite de estabilidade térmica.

O ensaio de ciclo de operação pode ser subdividido em quatro etapas, a saber:

- **Medição da tensão residual:** Medição da tensão residual do para-raios quando o equipamento é submetido a sua corrente de descarga nominal, no formato 8/20 μ s.
- **Condicionamento:** Aplicação de 20 impulsos de corrente, com o valor de pico igual ao valor da corrente de descarga nominal do para-raios, no formato 8/20 μ s. As aplicações são subdivididas em quatro grupos, sendo que cada grupo é composto por 5 impulsos de corrente. O intervalo de tempo entre as aplicações sucessivas dos impulsos é de 1 minuto, sendo que o para-raios se mantém energizado, durante estes intervalos, com tensão igual a 120% da tensão de

operação contínua (U_C) do equipamento. Já o intervalo de tempo para a aplicação entre grupos é de 30 minutos.

- **Aplicação dos impulsos de alta corrente:** Aplicação de 02 impulsos de alta corrente, no valor da corrente máxima suportável, no formato 4/10 μ s, seguidos da aplicação da tensão nominal e tensão de operação contínua, ambas em 60 Hz. O segundo impulso de corrente deve ser aplicado após o aquecimento em estufa do para-raios à temperatura de 60 °C a pressão atmosférica. A aplicação de tensão nominal (U_N) deve ser feita imediatamente após o segundo impulso e mantida durante 10 segundos. Após os 10 segundos de aplicação de tensão nominal, o valor é reduzido para tensão de operação contínua e mantido durante 30 minutos.
- **Avaliação:** Medição da tensão residual do para-raios quando o equipamento é submetido a sua corrente de descarga nominal, no formato 8/20 μ s e inspeção visual das amostras ensaiadas.

A Figura 5.11 apresenta o esquemático do ensaio de ciclo de operação realizado no terceiro protótipo de para-raios de PEAD.

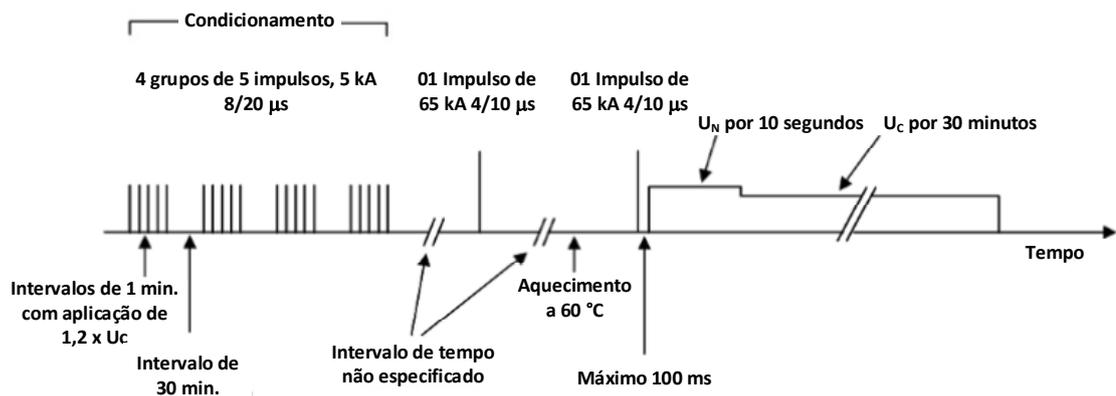


Figura 5.11 – Esquemático do ensaio de ciclo de operação. Adaptada do trabalho de HIRINCHSEN (2011).

Para a realização do ensaio de ciclo de operação, foi utilizado o gerador de impulso de corrente do Laboratório de Alta Tensão da UNIFEI, que é composto por 12 estágios, com tensão de carga máxima de 90 kV, conforme mostrado na Figura 5.12. O ajuste das formas de onda de corrente é feito por meio da alteração do número de estágios ou acréscimo de

indutâncias em série com a carga. A corrente nominal do gerador é de 100 kA, no formato 4/10 μ s.

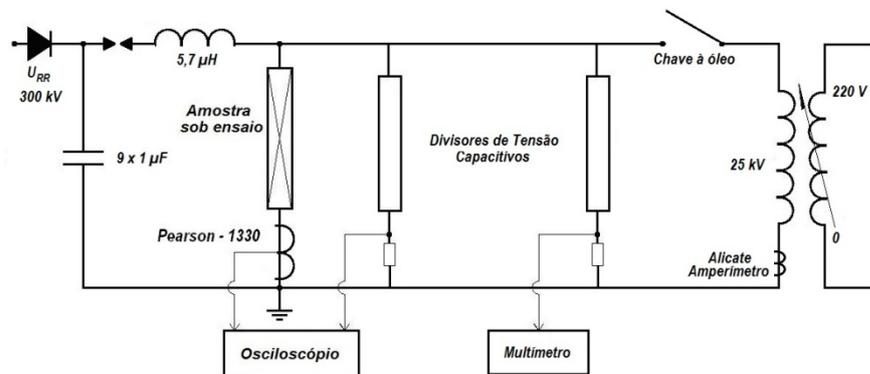


Figura 5.12 – Ilustração do diagrama elétrico do circuito de ensaio de ciclo de operação.

Durante os ensaios, foram utilizados 9 estágios, em um total de $9 \mu F$ de capacitância, gerando a corrente de formato 4/10 μ s. Para a onda no formato 8/20 μ s, é acrescentado no circuito um indutor de 5,7 μ H.

Para aplicação de tensão em frequência industrial, foi utilizado um transformador monofásico de 10 kVA, 25 kV. O transformador é alimentado por um autotransformador de 5 kVA, com tensão de entrada de 220 V e de saída de 0 a 240 V, conectado a carga através de uma chave a óleo classe de tensão 15 kV, com acionamento automático.

O aquecimento do para-raios foi realizado em estufa com temperatura controlada. A temperatura do para-raios foi mensurada por meio de um termopar posicionado em contato direto com o invólucro do equipamento. O para-raios foi mantido na estufa até que a estabilidade térmica fosse alcançada.

Para a realização do ensaio de ciclo de operação, foram utilizadas quatro unidades do terceiro protótipo de para-raios de PEAD, sendo uma unidade utilizada especificamente para a calibração do circuito de ensaio. Os para-raios ensaiados tinham as seguintes características: tensão nominal de 10 kV; máxima tensão de operação contínua de 7,5 kV; corrente de descarga nominal no formato 8/20 μ s de 5 kA; corrente máxima suportável no formato 4/10 μ s de 65 kA.

A Figura 5.13 e a Figura 5.14 apresentam as formas de impulso de corrente de 5 kA, formato 8/20 μ s e 65 kA, formato 4/10 μ s, respectivamente, que foram obtidas durante a calibração do sistema de ensaio.

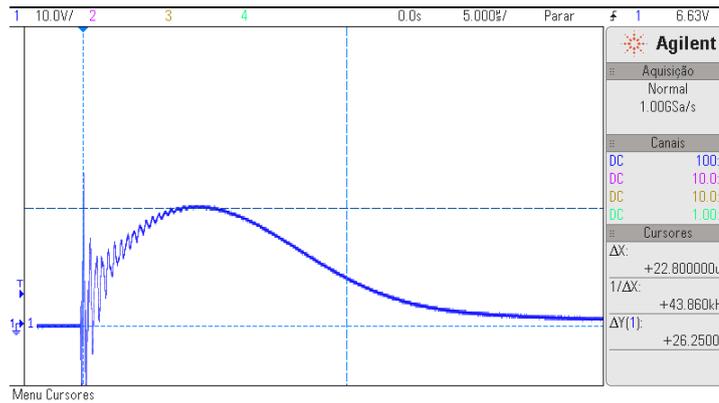


Figura 5.13 – Impulso de corrente de 5 kA, formato 8/20 µs. Valor de pico da corrente de 5,25 kA, tempo de frente de 7,63 µs, tempo de cauda de 21,2 µs.

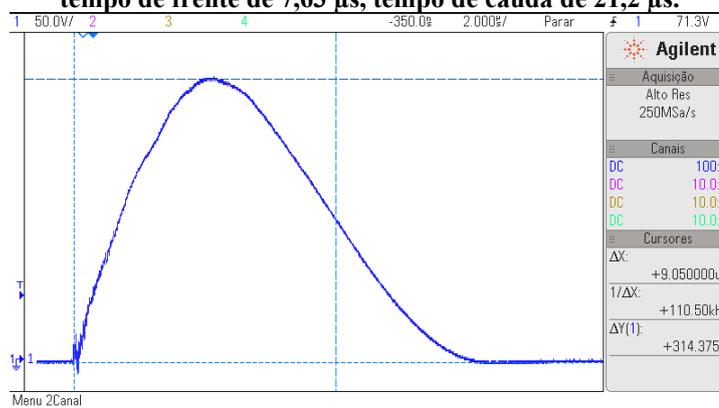


Figura 5.14 – Impulso de corrente de 65 kA, formato 4/10 µs. Valor de pico da corrente de 62,9 kA, tempo de frente de 3,88 µs, tempo de cauda de 9 µs.

Posteriormente, foi realizada a primeira etapa do ensaio, constituindo as medições iniciais das tensões residuais das três unidades ensaiadas, conforme resultados apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Tensão residual dos para-raios antes do ensaio de ciclo de operação.

	Valor de Pico da Corrente (kA)	Valor de Pico da Tensão Residual (kV)
Unidade 01	5,3	28,2
Unidade 02	4,8	27,9
Unidade 03	5,1	27,7

Na sequência, realizou-se a etapa de condicionamento dos para-raios, aplicando, portanto, 20 impulsos de corrente de 5 kA, no formato 8/20 µs. Posteriormente, aplicou-se o primeiro impulso de alta corrente de 65 kA, formato 4/10 µs, conforme pode ser visualizado através da Figura 5.15.

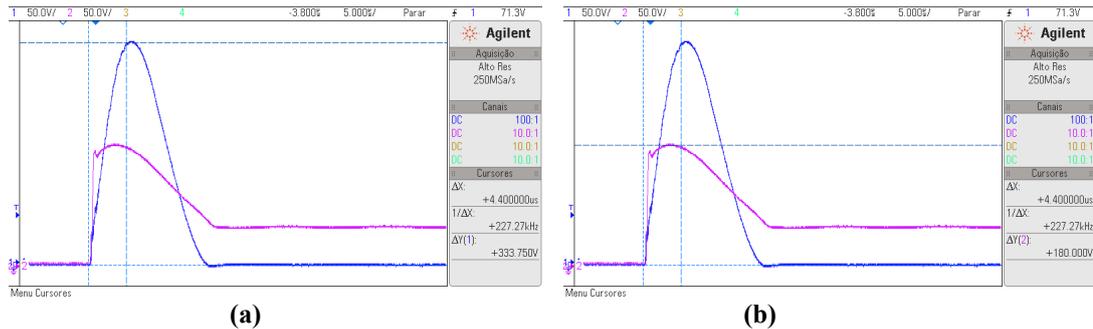


Figura 5.15 – Impulso de alta corrente: (a) Medição da corrente de pico de 66,7 kA e (b) medição da tensão residual de 45,9 kV.

Depois da aplicação do primeiro impulso de alta corrente, os para-raios foram aquecidos a temperatura de 60 °C durante uma hora. Após a temperatura atingir o estado de regime permanente, as unidades dos para-raios foram novamente submetidas à aplicação do impulso de alta corrente, seguida da aplicação da tensão nominal de 10 kV por 10 segundos e, posteriormente, reduzida para a máxima tensão de operação contínua (7,5 kV), permanecendo aplicada ao para-raios durante 30 minutos.

Por fim, foram repetidas as medições de tensão residual nas unidades ensaiadas, sendo os valores obtidos mostrados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Tensão residual dos para-raios após o ensaio de ciclo de operação.

	Valor de Pico da Corrente (kA)	Valor de Pico da Tensão Residual (kV)
Unidade 01	5,4	29,0
Unidade 02	4,7	28,7
Unidade 03	5,2	28,8

Realizando-se a comparação das tensões residuais obtidas antes e após o ensaio de ciclo de operação (Tabela 5.6 e Tabela 5.7, respectivamente), obteve-se o seguinte resultado apresentado na Tabela 5.8. Observa-se que a máxima diferença do valor da tensão residual foi de 4,0% e que a máxima diferença do valor da corrente de pico foi de -2,1%, conforme indicado na Tabela 5.8.

Portanto, de acordo com os critérios estabelecidos na norma (IEC 60099-4, 2009), o terceiro protótipo de para-raios foi considerado aprovado no ensaio de ciclo de operação, uma vez que a diferença entre a tensão residual medida antes e após o ensaio permaneceu

menor que 5%, não foram observados danos no invólucro após o ensaio e os para-raios se mantiveram termicamente estáveis durante a realização do ensaio de ciclo de operação.

Tabela 5.8 – Comparação dos valores de tensão residual dos para-raios.

	Diferença do Valor de Pico da Corrente (%)	Diferença do Valor de Pico da Tensão Residual (%)
Unidade 01	1,9	2,8
Unidade 02	-2,1	2,8
Unidade 03	2,0	4,0

A Figura 5.16 apresenta as unidades do terceiro protótipo de para-raios de PEAD após o ensaio de ciclo de operação. Não foram observadas perfurações, fragmentações ou qualquer outro tipo de degradação nas unidades ensaiadas.



Figura 5.16 – Unidades do terceiro protótipo de para-raios de PEAD após o ensaio de ciclo de operação.

5.3.4 Ensaio de Imersão em Água

O ensaio de imersão em água tem por objetivo verificar a estanqueidade dos para-raios. Para tanto, duas unidades dos supressores de surtos foram mantidas em uma cuba com água salina em ebulição durante 42 h. A solução salina foi preparada contendo 1 kg/m³ de NaCl em água deionizada. Após 42 h de ensaio, as unidades do terceiro protótipo de para-raios de PEAD foram mantidas na cuba até que a temperatura da solução salina atingisse 50 °C. Por fim, foram realizados os ensaios de verificação nas amostras ensaiadas, a temperatura ambiente.

Os ensaios de verificação realizados consistiram na inspeção visual das amostras, medições das perdas resistivas, descargas parciais e tensão residual. Estes ensaios foram realizados antes e após a imersão em água, com o objetivo de verificar mudanças nos desempenhos das unidades ensaiadas devido à penetração de água.

Finalizado o ensaio de imersão em água, não foram observadas modificações estruturais nos invólucros dos para-raios. Os resultados das medições das perdas resistivas realizadas antes e após o ensaio de imersão são mostrados na Tabela 5.9. Para a primeira unidade ensaiada, foi observada a redução dos valores das perdas em torno de 13%, sendo que para a segunda unidade ensaiada, observou-se o aumento das perdas em torno de 17%. Contudo, a norma (IEC 60099-4, 2009) permite que o incremento das perdas seja de até 20%.

Tabela 5.9 – Comparação dos valores das perdas resistivas dos para-raios antes e após o ensaio de imersão em água.

Unidade	Perdas Iniciais (W)	Perdas Finais (W)	Diferença (%)
01	5,32	4,61	-13,3
02	5,68	6,67	17,4

As máximas diferenças entre as tensões residuais medidas antes e após o ensaio de imersão foram menores que 1%, conforme indicado na Tabela 5.10. As medições de descargas parciais indicaram valores menores que 1 pC para medições realizadas antes e após o ensaio de imersão.

Tabela 5.10 – Comparação dos valores de tensão residual dos para-raios antes e após o ensaio de imersão em água.

Unidade	Valores Iniciais		Valores Finais		Diferenças	
	I (kA)	V (kV)	I (kA)	V (kV)	I (%)	V (%)
01	5,1	28,8	5,3	29,0	3,9	0,6
02	5,3	28,8	5,3	28,8	0,0	0,0

A Figura 5.17 apresenta as unidades do terceiro protótipo de para-raios de PEAD após o ensaio de imersão em água. Nota-se que não foram identificadas quaisquer mudanças no invólucro dos para-raios.



Figura 5.17 – Unidades do terceiro protótipo de para-raios após o ensaio de imersão em água.

Portanto, o terceiro protótipo de para-raios de PEAD foi considerado aprovado no ensaio de imersão em água, de acordo com os critérios estabelecidos na norma (IEC 60099-4, 2009).

5.4 Análise dos Resultados

Por meio dos ensaios realizados no terceiro protótipo de para-raios de PEAD, as seguintes conclusões foram obtidas:

- De acordo com os resultados do ensaio de envelhecimento em névoa salina, o aditivo plastificante incorporado ao PEAD tornou o material menos rígido, permitindo-o acomodar os esforços de tração e/ou compressão gerados pelas diferenças de temperatura ao longo do invólucro. Assim, não foram iniciadas as formações de trincas abaixo das saias, comumente observadas nos primeiro e segundo protótipos. Portanto, interrompeu-se o processo cíclico de falha.
- De certa forma, a incorporação do agente plastificante ao PEAD permitiu a melhoria no acabamento dos invólucros dos para-raios, evidenciado pela diminuição da rugosidade superficial das peças após o processo de injeção. Superfícies mais lisas colaboram para a menor concentração de poluentes, reduzindo a corrente de fuga. Consequentemente há também uma redução das descargas superficiais ocasionadas pelo fenômeno de bandas secas e bandas úmidas.

- A melhor acomodação dos esforços de tração e/ou compressão, somadas à redução da corrente de fuga e das descargas parciais, foram fatores importantes para o bom desempenho observado no terceiro protótipo de para-raios de PEAD durante ensaio de envelhecimento em névoa salina.
- Da mesma forma, a redução da cristalinidade do material isolante permitiu que o arco elétrico, formado durante os ensaios de curto-circuito, rompesse facilmente o invólucro do para-raios, desenvolvendo-se na parte externa do dispositivo. Assim, não foram observadas projeções de partes poliméricas dos para-raios nos quatro níveis de correntes utilizados.
- Por fim, os ensaios de ciclo de operação e imersão em água, realizados no terceiro protótipo de para-raios de PEAD, demonstraram que o polímero plastificado atende as condições de estabilidade térmica e estanqueidade, de acordo com os critérios normalizados (IEC 60099-4, 2009).

5.5 Considerações Finais

Através da utilização do PEAD plastificado, observou-se uma melhor adequação do material à aplicação como invólucro de para-raios. Portanto, a partir dos ensaios elétricos realizados, pode-se considerar que o equipamento atende as solicitações dos ensaios de curto-circuito, envelhecimento em névoa salina, ciclo de operação e imersão em água.

Capítulo 6

Análises Físico-Químicas Antes e Após o Ensaio de Envelhecimento do Terceiro Protótipo de Para- raios

6.1 Considerações Iniciais

O desempenho do terceiro protótipo de para-raios de PEAD no ensaio de envelhecimento em névoa salina foi considerado satisfatório, uma vez que o equipamento atendeu aos critérios definidos na norma (IEC 60099-4, 2009). Todavia, para compreender o processo de envelhecimento do polímero, faz-se o uso de técnicas modernas de análise físico-químicas, conforme apresentado nos itens seguintes.

6.2 Ensaios Físico-Químicos

Neste capítulo, o desempenho do invólucro do terceiro protótipo de para-raios no ensaio de envelhecimento será analisado através da difração de raios-X de alto ângulo (WAXRD), espectroscopia no infravermelho por transformadas de Fourier (FTIR/ATR), análise termogravimétrica (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), microscopia eletrônica de varredura (SEM), microscopia de força atômica (AFM), avaliação do peso molecular e ângulo de contato.

Todos os ensaios físico-químicos foram realizados em amostras retiradas dos invólucros do terceiro protótipo de para-raios de PEAD. Para se conhecer melhor o processo de degradação do polímero, foram extraídas tanto amostras de invólucros de para-raios novos, quanto de para-raios submetidos ao ensaio de 1000 h de envelhecimento em névoa salina. Portanto, espera-se obter resultados comparativos antes e após o ensaio supracitado.

6.2.1 Difração de Raios-X de Alto Ângulo (WAXRD)

Os ensaios de difração de raios-X de alto ângulo têm por objetivo determinar o arranjo cristalino do PEAD, podendo inclusive identificar modificações nas redes cristalinas do PEAD após o envelhecimento do polímero. Portanto, esta técnica é utilizada para a caracterização microestrutural do material polimérico.

Os ensaios de difração de raios-X de alto ângulo, desempenhados em amostras de PEAD novas e envelhecidas, foram realizados a temperatura de 25 °C, por meio da utilização do difratômetro Rigaku, modelo R-Axis IV, com radiação Cu-K α de comprimento de onda igual a 1,5418 nm. O anodo rotativo (Rigaku Ultra-X18) foi utilizado como fonte incidente de raios-X, com valores nominais de 40 kV e 100 mA, na faixa de

operação de $2\theta = 4^\circ$ a $2\theta = 90^\circ$, com passo de $0,03^\circ$. As amostras de PEAD foram alinhadas em relação ao feixe incidente de raios-x. O passo foi ajustado em $0,02^\circ/\text{min}$, com tempo de varredura de 5 s. Os dados foram coletados para $2\theta = 10^\circ$ a $2\theta = 90^\circ$.

A Figura 6.1 e a Figura 6.2 apresentam os difratogramas do ensaio de WAXRD nas amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios obtidas antes e após o ensaio de envelhecimento, respectivamente.

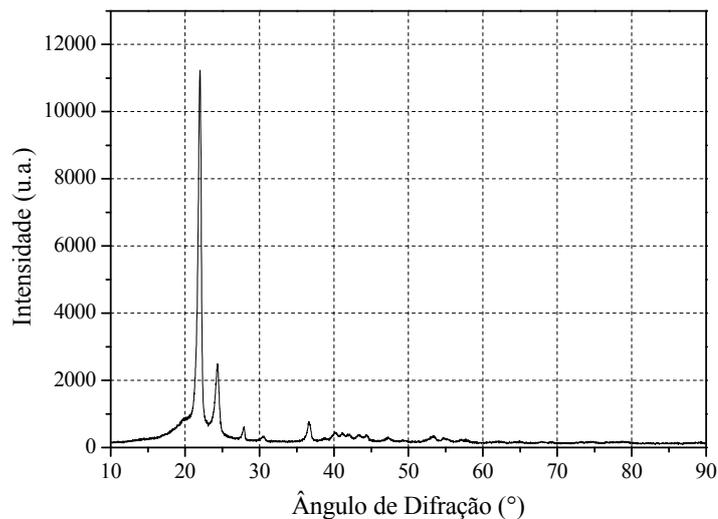


Figura 6.1 – Difração de raios-x nas amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes do ensaio de envelhecimento.

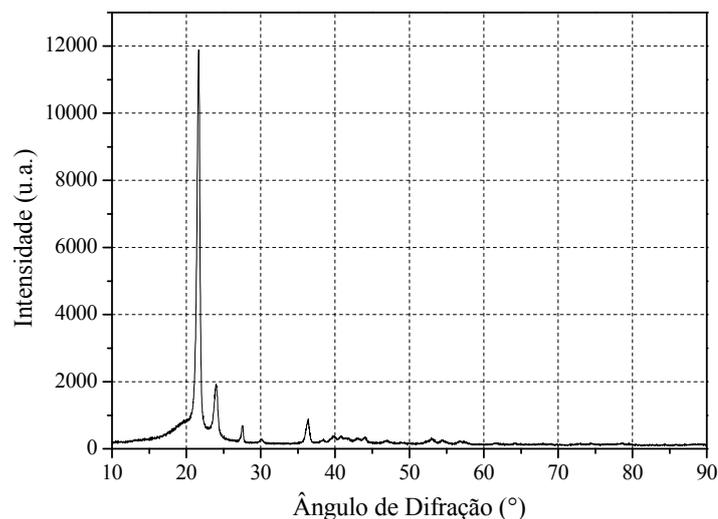


Figura 6.2 – Difração de raios-x nas amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtida após o ensaio de envelhecimento.

Conforme pode ser observado através da Figura 6.1 e da Figura 6.2, o pico da região amorfa do polietileno de alta densidade está localizado em torno de 20° , e os dois picos das regiões cristalinas estão localizados nos ângulos de difração de $21,7^\circ$ e 24° . Sabe-se que a

região cristalina do PEAD apresenta um formato ortorrômbico, com as seguintes dimensões da rede cristalina: $a = 7,40 \text{ \AA}$, $b = 4,93 \text{ \AA}$ e $c = 2,534 \text{ \AA}$ (CAMINITI et al., 2000) e (CAMINITI et al., 2006).

Tipicamente, apenas três reflexões são observadas no ensaio de WAXRD do PEAD, sendo a primeira relacionada à região amorfa e as outras duas correlacionadas às regiões cristalinas. Estes picos ocorrem devido à difração de raios-X dos planos (110) e (200), sendo que o plano (200) está relacionado à reflexão de maior intensidade (PEACOCK, 2000 e AL-SHAMERY et al., 2008).

Observa-se que o primeiro pico está sobreposto a uma região de espectro largo, correspondente a parte amorfa do polímero. Pode-se notar que o difratograma do ensaio de WAXRD para as amostras de PEAD novas (Figura 6.1) é bastante semelhante ao obtido após o ensaio de envelhecimento (Figura 6.2). Portanto, os resultados dos ensaios de WAXRD indicam que não ocorreram mudanças significativas na estrutura cristalina do polímero, bem como, não foi observado o surgimento de novas fases no PEAD após o ensaio de envelhecimento.

6.2.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformadas de Fourier (FTIR/ATR)

A espectroscopia no infravermelho por Transformadas de Fourier é uma técnica amplamente utilizada na caracterização de polímeros, permitindo observar os efeitos da degradação do material. Por meio da análise da FTIR/ATR, é possível identificar a presença de grupos funcionais introduzidos durante o processo de envelhecimento do polímero.

As análises estruturais das amostras de PEAD novas e envelhecidas, retiradas do terceiro protótipo de para-raios, foram realizadas utilizando um espectrômetro no infravermelho, marca Perkin Elmer, Spectrum 100, equipado com cristal de ZnSe. Para este ensaio, foram utilizados corpos de prova, em formato laminar, de dimensões 70 x 7 x 3,4 mm. O espectro do número de onda foi obtido na faixa de 4000 cm^{-1} a 650 cm^{-1} , utilizando 128 varreduras e resolução de 4 cm^{-1} . Antes de cada ensaio, foram realizadas medições com o sistema em vazio, ou seja, sem qualquer amostra, de forma a compensar os efeitos da umidade e dióxido de carbono presentes no ambiente de ensaio.

A degradação inicial do invólucro de PEAD do para-raios durante o ensaio de envelhecimento envolve o processo termo-oxidativo, seguindo os padrões de formação de radicais livres nas estruturas das poliolefinas. A reação do radical livre com o oxigênio,

presente na atmosfera de ensaio, dá início ao processo de auto-oxidação, acarretando na formação de peróxidos e hidroperóxidos (CHRISAFISA et al., 2009; AVALOS-BELMONTES et al., 2009; BRACCO et al., 2007 e YANG et al., 2005).

Os peróxidos instáveis e os hidroperóxidos se decompõem, produzindo o radical livre em uma forma repetitiva, iniciando um processo cíclico que culmina na quebra da cadeia e na redução do peso molecular do PEAD. A Figura 6.3 ilustra o processo de degradação do PEAD durante o ensaio de envelhecimento.

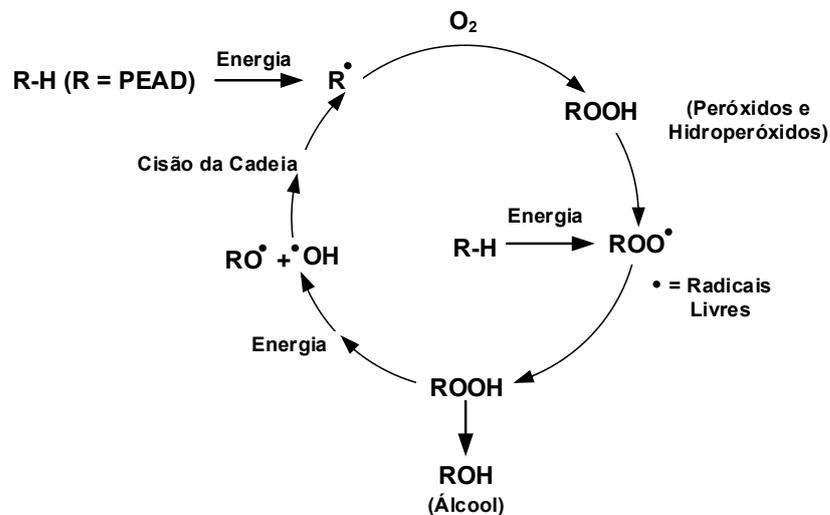


Figura 6.3 – Ilustração do mecanismo de degradação do PEAD durante o ensaio de envelhecimento.

A Figura 6.4 e a Figura 6.5 apresentam os espectros do ensaio de FTIR/ATR para as amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes e após o ensaio de envelhecimento, respectivamente.

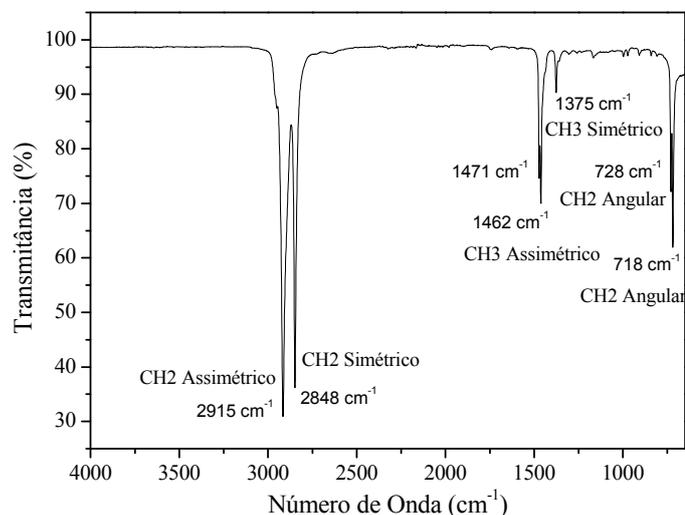


Figura 6.4 – Espectro no infravermelho do ensaio de FTIR/ATR para amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes do ensaio de envelhecimento.

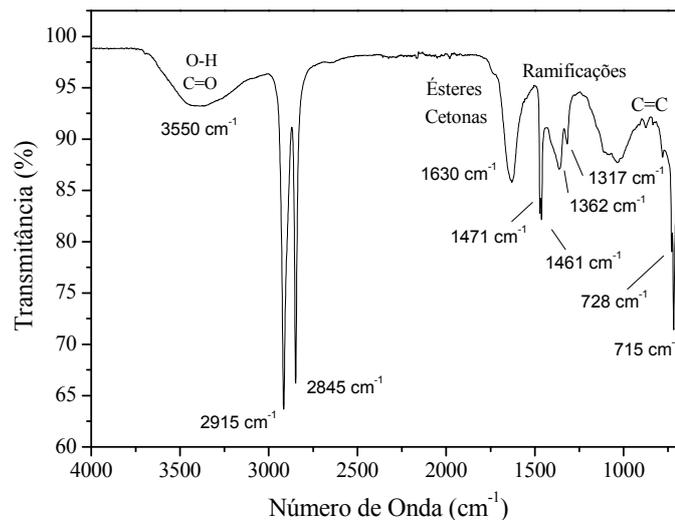


Figura 6.5 – Espectro no infravermelho do ensaio de FTIR/ATR para amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas após o ensaio de envelhecimento.

A principal mudança no espectro do FTIR/ATR em função ao ensaio de envelhecimento consiste na formação de produtos típicos como hidroperóxidos isolados (3550 cm^{-1}), hidroxilas ligadas a hidrogênio inclusive hidroperóxidos (3410 cm^{-1}) e uma banda complexa de $\nu(\text{C}=\text{O})$, incluindo vibrações dos grupos de carbonila na região compreendida entre $1600\text{-}1780\text{ cm}^{-1}$ (SUGIMOTO, 2013). Esta banda está relacionada à sobreposição individual das bandas de absorção atribuídas a ésteres ($1640\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$) e cetonas insaturadas ($1685\text{-}1695\text{ cm}^{-1}$) (VALLÉS-LLUCH et al., 2003).

Os picos de absorção de 1317 cm^{-1} e 1362 cm^{-1} são atribuídos às ramificações moleculares das cadeias das amostras de PEAD envelhecidas (OLEINIK, 2003). As bandas de absorção entre 900 cm^{-1} a 1100 cm^{-1} correspondem às vibrações dos grupos C=C insaturados, localizados na fase amorfa do PEAD (DODD et al., 2003). Portanto, os resultados deste ensaio mostram que o envelhecimento do PEAD promove a oxidação do polímero utilizado como invólucro de para-raios. No entanto, tal oxidação não comprometeu o desempenho do terceiro protótipo de para-raios de PEAD no ensaio de envelhecimento em névoa salina.

6.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

O ensaio termogravimétrico tem como objetivo avaliar o comportamento da massa do polímero em relação à variação programada de temperatura. Pode-se, para tanto, variar as taxas de aquecimento, bem como, alterar a atmosfera de ensaio, utilizando, por exemplo,

atmosfera oxidativa (ar sintético ou O₂) ou gases inertes (nitrogênio ou argônio). Por meio desta técnica, pode-se inferir sobre a estabilidade térmica e/ou oxidativa dos polímeros, inclusive identificar modificações nas cadeias poliméricas em função do envelhecimento do material.

As análises termogravimétricas foram realizadas através do equipamento Mettler Toledo SDTA 851. Pequenas amostras de PEAD, retiradas dos invólucros do terceiro protótipo de para-raios, de aproximadamente 10 mg, foram ensaiadas em um recipiente de alumínio de 70 mL, em atmosfera ambiente. Ajustou-se o equipamento para variar a temperatura das amostras de 25 °C a 800 °C, com taxa de aquecimento variando de 10 °C/min a 30 °C/min.

O estudo da degradação por efeito térmico constitui da medição da estabilidade térmica das amostras de PEAD retiradas dos invólucros dos para-raios. As análises térmicas (TGA) das amostras dos invólucros do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes e após o ensaio de envelhecimento, são mostradas nas Figuras 6.6 e 6.7, respectivamente.

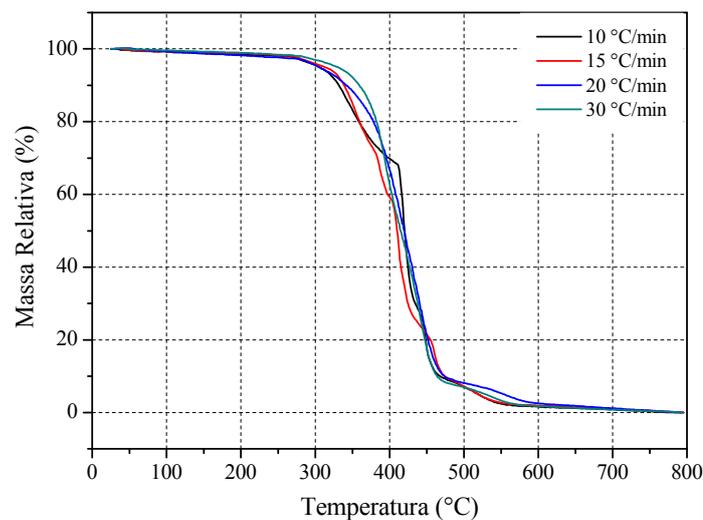


Figura 6.6 – TGA das amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes do ensaio de envelhecimento.

Observa-se que as amostras de PEAD novas e envelhecidas apresentam um comportamento térmico semelhante, não havendo uma diferença significativa na estabilidade térmica do material.

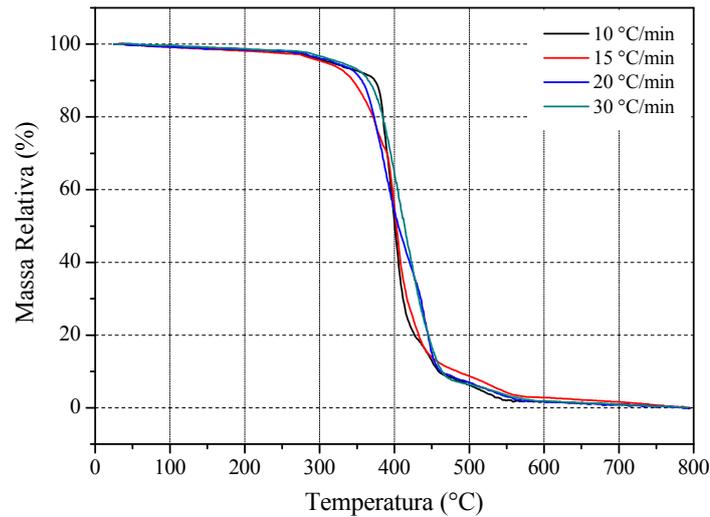


Figura 6.7 – TGA das amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas após o ensaio de envelhecimento.

A energia de ativação do processo de decomposição do PEAD novo e envelhecido pode ser calculada de acordo com a equação (6.1) (SHI et al., 2011 e VASILE, 2000).

$$\ln\left(\frac{\phi}{T_p^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{T}\right) - \frac{E_a}{RT_p} \quad (6.1)$$

Onde ϕ representa a taxa de aquecimento utilizada no experimento; T_p a temperatura absoluta de pico para cada taxa de aquecimento; A o fator pré-exponencial de Arrhenius; R a constante dos gases ideais ($8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); E_a a energia de ativação do processo de decomposição do material.

A energia de ativação representa a energia necessária para que haja a degradação térmica do polímero. Portanto, quanto maior o seu valor, maior é a estabilidade térmica do material.

Tomando-se a correlação entre $\ln(\phi/T_p^2)$ versus $1/T_p$ para as várias taxas de aquecimento utilizadas no experimento, obteve-se a curva mostrada na Figura 6.8. Observa-se que a correlação é linear, apresentando uma boa concordância com a equação (6.1).

A energia de ativação do processo de decomposição do material pode ser calculada através da inclinação das retas obtidas na Figura 6.8. Desta forma, os dados das análises termogravimétricas são apresentados na Tabela 6.1.

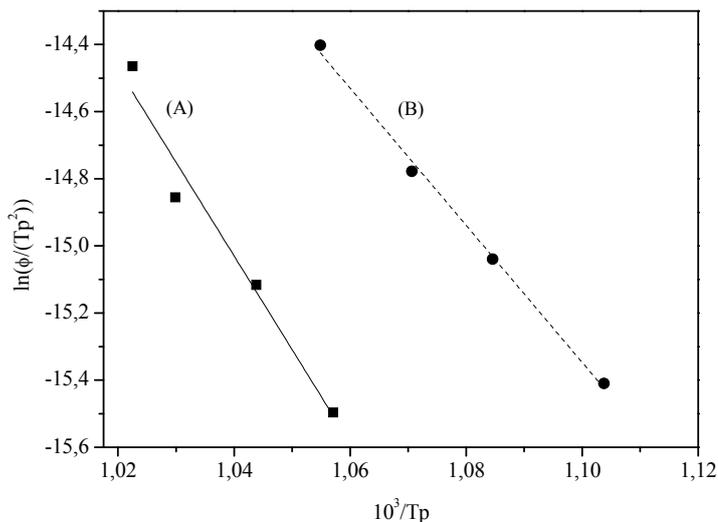


Figura 6.8 – Correlação entre $\ln(\phi/T_p^2)$ e T_p para as amostras de PEAD novas (A) e envelhecidas (B).

Tabela 6.1 – Resultados da análise termogravimétrica do PEAD novo e envelhecido.

Amostras	T_{Inicial} (°C)	$T_{\text{Máxima}}$ (°C)	T_{Final} (°C)	Resíduo (%)	E_a (kJ.mol ⁻¹)
PEAD Novo	250	550	800	0	231
PEAD Envelhecido	250	550	800	0	170

Pode-se observar que ocorreu uma diminuição da energia de ativação das amostras de PEAD após o ensaio de envelhecimento em comparação com as amostras de PEAD novas, em função da redução do peso molecular causado pela quebra das cadeias poliméricas.

6.2.4 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Para se obter informações a respeito das temperaturas de transição de fases e dos índices de cristalinidade das amostras de PEAD removidas dos invólucros do terceiro protótipo de para-raios, foram realizados os ensaios de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Para tanto, utilizou-se do equipamento TA-Du Pont DSC 60, devidamente calibrado com amostras de Indium, com taxa de aquecimento ajustada em 10 °C/min.

Os experimentos foram realizados com amostras de PEAD de 3 a 5 mg, em atmosfera de nitrogênio, com fluxo ajustado em 50 mL/min. A utilização de nitrogênio tem por objetivo minimizar os efeitos da umidade e degradação oxidativa. As amostras foram aquecidas desde a temperatura de -110 °C a 225 °C, com a taxa de aquecimento ajustada em 10 °C/min.

O índice de cristalinidade das amostras de PEAD pode ser calculado por meio da equação (5.1).

As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam os resultados dos ensaios de DSC para as amostras de PEAD retiradas do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes e após o ensaio de envelhecimento, respectivamente.

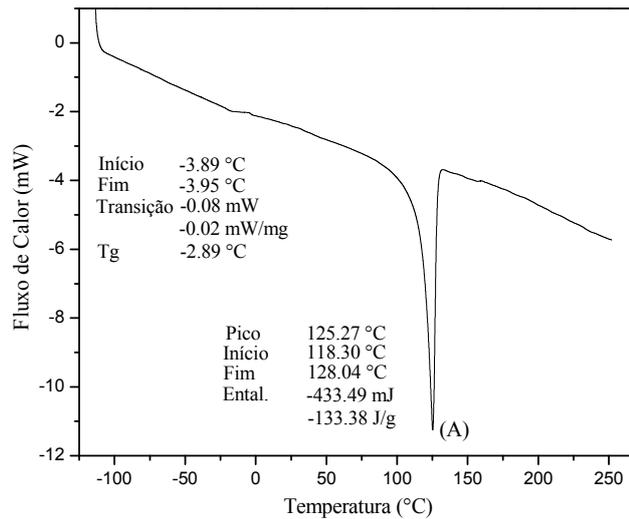


Figura 6.9 – Resultados do ensaio de DSC para amostra de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes do ensaio de envelhecimento.

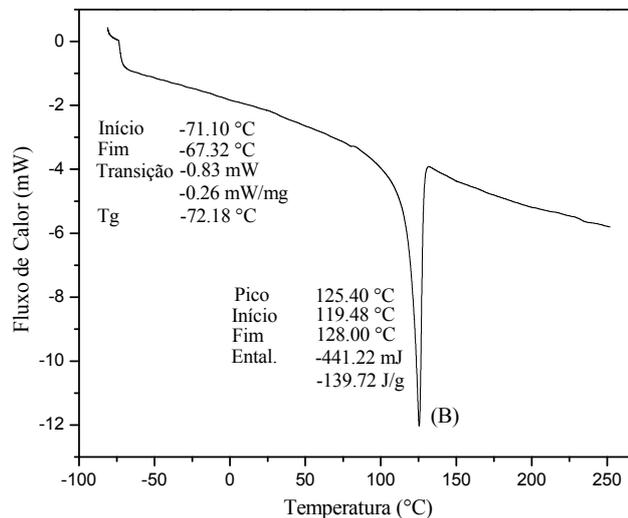


Figura 6.10 – Resultados do ensaio de DSC para amostra de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas após o ensaio de envelhecimento.

A Tabela 6.2 apresenta o resumo dos resultados de ensaio de DSC para as amostras de PEAD.

Tabela 6.2 – Resultados da análise de DSC para amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios, obtidas antes e após o ensaio de envelhecimento, sendo exibidas a temperatura de fusão (T_m), a temperatura de transição vítrea (T_g), a entalpia de fusão (ΔH_f) e o índice de cristalinidade (X) para amostras novas e envelhecidas.

Amostras	T_m (°C)	T_g (°C)	ΔH_f (J/g)	X (%)
PEAD Novo	125,27	-2,89	133,38	46,1
PEAD Envelhecido	125,40	-72,18	139,72	48,2

A curva endotérmica, obtida através do ensaio de DSC, traz informações a respeito da temperatura de fusão do material, bem como do seu índice de cristalinidade. Os valores de T_m , ΔH_f e X , apresentados na Tabela 6.2, praticamente se mantiveram constantes, comparando os resultados obtidos das amostras antes e após o ensaio de envelhecimento. No entanto, o valor da temperatura de transição vítrea decresceu para -72,18 °C após o ensaio de envelhecimento. Este resultado obtido se aproxima da temperatura de transição vítrea do polietileno não plastificado utilizado no primeiro e segundo protótipos de para-raios, cujo valor é de -110 °C.

O fato do valor de T_g diminuir indica, provavelmente, que ocorreu um rearranjo dos segmentos das cadeias de PEAD, formando estruturas cristalinas (DAS e CHAKRABARTY, 2008). O pequeno aumento do índice de cristalinidade das amostras de PEAD envelhecidas indica, possivelmente, a quebra das cadeias do polímero ao longo da região amorfa do material.

As partes das cadeias poliméricas que sofreram o processo de cisão formam, portanto, segmentos livres, resultando na cristalização. Deste modo, a mudança na temperatura de transição vítrea, ocorrida nas amostras de PEAD após o ensaio de envelhecimento, pode ser atribuída à presença de cristais muito pequenos, os quais, aparentemente, não podem ser detectados por meio dos ensaios convencionais de difração de raios-x, como, por exemplo, o ensaio de WAXRD (DAS e CHAKRABARTY, 2008).

6.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM)

A microestrutura interfacial das superfícies das amostras de PEAD retiradas do terceiro protótipo de para-raios, antes e após o ensaio de envelhecimento, foi criteriosamente examinada utilizando a microscopia eletrônica de varredura (SEM). Estas análises foram realizadas por meio do equipamento *JEOL Scanning Electron Microscope*, modelo JSM-5200. As amostras de PEAD analisadas foram retiradas de diversas partes da

superfície do invólucro dos para-raios. Todas as amostras foram revestidas por uma camada de ouro, e, posteriormente, colocadas em um suporte de alumínio com fita condutiva adesiva, do tipo dupla face.

As diferenças nas superfícies das amostras de PEAD antes e após o ensaio de envelhecimento podem ser observadas através da Figura 6.11 (a) e (b), respectivamente. Fica evidente que o ensaio de envelhecimento faz com que haja uma transição na superfície do material, passando de uma condição lisa, com uma rugosidade aleatória, para uma superfície rugosa, com erosão e delaminação. Entretanto, as modificações exibidas na Figura 6.11 (b) são resultados de degradações pontuais observadas nos invólucros dos para-raios após o ensaio de envelhecimento.

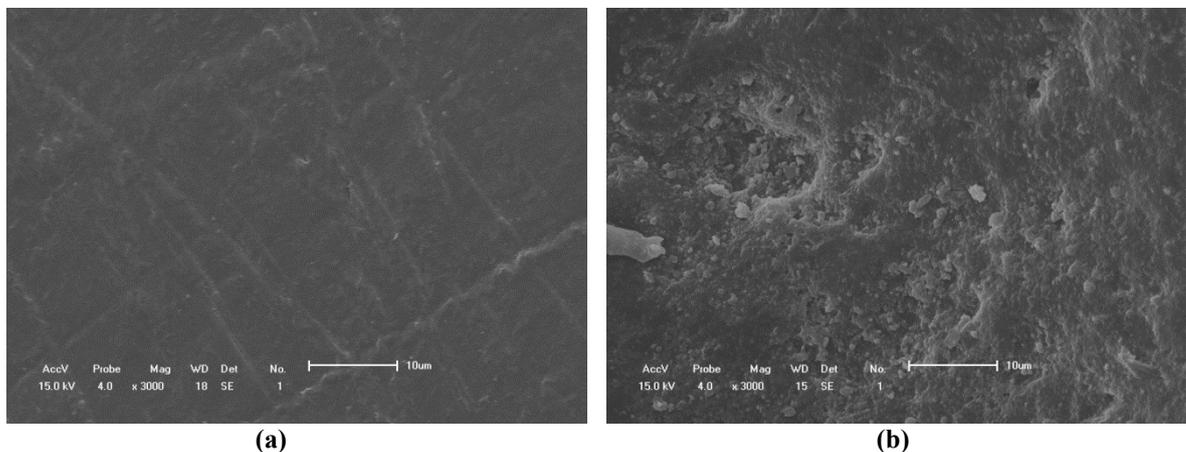


Figura 6.11 – SEM das amostras de PEAD do terceiro protótipo de para-raios obtidas (a) antes e (b) após os ensaios de envelhecimento.

6.2.6 Microscopia de Força Atômica (AFM)

As propriedades elétricas e mecânicas do PEAD dependem, dentre outros fatores, da composição química, da estrutura física do material, bem como das mudanças nos tamanhos dos esferulitos da matriz polimérica (HOSIER et al., 2000 e KHANNA et al., 2013). Esferulitos representam a forma morfológica das cadeias do PEAD, conforme pode ser visualizado pela Figura 6.12. Nota-se que essas estruturas têm diâmetro em torno de 10 µm, sendo formadas por lamelas de espessura da ordem de 20 nm e largura de 100 nm.

As lamelas são formadas pelos feixes radiais das cadeias poliméricas, onde se encontram as porções cristalinas do polietileno. A parte amorfa do material semicristalino está localizada nas regiões interlamelares. Portanto, pode-se dizer que os esferulitos são estruturas esféricas, formadas por milhares de lamelas radiais orientadas a partir do núcleo, onde se inicia o processo de cristalização do material polimérico (CANEVAROLO, 2006).

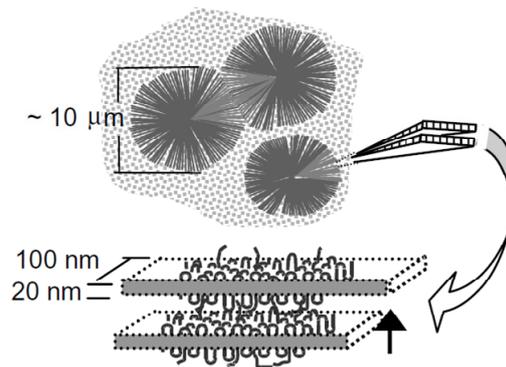


Figura 6.12 – Morfologia do polietileno de alta densidade através da representação por esferulitos.
Fonte: (JONES et al., 2005).

A adição de plastificante ao PEAD pode levar a diminuição do tamanho dos esferulitos, sendo que, para a concentração elevada de plastificante, tal efeito deixa de existir (VAN OSS et al., 1988). Vale ressaltar que, as mudanças na cristalinidade e nos tamanhos dos esferulitos acarretam em mudanças nas energias, densidades e distribuições do nível de Fermi da matriz polimérica, podendo resultar em mudanças nas propriedades dielétricas do PEAD utilizado como invólucro de para-raios.

Para a obtenção das imagens AFM, as amostras de PEAD foram recortadas das superfícies dos invólucros dos para-raios através de um micrótomo a $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Desta forma, foi possível obter lâminas planas, com espessura da ordem de $50\text{ }\mu\text{m}$ a $100\text{ }\mu\text{m}$. Posteriormente, as amostras foram revestidas, através da ação química por 3 h a temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, por meio de uma solução contendo 1% em massa de permanganato de potássio em uma mistura com ácido sulfúrico, ácido fosfórico e água, obedecendo a razão em volume de 10:4:2, respectivamente (BOWEN e HILAL, 2009). Após o processo de revestimento, as amostras foram lavadas e secadas a vácuo, a temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

As medições AFM foram realizadas por meio do equipamento NanoScope III, Digital Instruments. O equipamento foi calibrado, nas direções x e y , através do uso de grades de calibração específicas. Todas as imagens AFM exibidas neste trabalho correspondem a cinco leituras.

Em relação aos resultados dos ensaios de AFM, deve-se salientar que as fases cristalinas do polímero foram encontradas projetadas para fora da superfície do material, conforme mostrado pelas Figuras 6.13 e 6.14, para as amostras de PEAD novas e envelhecidas, respectivamente. Este fato pode ser explicado como sendo o dobramento das lamelas dos cristalitos após ou durante o processo de cristalização.

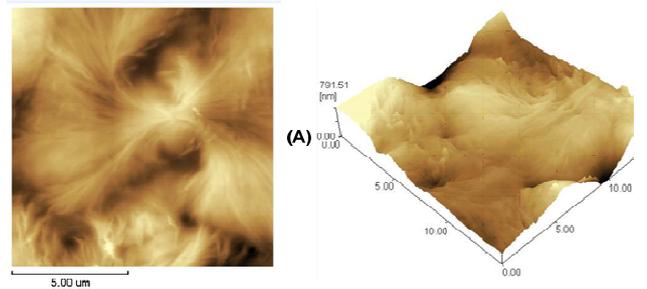


Figura 6.13 – Resultado do ensaio de AFM para amostras de PEAD retiradas do terceiro protótipo de para-raios antes do ensaio de envelhecimento.

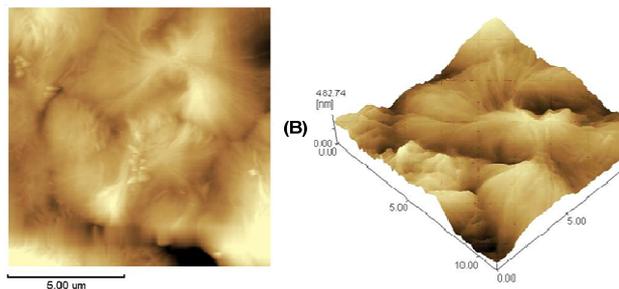


Figura 6.14 – Resultado do ensaio de AFM para amostras de PEAD retiradas do terceiro protótipo de para-raios após o ensaio de envelhecimento.

Adicionalmente, pode-se observar, por meio da Figura 6.14, uma redução significativa no tamanho dos esferulitos após o ensaio de envelhecimento do para-raios. Esta redução está correlacionada à quebra das cadeias poliméricas, conforme evidenciado pelos ensaios de TGA e DSC.

6.2.7 Avaliação do Peso Molecular Médio

O envelhecimento ao longo do tempo do PEAD utilizado nos invólucros do terceiro protótipo de para-raios acarreta na deterioração das propriedades físicas, químicas, térmicas e dielétricas do material. O grau de deterioração do invólucro do para-raios depende da intensidade da degradação e da natureza dos processos químicos envolvidos durante o envelhecimento do material. A avaliação do peso molecular médio do polímero pode ser considerada como uma técnica de medição direta da degradação do material isolante após o ensaio de envelhecimento.

A avaliação do peso molecular médio do PEAD foi realizada por meio da medição da viscosidade do material. As amostras novas e envelhecidas de PEAD foram dissolvidas em decalina, a temperatura de 135 °C. A viscosidade intrínseca do polímero foi mensurada

por meio do viscosímetro capilar Ostwald. O peso molecular médio do PEAD foi calculado de acordo com a equação (6.2) (BRANDRUP et al., 2003).

$$[\eta] = 6,7 \cdot 10^{-4} \overline{M}_v^{0,67} \quad (6.2)$$

Sendo $[\eta]$ a viscosidade intrínseca do polímero e \overline{M}_v o peso molecular médio do material.

A Figura 6.15 apresenta o efeito do ensaio de envelhecimento no peso molecular médio do PEAD. O valor de \overline{M}_v decresce de 288 kDa para 204 kDa após o ensaio de envelhecimento, representando uma redução do peso molecular médio de 30%, aproximadamente. Este fato também indica a ocorrência da reação de cisão das cadeias poliméricas do PEAD durante o ensaio de envelhecimento do material (EPACHER et al., 2000) e (GUGUMUS, 2000).

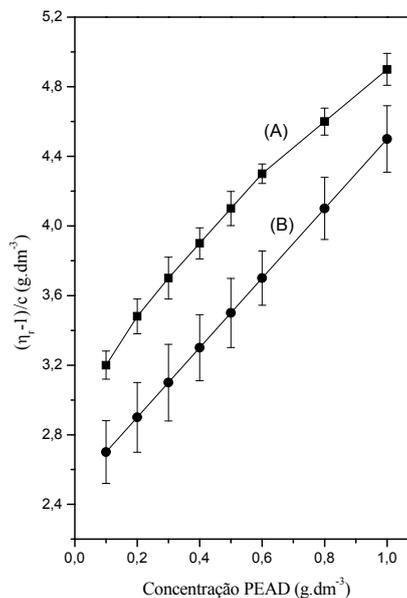


Figura 6.15 – Relação entre a viscosidade intrínseca e a concentração do PEAD (A) antes e (B) após o ensaio de envelhecimento.

6.2.8 Ângulo de Contato

A medição do ângulo de contato tem por finalidade determinar o grau de hidrofobicidade da superfície polimérica. Esta técnica é fundamental para entender sobre a molhabilidade superficial do PEAD. Em equipamentos e dispositivos elétricos instalados em ambientes externos, deseja-se que o comportamento do material isolante seja hidrofóbico,

com formação de gotas em vez de filmes contínuos de água. Este fato colabora com a redução da corrente de fuga superficial, melhorando o desempenho do dispositivo em condições de poluição elevada.

Adicionalmente, através das medições dos ângulos de contato, pode-se também calcular a energia livre superficial do material isolante, que está correlacionada à adesão de contaminantes na superfície do dielétrico. Como exemplo, os materiais cerâmicos apresentam ligações químicas fortes (iônicas), implicando em valores relativamente elevados de energia superficial. Desta forma, as superfícies dos isoladores de porcelana são facilmente molháveis, diluindo os poluentes ora presentes, causando a redução da resistência superficial e aumento da corrente de fuga, podendo iniciar o processo de *flashover* (MACKEVICH e SHAH, 1997).

Diferentemente, o polietileno de alta densidade apresenta ligações covalentes, com menor energia livre superficial. As macromoléculas do PEAD são apolares, colaborando para o aumento da hidrofobicidade do material.

Sendo assim, a hidrofobicidade superficial do invólucro do terceiro protótipo de para-raios foi analisada através das medições de ângulo de contato entre as superfícies de amostras de PEAD, novas e envelhecidas, e gotas de 10 μL de água destilada (H_2O), glicerol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) e di-iodometano (CH_2I_2). As medições com água destilada foram utilizadas para a determinação do ângulo de contato em si, ao passo que as medições com o glicerol e di-iodometano foram utilizadas para o cálculo da energia livre da superfície do polímero.

As amostras de PEAD foram colocadas em um goniômetro de ângulo de contato, marca Rame, modelo 200, que é equipado com uma câmera CCD utilizada na obtenção das imagens para posterior análise. Vale ressaltar que as amostras do polímero foram retiradas de duas regiões do invólucro: Região I – localizada entre as saias do para-raios; Região II – localizada na parte inferior das saias.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados da medição do ângulo de contato formado entre as gotas de 10 μL de água destilada com a superfície do invólucro. Os valores apresentados na tabela correspondem ao valor médio de cinco leituras.

Comparando-se os resultados obtidos para a Região I, nota-se que houve uma diminuição de 31% no valor do ângulo de contato, indicando que o envelhecimento do invólucro do para-raios faz com que a superfície do material se torne menos hidrofóbica. Para a região II, nota-se que a diminuição no ângulo de contato foi menos acentuada, sendo seu valor igual a 18%.

Tabela 6.3 – Resultados da medição do ângulo de contato utilizando-se a água destilada.

Região	Amostras	Valor Médio Ângulo de Contato (°)
I – Entre Saias	PEAD Novo	96
	PEAD Envelhecido	66
II – Parte Inferior da Saias	PEAD Novo	91
	PEAD Envelhecido	74

A Figura 6.16 (a) e (b) exibe imagens típicas obtidas durante a realização do ensaio, para as amostras de PEAD novas e envelhecidas, respectivamente, evidenciando a diminuição do ângulo de contato do material envelhecido.

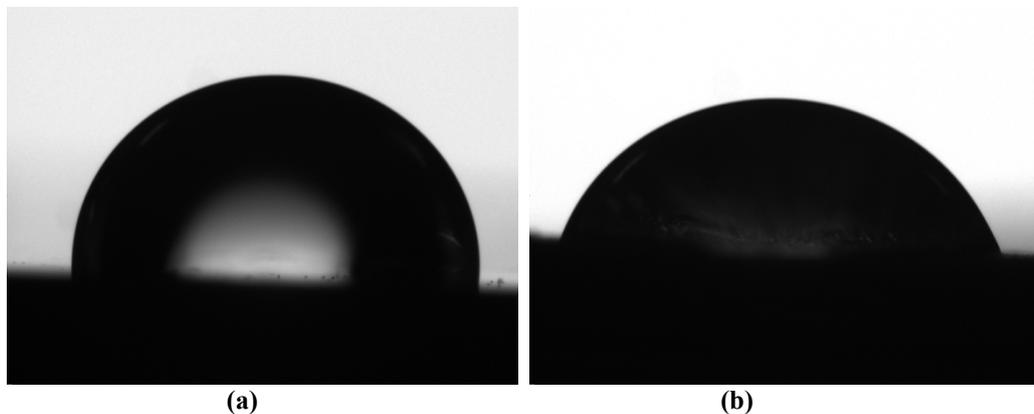


Figura 6.16 – Gotas de água destilada de 10 µL na superfície do PEAD (a) antes e (b) após o ensaio de envelhecimento.

A Figura 6.17 (a) e (b) apresenta a vista superior dos para-raios antes e após o ensaio de envelhecimento em névoa salina de 1000 h, respectivamente. Da mesma forma, a Figura 6.18 (a) e (b) mostra a vista frontal dos para-raios novos e envelhecidos. Observa-se, para os para-raios novos, a formação de gotas, ao passo que para os para-raios envelhecidos, ocorre à formação de filmes contínuos de água, evidenciando, portanto, a redução de hidrofobicidade do polímero.

Nota-se, por meio da Tabela 6.4, que houve um aumento 32% da energia livre da superfície do terceiro protótipo de para-raios de PEAD após o seu envelhecimento, sugerindo que a molhabilidade do polímero envelhecido é causada pela introdução de grupos polares na superfície do invólucro de polietileno de alta densidade.

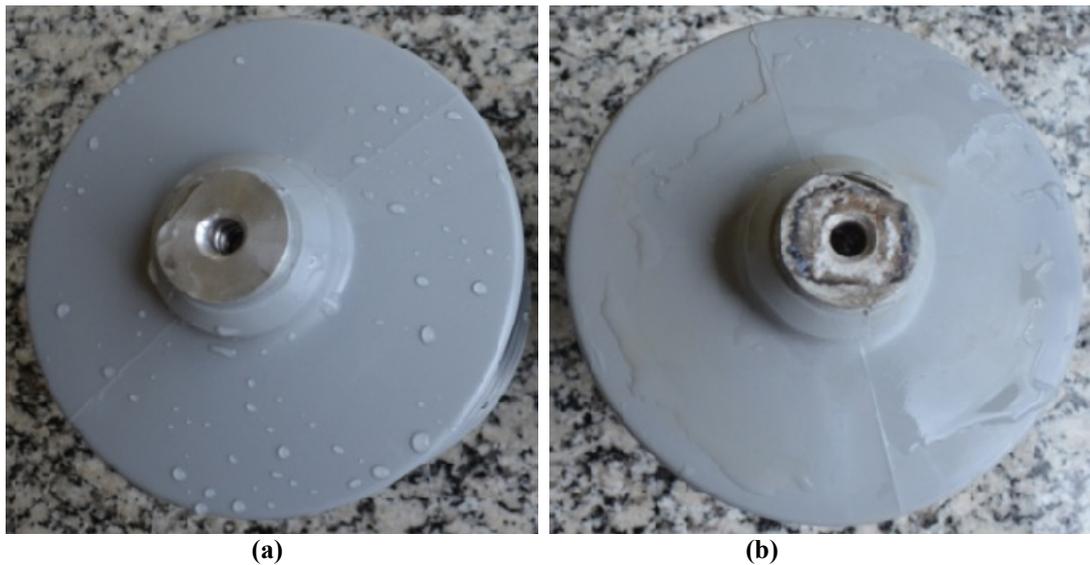


Figura 6.17 – Vista superior dos para-raios em condições úmidas: (a) para-raios novo e (b) para-raios após ensaio de envelhecimento em névoa salina.

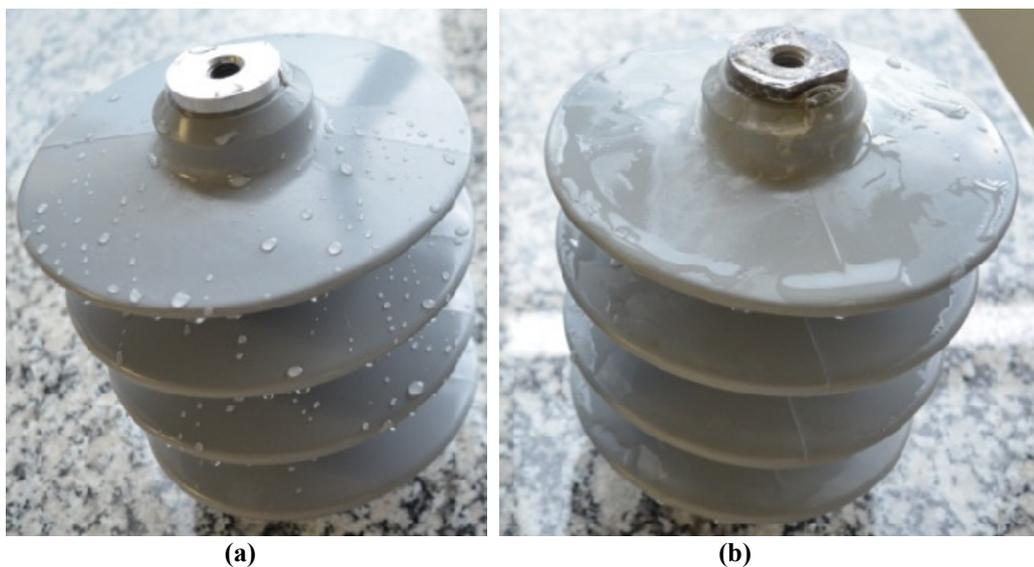


Figura 6.18 – Vista frontal dos para-raios em condições úmidas: (a) para-raios novo e (b) para-raios após ensaio de envelhecimento em névoa salina.

Tabela 6.4 – Resultados do cálculo da energia superficial do PEAD novo e envelhecido.

Amostras	Energia Superficial (mJ/m ²)
PEAD Novo	34
PEAD Envelhecido	45

6.3 Análise Geral dos Resultados

As várias técnicas físico-químicas, utilizadas na caracterização do PEAD utilizado no terceiro protótipo de para-raios, são fundamentais para auxiliar o entendimento do

processo de envelhecimento do material. Portanto, este item traz um resumo dos resultados obtidos, conforme apresentado a seguir.

- **Análise por WAXRD:** Através dos resultados dos ensaios de WAXRD, não foram evidenciadas mudanças significativas na estrutura cristalina do polímero, bem como, não foi observado o surgimento de novas fases no PEAD após o ensaio de envelhecimento.
- **Análise por FTIR/ATR:** Os resultados dos ensaios de FTIR/ATR indicaram a formação, após o ensaio de envelhecimento, de oxidação típica sendo identificados a presença de hidroperóxidos isolados ou a presença de hidroxilas. Ao mesmo tempo, identificaram-se vibrações de grupos de carbonila, bandas de absorção atribuídas a ésteres e cetonas insaturadas, evidenciando, portanto, a oxidação do polietileno após o ensaio de envelhecimento. Tais modificações indicam ser apenas na superfície do material, uma vez que o protótipo foi aprovado no ensaio de envelhecimento acelerado.
- **Análises Térmicas por TGA e DSC:** As análises por TGA indicaram uma diminuição da energia de ativação do polímero envelhecido, causada pela redução do peso molecular em função da quebra das cadeias poliméricas. A técnica de DSC permitiu evidenciar a redução da temperatura de transição vítrea do PEAD envelhecido, sugerindo o rearranjo dos segmentos das cadeias poliméricas. Através da técnica de DSC, também foi possível detectar a quebra das cadeias poliméricas, resultando na formação de cristais muito pequenos, os quais parecem estar fora do limite de detecção através do ensaio de WAXRD.
- **Análise por SEM e AFM:** Por meio das imagens obtidas através do SEM, foi possível notar o aumento da rugosidade superficial dos invólucros envelhecidos, bem como, detectar a presença de erosão superficial e delaminação do polímero. As análises de AFM mostraram uma redução significativa no tamanho dos esférulitos após o ensaio de envelhecimento, correlacionada à cisão das cadeias poliméricas. Entretanto, tais alterações não afetaram o desempenho do protótipo.
- **Análise do Peso Molecular:** Por meio da análise da viscosidade do polímero, pôde-se calcular do peso molecular médio, o qual apresentou uma redução de

30% comparando o PEAD envelhecido com o novo, evidenciando, novamente, o processo de cisão das cadeias poliméricas.

- **Análise Hidrofobicidade:** As análises da hidrofobicidade do PEAD indicaram uma redução máxima de 31% no valor do ângulo de contato da superfície polimérica, comparando-se os resultados obtidos antes e depois do ensaio de envelhecimento. Desta forma, este ensaio comprovou a perda de hidrofobicidade do PEAD envelhecido.

Em termos práticos, as ocorrências de descargas superficiais, observadas durante o ensaio de envelhecimento em névoa salina, levam ao surgimento de aquecimento localizado, emissão de elétrons, íons, radiação UV e formação de efeito corona. Todos estes fatores são considerados fontes de energia para o rompimento de cadeias poliméricas. Uma vez ocorrida a quebra das cadeias poliméricas, dá-se início ao processo de auto-oxidação, devido à formação de macrorradicais livres. Estes, por sua vez, reagem com o oxigênio presente na atmosfera de ensaio, dando sequência ao processo cíclico de auto-oxidação, conforme mostrado na Figura 6.3.

Pode-se dizer que o procedimento auto-oxidativo observado para o terceiro protótipo de para-raios constitui um processo natural de envelhecimento do polietileno. Resultados semelhantes foram obtidos nos ensaios multifatorial de para-raios de SiR e EPR/SiR, conforme evidenciado no trabalho de Sundararajan et al. (2006).

6.4 Comparação do PEAD Plastificado com Invólucros de Silicone e EPDM

Tendo em vista as diversas análises físico-químicas realizadas no PEAD plastificado, utilizado no terceiro protótipo de para-raios, buscou-se fazer comparações de alguns dos resultados do envelhecimento do PEAD em relação aos invólucros poliméricos convencionais relatados na literatura. Os itens a seguir apresentam tais comparações.

6.4.1 Degradação Ácida

Conforme comentado no Capítulo 1, item 1.2 deste trabalho, a corrosão ácida tem representado um problema recorrente em invólucros compostos por borracha de silicone e

EPDM. Ensaio em para-raios de distribuição, provindos de quatro diferentes fabricantes nacionais, foram realizados no LAT-EFEI. Basicamente, o procedimento de ensaio consistiu em recortar pequenas amostras, de aproximadamente 1 cm^2 e espessura de acordo com a saia do invólucro, retiradas dos para-raios de SiR e EPDM sob análise.

Posteriormente, tais amostras passaram pelo processo de imersão em ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido nítrico (HNO_3), concentração 0,1 normal, a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 840 h. A análise da degradação do polímero foi feita por meio da medição mássica das amostras, realizada a cada cinco dias (120 h). O processo de medição foi realizado após a secagem das amostras por fricção em papel de alta absorção de umidade.

Paralelamente, amostras de PEAD plastificado foram submetidas ao mesmo procedimento de ensaio, com o objetivo de determinar a degradação do polietileno nas condições supracitadas. As análises das amostras de SiR, EPDM e PEAD foram realizadas por meio de inspeções visuais e comportamento mássico durante o ensaio. De forma a uniformizar os resultados obtidos, tomou-se o valor percentual das leituras de massa, conforme mostrado pela equação (6.3).

$$m_{\%} = \frac{m_t}{m_{t=0}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

Sendo $m_{\%}$ o cálculo da massa relativa das amostras; m_t a massa lida no instante t e $m_{t=0}$ a massa inicial da amostra antes do início do ensaio.

A Figura 6.19 apresenta o comportamento mássico das amostras de SiR, EPDM e PEAD, submetidas ao ensaio de imersão em ácido sulfúrico, a $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Nota-se que praticamente não houve degradação do PEAD, sendo que as variações de massa corresponderam a valores menores que 0,5%, podendo ainda ser atribuídas às incertezas associadas às medições. Ao contrário, as amostras de SiR e EPDM, que foram analisadas em conjunto, apresentaram perda de massa, principalmente após 240 h de ensaio, atingindo, ao final do experimento, uma redução média de 17%.

O comportamento mássico das amostras de SiR e EPDM e de PEAD durante a imersão em ácido nítrico pode ser observado através da Figura 6.20. Observa-se, novamente, que o PEAD praticamente não apresentou perda ou ganho de massa durante o ensaio, sendo que as maiores variações observadas foram inferiores a 1%. Em contrapartida, as amostras de SiR e EPDM apresentaram, inicialmente, ganho de massa de 7% durante as primeiras 240 h de ensaio, devido a absorção de solução ácida.

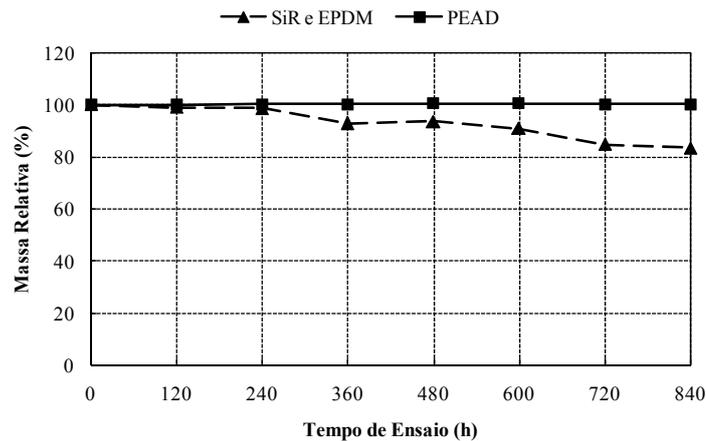


Figura 6.19 – Comportamento de amostras de SiR, EPDM e PEAD durante o ensaio de imersão em ácido sulfúrico (H_2SO_4), a temperatura de 60 °C.

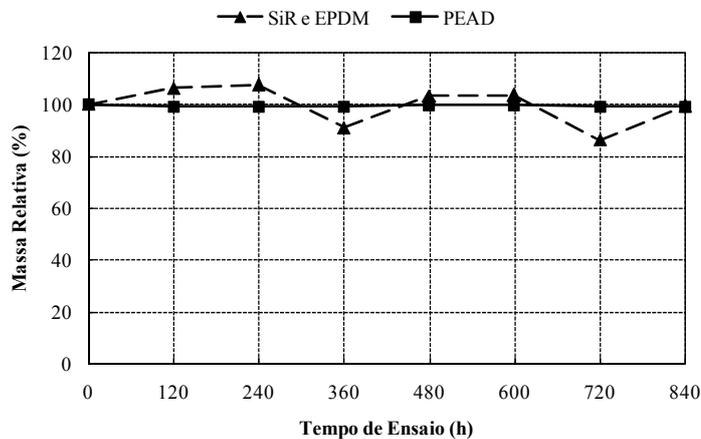


Figura 6.20 – Comportamento de amostras de SiR, EPDM e PEAD durante o ensaio de imersão em ácido nítrico (HNO_3), a temperatura de 60 °C.

Em função do ganho de massa observado, optou-se por realizar leituras posteriormente a secagem das amostras de SiR e EPDM durante 24 h, em estufa a vácuo. Após o novo processo de secagem, as pesagens indicaram perda de massa do SiR e EPDM, conforme pode ser observado na Figura 6.20, nas medições realizadas a 360 h e 720 h de ensaio, indicando perda de massa de até 14%.

As inspeções visuais indicaram trincas e deterioração dos materiais a base de SiR e EPDM, ao passo que o PEAD não apresentou degradação durante os ensaios.

Resultados semelhantes de perda de massa do SiR devido a corrosão ácida foram obtidos no trabalho de Koshino et al. (1998), onde relatou-se a perda de massa de 17% durante o ensaio de imersão em ácido nítrico, 1 normal, a temperatura ambiente. Homma et al. (2000) também relataram a perda de massa de amostras de SiR imersas em solução ácida, com pH de 3,9 a 90 °C. Os valores de perdas mássicas alcançaram cerca de 10% após dois meses de ensaio.

6.4.2 Energia de Ativação

Ensaio de envelhecimento de para-raios e isoladores poliméricos de distribuição, ambos constituídos por invólucros de borracha de silicone, foram realizados no trabalho de Coser (2009). Os ensaios constituíram no envelhecimento acelerado através de radiação UV, imersão em água, aquecimento a 120 °C e névoa salina (sem aplicação de tensão). Diversas análises físico-químicas foram realizadas durante os ensaios, tais como: FTIR/ATR, TGA, DSC e SEM.

As análises termogravimétricas (TGA), realizadas nos materiais poliméricos de SiR após o ensaio de envelhecimento em névoa salina, indicaram que o primeiro estágio de degradação do material isolante se iniciou a 200 °C, correspondendo à decomposição térmica da alumina tri-hidratada ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), que é um produto inorgânico utilizado para melhoramento das propriedades contra o trilhamento e erosão de materiais a base de borracha de silicone. Comparando com o PEAD plastificado, observou-se que a degradação térmica do material utilizado no terceiro protótipo de para-raios se iniciou entre 250 °C a 300 °C e, portanto, maior que a temperatura do primeiro estágio de degradação do SiR contendo alumina tri-hidratada.

A análise da energia de ativação do SiR, realizada a atmosfera de nitrogênio, com taxas de aquecimento ajustadas em 5, 10, 20 e 30 °C/min, indicou que a borracha de silicone não envelhecida apresenta valor da energia de ativação em torno de 177 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (COSER, 2009). No trabalho apresentado por Li et al. (2015), o cálculo da energia de ativação do SiR utilizado em isoladores poliméricos indicou valores médios em torno de 182 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Comparando com os dados obtidos para o terceiro protótipo de para-raios, cujo valor calculado da energia de ativação foi de 231 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, nota-se que o PEAD plastificado apresentou energia de ativação em torno de 27% a 31% maior que a borracha de silicone. Este fato indica que o PEAD plastificado proporciona maior estabilidade térmica em relação ao SiR.

O trabalho realizado por Woo et al. (2010) apresenta a análise do envelhecimento térmico da borracha de EPDM, sob vários perfis de temperatura. Os resultados do envelhecimento foram mensurados através de diversas técnicas de caracterização, como, por exemplo, análise termogravimétrica. O cálculo da energia de ativação da borracha de EPDM indicou valores iniciais em torno de 90 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, para o material novo. Após o ensaio de envelhecimento, o valor da energia reduziu para 30 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Nota-se que a energia de ativação do PEAD plastificado, utilizado no terceiro protótipo de para-raios, é 156% maior que a borracha de EPDM, comparando ambos os materiais não envelhecidos. Portanto, o polietileno de alta densidade plastificado apresenta maior estabilidade térmica comparada com o EPDM.

6.4.3 Ângulo de Contato

A análise da hidrofobicidade de materiais poliméricos pode ser realizada de duas maneiras. A primeira fundamenta-se na observação visual da superfície isolante após aspergir água ao longo do dispositivo, sendo, portanto, uma análise qualitativa. A segunda técnica consiste em mensurar o ângulo de contato formado entre as gotas de água e a superfície do material dielétrico.

O trabalho realizado por Sundararajan et al. (2006) apresentou a análise da hidrofobicidade de para-raios de distribuição, com invólucros EPR/SiR, submetidos aos ensaios de envelhecimento multifatorial. Segundo os critérios utilizados pelos autores do trabalho, baseados nas observações visuais das superfícies dos para-raios em condições úmidas, os invólucros de EPR/SiR apresentaram perda total de hidrofobicidade após o ensaio, tornando-se materiais hidrofílicos, conforme exemplo mostrado pela Figura 6.21.

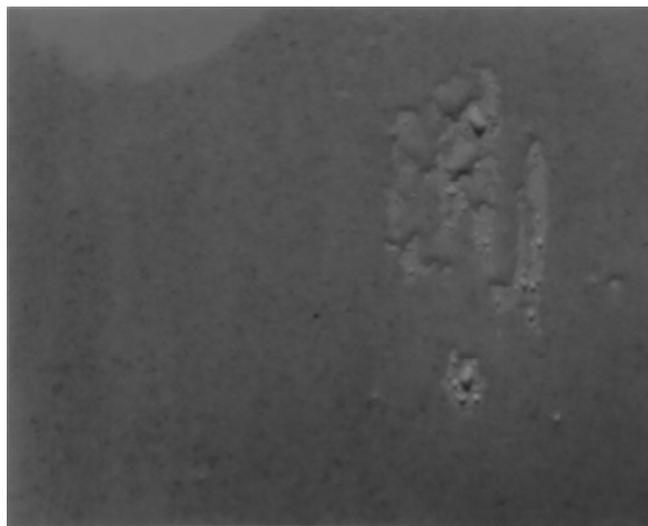


Figura 6.21 – Exemplo do comportamento hidrofílico de materiais, de acordo com (STIR, 1992).

Resultados semelhantes de perda de hidrofobicidade foram apresentados no trabalho de Marungsri et al. (2006), que realizou estudos sobre a influência dos perfis das saias de isoladores de borracha de silicone durante ensaios de envelhecimento em névoa salina com

tensão aplicada. No total, foram ensaiados três tipos de isoladores com invólucros de SiR, submetidos a tensão de 15 kV, na presença de névoa salina com condutividade ajustada em 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e duração de 50 dias.

Após a realização dos ensaios, os autores do trabalho identificaram a presença de erosão acentuada nas regiões entre as saias do isolador, conforme mostrado pela Figura 6.22. Nas regiões mais degradadas, o isolador a base de SiR apresentou perda total de hidrofobicidade, sendo que, após a umidificação, o dispositivo apresentou comportamento semelhante ao mostrado na Figura 6.21.

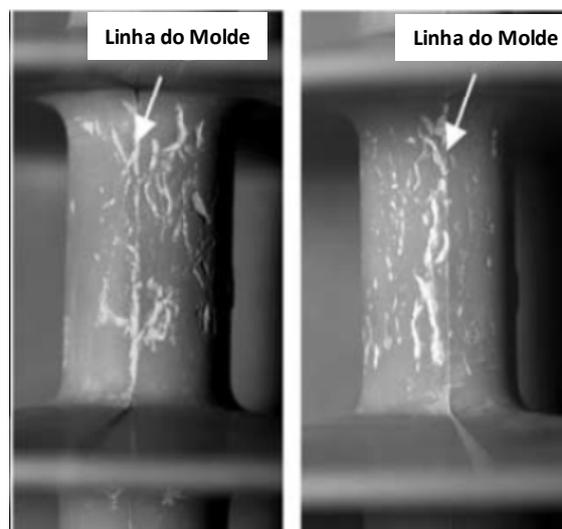


Figura 6.22 – Erosão observada nos isoladores de borracha de silicone após o ensaio de envelhecimento em névoa salina com duração de 50 dias. Traduzida do trabalho de (MARUNGSRI et al., 2006)

O PEAD plastificado utilizado no terceiro protótipo de para-raios não apresentou perda total de hidrofobicidade após o ensaio de envelhecimento em névoa salina, conforme mostrado na Figura 6.23, que apresenta pequenas gotas de água na superfície do invólucro.

Comparando os resultados obtidos para o PEAD plastificado com os mencionados nos trabalhos de Sundararajan et al. (2006) e Marungsri et al. (2006), observa-se que o polietileno plastificado apresentou melhor desempenho, em termos de hidrofobicidade, frente aos materiais de EPR/SiR e SiR utilizados em para-raios e isoladores poliméricos.

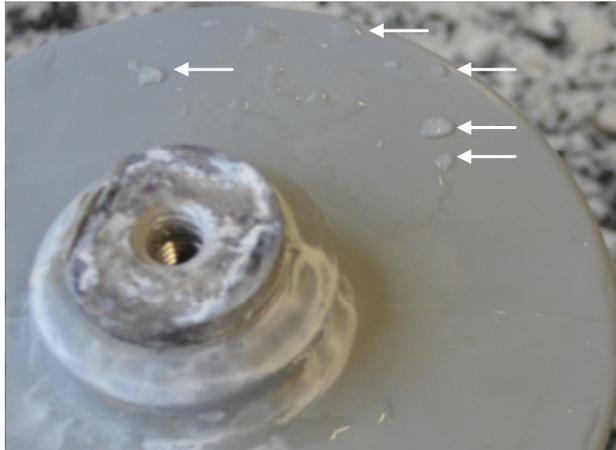


Figura 6.23 – Presença de gotas de água observadas no terceiro protótipo de para-raios de PEAD plastificado após o ensaio de envelhecimento em névoa salina.

Diversos trabalhos relatam sobre a medição do ângulo de contato em superfícies poliméricas novas e envelhecidas. Rowland et al. (2010) realizaram análises da hidrofobicidade de isoladores de ancoragem e suspensão, ambos empregados em linhas de transmissão de 400 kV, de circuito duplo. Os isoladores, que eram constituídos por invólucros de borracha de silicone, permaneceram em operação no sudoeste da Inglaterra durante 15 anos. As medições de ângulo de contato, realizadas nas amostras retiradas de campo, indicaram valores mínimos em torno de 65° a 70° , indicando a redução da hidrofobicidade do material dielétrico após seu envelhecimento em serviço.

Amostras de borracha de silicone submetidas ao envelhecimento por efeito corona apresentaram perda de hidrofobicidade, de acordo com os estudos realizados por Venkatesulu e Thomas (2010). Os ângulos de contato formados entre a superfície do material com gotas de água variaram de 110° , para superfícies antes do ensaio de envelhecimento, reduzindo para 80° após 50 h de ensaios de envelhecimento, indicando uma redução total de 27%.

Comparando-se os resultados obtidos para o PEAD plastificado, utilizado no terceiro protótipo de para-raios, com os trabalhos encontrados na literatura, observa-se que o comportamento do ângulo de contato do polietileno está, no mínimo, coerente com os materiais normalmente utilizados em invólucros poliméricos (SiR e EPDM). Pode-se dizer que o PEAD plastificado, quando novo, apresenta ângulo de contato próximo ao SiR.

Após o ensaio de envelhecimento, o PEAD plastificado, utilizado no terceiro protótipo de para-raios, apresentou redução entre 18 a 31% do ângulo de contato, sendo que os valores mensurados permaneceram entre 66° a 74° . Estes valores são coerentes com os resultados indicados nos trabalhos de Rowland et al. (2010) e Venkatesulu e Thomas

(2010), cujos valores de ângulo de contato do SiR após envelhecido permaneceram entre 65° a 80°.

Borrachas de silicone podem apresentar redução drástica da hidrofobicidade, seguida, posteriormente, da recuperação parcial do ângulo de contato, conforme mostrado no trabalho de Marklove e Wheeler (1996). Os resultados indicam que a redução do ângulo de contato nas superfícies de invólucros de SiR pode chegar a praticamente 80%. Tais constatações foram observadas durante a realização de ensaios em névoa salina, onde o ângulo de contato reduziu de aproximadamente 104° para 24°. Durante a perda de hidrofobicidade do SiR, as medições indicaram valores muito inferiores ao observado no PEAD plastificado.

Ensaio de envelhecimento multifatorial realizados em para-raios de EPDM mostraram que a redução do ângulo de contato destes materiais pode atingir cerca de 40%, saindo de 80° para 50° após o ensaio, conforme mostrado no trabalho de Saldivar-Guerrero (2008). Sendo assim, o PEAD plastificado apresentou melhor comportamento hidrofóbico em relação ao EPDM.

6.5 Considerações Finais

O envelhecimento do invólucro do terceiro protótipo de para-raios foi examinado por meio de técnicas modernas de análises físico-químicas. Embora o PEAD plastificado tenha apresentado um processo de degradação após o ensaio de envelhecimento, seu desempenho manteve-se estável durante o período de ensaio. Sabe-se que o envelhecimento elétrico do PEAD plastificado envolve mecanismos bastante complexos, dependendo não apenas da composição do material, mas também das condições de processamento.

Capítulo 7

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

7.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo apresentar as conclusões em relação ao trabalho realizado, bem como, propor sugestões para trabalhos futuros acerca do tema.

7.2 Resultados Alcançados

O trabalho desenvolvido atingiu o objetivo proposto de avaliar a aplicabilidade do polietileno de alta densidade na manufatura de invólucros de para-raios de distribuição. Tomando-se como base os três protótipos desenvolvidos e os ensaios elétricos realizados, diversas conclusões importantes foram obtidas.

Em se tratando especificamente do primeiro protótipo de para-raios de PEAD, os ensaios de curto-circuito realizados demonstraram dois aspectos principais: desprendimento de partes poliméricas e combustão do invólucro do para-raios. O módulo do equipamento, formado pelos varistores encapsulados em fibra de vidro e resina epóxi, permaneceu intacto após estes ensaios, comprovando que a reprovação do equipamento no ensaio de curto-circuito ocorreu em função do invólucro do para-raios.

Os ensaios de envelhecimento em névoa salina, realizados no primeiro protótipo de para-raios, indicaram a falha prematura das unidades ensaiadas, devido ao surgimento de trincas nos polímeros, causadas pelas diferenças de temperatura ao longo do invólucro. A presença de trincas levou a penetração de poluição nas regiões afetadas, acarretando em um comportamento cíclico, finalizando com a perfuração do invólucro.

Observou-se, por meio dos resultados obtidos nos ensaios de curto-circuito e envelhecimento, que o PEAD utilizado no primeiro protótipo apresentou um índice de cristalinidade elevado para a aplicação como invólucro de para-raios, comprometendo, portanto, o desempenho em ambos os ensaios.

A tentativa de plastificação do polímero foi demonstrada no segundo protótipo de para-raios de PEAD, onde se utilizou óleos vegetais e parafina clorada como agentes plastificantes. Contudo, devido às condições não ideais de processamento do material somadas as pré-falhas observadas nas peças após a injeção dos invólucros, o segundo protótipo de para-raios não suportou as condições de ensaio de envelhecimento em névoa salina.

Em função das dificuldades encontradas na modificação das formulações dos invólucros do segundo protótipo de para-raios, optou-se por adquirir um PEAD plastificado, sem a necessidade de realizar a etapa de processamento. Assim, foi constituído o terceiro protótipo de para-raios de PEAD, com invólucro plastificado. Os resultados obtidos nos ensaios de curto-circuito demonstraram que o invólucro do equipamento desempenha uma função fundamental no processo de transferência do arco elétrico para o meio externo.

Paralelamente, utilizando um material com menor índice de cristalinidade e, portanto, mais flexível, observou-se que as dilatações térmicas foram mais bem acomodadas. Desta forma, não foram observados os surgimentos de trincas no invólucro, interrompendo, conseqüentemente, o processo cíclico que levou a falha do primeiro e segundo protótipo de para-raios de PEAD.

Adicionalmente, foram realizados os ensaios de ciclo de operação no terceiro protótipo de para-raios, com o objetivo de avaliar o comportamento dos supressores de surtos em relação ao processo de absorção de energia. Os resultados obtidos indicaram que o comportamento do terceiro protótipo de para-raios de PEAD foi satisfatório, uma vez que não foram observados danos nos invólucros e os equipamentos se mantiveram termicamente estáveis durante a realização dos ensaios.

Por fim, para compreender o processo de envelhecimento do PEAD, foram realizadas análises físico-químicas nos invólucros do terceiro protótipo de para-raios. Por meio de comparações dos materiais novos e envelhecidos, foi possível identificar a oxidação do polietileno de alta densidade plastificado, a redução do peso molecular em função da cisão das cadeias poliméricas, o aumento da rugosidade superficial e erosão, bem como, redução da hidrofobicidade do material envelhecido. Entretanto, o processo de envelhecimento não comprometeu o desempenho do terceiro protótipo de para-raios.

Os ensaios de imersão em solução ácida mostraram que o PEAD não sofreu degradação, diferentemente dos invólucros de SiR e EPDM. O comparativo da energia de ativação demonstrou que o PEAD apresenta maior estabilidade térmica frente às borrachas de SiR e EPDM. Por fim, as análises de ângulo de contato indicaram que o polietileno apresentou valores semelhantes ao silicone e superiores ao EPDM.

Vale ressaltar, de acordo com levantamentos feitos pela empresa PLP, que o projeto de para-raios de distribuição utilizando PEAD plastificado na composição do invólucro (terceiro protótipo) acarretou em uma redução do custo final do dispositivo em torno de 20%, comparado ao para-raios de distribuição com invólucro de borracha de silicone. Este fato demonstra que, além de apresentar características técnicas que indicaram o bom

desempenho do PEAD plastificado, sua utilização também é atrativa do ponto de vista econômico, trazendo redução dos preços e aumento da competitividade para o setor de distribuição de energia elétrica.

Comparando com os valores médios dos preços dos para-raios de distribuição poliméricos atualmente comercializados no país, o terceiro protótipo constituído de PEAD plastificado apresentou redução dos preços em torno de 15%, segundo os levantamentos realizados pela PLP em parceria com a concessionária de energia AES Sul. Este fato reforça a competitividade econômica da utilização do PEAD plastificado na composição de invólucros de para-raios.

Dois outros aspectos que podem ainda colaborar com a redução dos custos de produção dos para-raios de PEAD plastificado:

- **Redução da Espessura do Invólucro:** Foi observada que a espessura do invólucro do terceiro protótipo de para-raios pode, aparentemente, ser reduzida, tanto nas saias quanto no próprio corpo do para-raios. Desta forma, a quantidade de material polimérico utilizado em cada peça será reduzida, acarretando, portanto, no abatimento dos custos unitários de produção do dispositivo.
- **Utilização de PEAD Reciclado:** Outro fato intrínseco ao polietileno de alta densidade é a possibilidade de reciclagem, fato não observado nas borrachas de silicone, EPR, EPDM e suas blendas. Portanto, a utilização do PEAD reciclado, que é um material mais barato em comparação a resina de polietileno virgem, ocasionará a redução dos custos de fabricação dos para-raios a base de PEAD, tornando-os ainda mais vantajosos em termos econômicos.

Vale destacar que mais de três mil unidades de para-raios de PEAD plastificado, com tensões nominais de 15 kV e 24 kV, foram produzidas pela PLP e parte se encontra instalada nas redes de distribuição da concessionária de energia AES Sul. Estes equipamentos foram alocados tanto nas redes aéreas convencionais quanto nas redes compactas.

Até o presente momento, foi detectada apenas uma falha em um para-raios de tensão nominal de 24 kV. A Figura 7.1 (a) apresenta a vista frontal do supressor de surto após a retirada de operação. Nota-se, através da Figura 7.1 (b), que foi detectada a formação de

uma espécie de bolha de gás no invólucro, indicando, possivelmente, a falha durante o processo de injeção da peça.

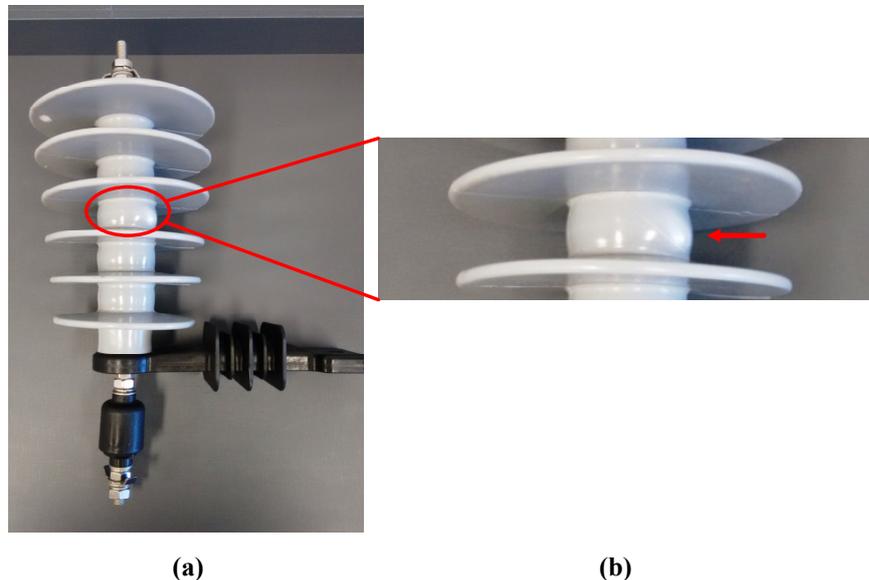


Figura 7.1 – (a) Vista frontal do para-raios de 24 kV retirado de campo; (b) detalhe da bolha observada entre as saias do dispositivo, indicando, possivelmente, falha no processo de injeção da peça.

Vale observar que todas as outras unidades instaladas se encontram normalmente em operação, podendo-se dizer que a falha detectada foi, aparentemente, ocasionada por um desvio esporádico no processo de fabricação da peça em questão. Falhas semelhantes foram observadas durante o ensaio de envelhecimento mostrado no Capítulo 4 deste trabalho, indicando que a presença de cavidades no invólucro compromete o bom desempenho do dispositivo durante sua vida útil.

Desta forma, observa-se que a fabricação dos para-raios de PEAD plastificado deve constantemente passar por um rigoroso controle de qualidade. Imperfeições nas peças injetadas podem levar ao mau desempenho do dispositivo, acarretando na falha precoce em campo dos supressores de surtos.

7.3 Trabalhos Publicados

Por meio dos ensaios e análises realizadas neste trabalho, foi possível publicar um artigo em revista internacional, intitulado como: “*Electrical Performance Evaluation of Plasticized Polyolefin Formulation Developed for Manufacturing Surge Arresters Housing*”, publicado no IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, N° 6, December 2015.

7.4 Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste item, abordam-se alguns tópicos relacionados à aplicação do PEAD na composição de invólucros de para-raios de distribuição, para o desenvolvimento de trabalhos posteriores, conforme listados a seguir:

- **Desenvolvimento de Formulações de PEAD:** Embora os resultados obtidos no segundo protótipo de para-raios não tenham sido considerados satisfatórios, não se pode descartar o emprego de óleos vegetais na plastificação do PEAD. Portanto, um trabalho importante para a continuidade deste tema se refere ao processamento de formulações de PEAD juntamente com diversos tipos de óleos vegetais. Pode-se realizar a adição de plastificantes a base de óleo vegetal durante a síntese do polímero ou durante o seu processamento. Posteriormente, pode-se proceder com ensaios mecânicos, elétricos e análise físico-química realizados em corpos de prova com diferentes percentuais de aditivos, quantificando, desta forma, as formulações mais adequadas à aplicação como invólucros de para-raios.
- **Ensaio de Envelhecimento Multifatorial:** Os ensaios de envelhecimento multifatorial têm como objetivo avaliar o comportamento dos para-raios em condições semelhantes às de serviço. Para tanto, levam-se em conta diversos efeitos ambientais, como, precipitação, períodos a seco, névoa salina, radiação UV, variações de temperatura, entre outros. Pode-se também realizar análises físico-químicas durante o ensaio de envelhecimento, de forma a quantificar o grau de envelhecimento dos para-raios em função da duração dos ensaios.
- **Monitoramento dos Para-raios de PEAD em Campo:** O desempenho dos para-raios de PEAD plastificado está sendo avaliado através da instalação destes equipamentos em redes de distribuição aéreas, convencionais e compactas. A análise do envelhecimento em campo pode ser feita através de ensaios elétricos e caracterização físico-química, realizados periodicamente em amostras retiradas de serviço. Paralelamente, pode-se estabelecer uma correlação entre o envelhecimento observado em laboratório, através do ensaio de envelhecimento multifatorial, com o envelhecimento dos equipamentos em campo.

Referências Bibliográficas

AL-SHAMERY, K.; RUBAHN, H.-G.; SITTER, H. *Organic Nanostructures for Next Generation Devices*. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 358 p.

AMIN, M.; AKBAR, M.; AMIN, S. Hydrophobicity of Silicone Rubber Used for Outdoor Insulation (An Overview). *In: Review of Advanced Materials Science, Vol. 16, p. 10-26, 2007.*

ARORA, R.; MOSCH, W. *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. 337 p.

ARRIGHI, R. From Impregnated Paper to Polymeric Insulating Materials in Power Cables. *In: Jicable 84 – International Conference on Insulated Power Cables, p. 550-569, 1984.*

ASTM Standard D882-09. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, 2009.

AVALOS-BELMONTES, F.; ZAPATA-GONZALEZ, I.; RAMOS-DEVALLE, L. F.; ZITZUMBO-GUZMAN, R.; ALONSO-ROMERO, S. Thermo-oxidative Degradation of HDPE as a Function of its Crystalline Content. *In: Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, Vol. 47, p. 1906-1915, 2009.*

BOWEN, W. R.; HILAL, N. *Atomic Force Microscopy in Process Engineering: An Introduction to AFM for Improved Process and Products*. Butterworth-Heinemann: Oxford, 2009. 304 p.

BRACCO, P.; BRUNELLA, V.; ZANETTI, M.; COSTA, L.; LUDA, M. P. Stabilisation of ultra-high molecular weight polyethylene with vitamin E. *In: Polymer Degradation and Stability, Vol. 92, p. 2155-2162, 2007.*

BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E. H.; GRULKE, E. A. *Polymer Handbook*. New York: Wiley-Interscience, 2003. 2336 p.

CAMINITI, R.; BALLIRANO, P.; CARBONE, M. Polyethylene Structure as a Function of Temperature: an EDXD Investigation. *In: Journal of Macromolecular Science, Part B, Physics, Vol. 45, p. 1005-1014, 2006.*

CAMINITI, R.; PANDOLFI, L.; BALLIRANO, P. Structure of Polyethylene from X-Ray Powder Diffraction: Influence of the Amorphous Fraction on Data Analysis. *In: Journal of Macromolecular Science, Part B, Physics, Vol. 39, p. 481-492, 2000.*

CANEVAROLO, S. V. *Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros – 2ª Edição*. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 280 p.

CHAUDHRY, V.; GORUR, R. S.; DYER, M.; THALLAM, R. S. Electrical Performance of Polymer Housed Zinc Oxide Arresters Under Contaminated Conditions. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, N° 2, p. 696-705, 1991.*

CHERNEY, E. A.; BIGLAR, B.; JAYARAM, S. Salt Fog Testing of Polymer Housed Surge Arresters. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, N° 2, p. 252-258, 2001.*

CHRISAFISA, K.; PARASKEVOPOULOSA, K. M.; PAVLIDOUA, E.; BIKIARIS, D. Thermal Degradation Mechanism of HDPE Nanocomposites Containing Fumed Silica Nanoparticles. *In: Thermochimica Acta, Vol. 65, p. 65-71, 2009.*

CHRZAN, K. L. Influence of Moisture and Partial Discharges on the Degradation of High-Voltage Surge Arresters. *In: European Transactions on Electrical Power, Vol. 14, p. 175-184, 2004.*

COLOMBO, E.; NIGRIS, M.; SIRONI, A. Failure Mode Tests for Distribution Type Metal-Oxide Surge Arresters with Polymeric Housing. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N° 1, p. 240-252, 1996.*

COSER, E. Caracterização da Borracha de Silicone Utilizada em Isoladores para Redes Elétricas. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2009.

CRAVER, C.; CARRAHER, C. *Applied Polymer Science: 21st Century*. Oxford: Elsevier, 2000. 1088 p.

CREIGHTON, E. E. F. The Present Status of Aluminum-Cell Lightning Arresters. *In: Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 33, N° 5, p. 795-802, 1914.*

CROWDES, G. J. A 35-kV Polyethylene-Insulated Cable Installation. *In: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, p. 1086-1090, 1959.*

DAS, M.; CHAKRABARTY, D. Thermogravimetric Analysis and Weathering Study by Water Immersion of Alkali-Treated Bamboo Strips. *In: Bio Resources, Vol. 3, N° 4, p. 1051-1062, 2008.*

DAVINI, G.; CONSORTINI, G.; PORTINARI, G. Recent Developments in EPR-Insulated High-Voltage Cables. *In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 86, N° 11, p. 1361-1368, 1967.*

DODD, S. J.; CHAMPION, J. V.; ZHAO, Y.; VAUGHAN, A. S.; SUTTON, S. J.; SWINGLER, S. G. Influence of Morphology on Electrical Treeing in Polyethylene Blends. *In: IEEE Proceedings Science, Measurement and Technology, Vol. 150, p. 58-64, 2003.*

EICHHORN, R. M. Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation. *In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-12, p. 2-18, 1976.*

EPACHER, E.; TOLVETH, J.; KRÖHNKE, C.; PUKÁNSZKY, B. Processing Stability of High Density Polyethylene: Effect of Adsorbed and Dissolved Oxygen. *In: Elsevier Polymer, Vol. 41, N° 23, p. 8401– 8408, 2000.*

FONSECA, A. D. R. et al. Projeto de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas – Manual de Distribuição, CEMIG, 2014. 124 p.

FORNARO, A. Águas de Chuvas: Conceitos e Breve Histórico. Há Chuva Ácida no Brasil? *In: Revista USP, N° 70, p. 78– 87, 2006.*

GILL, J. G.; STYS, R. D.; SEELY, R. U. Impulse Characteristics of Aerial Spacer Cable. *In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 86, N° 3, p. 369-373, 1967.*

GORUR, R. S.; MONTESINOS, J.; VARADADESIKAN, L. A Laboratory Test for Tracking and Erosion Resistance of HV Outdoor Insulation. *In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, N° 6, p. 767-774, 1997.*

GUGUMUS, F. Physico-Chemical Aspects of Polyethylene Processing in an Open Mixer: Kinetics of Hydroperoxide Formation. *In: Elsevier Polymer Degradation and Stability, Vol. 68, N° 3, p. 327–336, 2000.*

HABAS, J. P.; ARROUY, J. M.; PERROT, F. Effects of Electric Partial Discharges on the Rheological and Chemical Properties of Polymers Used in HV Composite Insulators after Railway Service. *In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, N° 5, p. 1444-1454, 2009.*

HACKAM, R. Outdoor HV Composite Polymeric Insulators. *In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, N° 5, p. 557-585, 1999.*

HARADA, J.; UEKI, M. M. *Injeção de Termoplásticos: Produtividade com Qualidade*. São Paulo: Artliber Editora, 2012. 269 p.

HARROLD, R. T.; DAKIW, T. W. On Predicting the Life of Polyethylene Spacer-Cable Eroded by Surface Discharges in Wet Weather. *In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 95, N° 3, p. 821-828, 1976.*

HE, J.; CHEN, S.; ZENG, R.; HU, J.; DENG, C. Development of Polymeric Surge ZnO Arresters for 500-kV Compact Transmission Line. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, N° 1, p. 113-120, 2006.*

HEGER, G.; VERMEULEN, H. J.; HOLTZHAUSEN, J. P.; VOSLOO, W.L. A Comparative Study of Insulator Materials Exposed to High Voltage AC and DC Surface Discharges. *In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, N° 2, p. 513-520, 2010.*

HIRINCHSEN, V. *Metal Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems - Fundamentals*. Berlin: Siemens AG, 2011. 128 p.

HOMMA, H.; KUROYAGI, T.; IZUMI, K.; MIRLEY, C. L.; RONZELLO, J.; BOGGS, S. A. Evaluation of Surface Degradation of Silicone Rubber Using Gas Chromatography/Mass Spectroscopy. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, N° 2, p. 796-803, 2000.*

HOMMA, H.; MIRLEY, C. L.; RONZELLO, J.; BOGGS, S. A. Field and Laboratory Aging of RTV Silicone Insulator Coatings. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, N° 4, p. 1298-1303, 2000.*

HOSIER, I. L.; VAUGHAN, A. S.; SWINGLER, S. G. On the Effects of Morphology and Molecular Composition on the Electrical Strength of Polyethylene Blends. *In: Journal of Polymer Science – Part B: Polymer Physics, Vol. 38, p. 2309-2322, 2000.*

IEC 60099-4 International Standard. Surge Arresters – Part 4: Metal-oxide Surge Arresters without Gaps for A.C. Systems, 2009.

JONES, J. P.; LLEWELLYN, J. P.; LEWIS, T. J. The Contribution of Field-Induced Morphological Change to the Electrical Aging and Breakdown of Polyethylene. *In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, N° 5, p. 951-966, 2005.*

KATZ, C.; WALKER, M. Evaluation of Service Aged 35 kV TR-XLPE URD Cables. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, N° 1, p. 1-6, 1998.*

KELLAM, B. Problems and Experiences with Polyethylene Jackets on Metal-Sheathed Cables. *In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 82, p. 545-553, 1963.*

KESTER, J. J.; MILLER, D. R.; BENNA, S. J.; STEINBRECHER, B. T. Multistress Aging Tests of Polymer Housed Surge Arresters. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, N° 2, p. 446-452, 1998.*

KHANNA, Y. P.; DHARIA, A.; ZEITOUN, A. M. Nucleating Agent for Polyethylenes. *In: European Patent, N° -EP2632972 A1, 2013.*

KOJIMA, K.; FUKUI, T.; YAMADA, Y.; KITAI, S; YATSUDA, K. Development and Commercial Use of 275 kV XLPE Power Cable. *In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, N° 1, p. 203-210, 1981.*

KOSHINO, Y.; UMEDA, I.; ISHIWARI, M. Deterioration of Silicone Rubber for Polymer Insulators by Corona Discharge and Effect of Fillers. *In: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol. 1, p. 72-79, 1998.*

KWOK, D. Y.; NEUMANN, A. W. Contact Angle Measurement and Contact Angle Interpretation. *In: Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 81, N° 3, p. 167-249, 1999.*

LAHTI, K. Effects of Internal Moisture on the Durability and Electrical Behaviour of Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters. Tese – Tampere University of Technology, Tampere, Finlândia, 2003.

LAHTI, K.; KANNUS, K.; NOUSIAINEN, K. A Comparison Between the DC Leakage Currents of Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters in Very Humid Ambient Conditions and in Water Immersion Tests. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 1, p. 163-168, 1999.*

LAHTI, K.; KANNUS, K.; NOUSIAINEN, K. Behaviour of the DC Leakage Currents of Polymeric Metal Oxide Surge Arresters in Water Penetration Tests. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, N° 2, p. 459-464, 1998.*

LAHTI, K.; KANNUS, K.; NOUSIAINEN, K. Diagnostic Methods in Revealing Internal Moisture in Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, N° 4, p. 951-956, 2002.*

LAWSON, J. H.; VAHLSTROM, W. Investigation of Insulation Deterioration in 15 kV and 22 kV Polyethylene Cables Removed from Service – Part II. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 92, p. 824-835, 1973.

LENK, D. W.; KOEPFINGER, J. L.; SAKICH, J. D. Utilization of Polymer Enclosed Intermediate Class Arresters to Improve the Performance of Modern Power Systems. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, N° 3, p. 1542-1551, 1992.

LENK, D. W.; STOCKUM, R.; GRIMES, D. E. A New Approach to Distribution Arrester Design. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, N° 2, p. 584-590, 1988.

LI, Y.; CHEN, C.; JIA, Z.; YE, W. Thermal Stability and Organic Component Analysis of HTV Silicone Rubber Composite Insulator. In: *2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, p. 721-724, 2015.

LOUGEE, N. A. Life and Performance Tests of O F Lightning Arresters. In: *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 39, N° 11, p. 944-948, 1920.

MACKEVICH, J. Evaluation of Polymer-Housed Distribution Arresters for Use on Rural Electric Power Systems. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 30, No. 2, p. 490-495, 1994.

MACKEVICH, J.; SHAH, M. Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 13, No. 3, p. 5-12, 1997.

MACKEVICH, J.; SIMMONS, S. Polymer Outdoor Insulating Materials Part II: Material Considerations. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 13, No. 4, p. 10-16, 1997.

MARKLOVE, M. C.; WHEELER, J. C. G. Salt Fog Testing of Composite Insulators. In: *Seventh International Conference on Dielectric Materials Measurements & Applications*, No. 430, p. 299-302, 1996.

MARTINEZ, M. L. B. Para-raios para Sistema de Média Tensão – Características Técnicas e Aplicação a Sistemas de Potência. Dissertação – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 1993.

MARUNGSRI, B.; SHINOKUBO, H.; MATSUOKA, R. Effect of Specimen Configuration on Deterioration of Silicone Rubber for Polymer Insulators in Salt Fog

Ageing Tests. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 1, p. 129-138, 2006.

MCFARLIN, J. R. Lightning Arrester and Method of Making the Same. In: *U.S. Patent*, N° 1763667, 1930.

MCGEE, T. D. *Principles and Methods of Temperature Measurements*. New York: John Wiley & Sons, 1988. 608 p.

MCMAHON, E. J. A Tree Growth Inhibiting Insulation for Power Cables. In: *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-16, N° 4, p. 304-318, 1981.

MILLER, D. R.; WOODWORTH, J. J.; DALEY, C. W. Watts Loss of Polymer Housed Surge Arresters in a Simulated Florida Coastal Climate. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, N° 3, p. 940-947, 1999.

MOBEDJINA, M.; JOHNNERFELT, B.; STENSTROM, L. Design and Testing of Polymer-Housed Surge Arresters. In: *GCC CIGRÉ 9th Symposium*, Abu Dhabi, Arab Emirates, October 1998.

MONTANARI, G. C.; FABIANI, D.; PALMIERI, F.; KAEMPFER, D.; THOMANN, R.; MULHAUPT, R. Modification of electrical properties and performance of EVA and PP insulation through nanostructure by organophilic silicates. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 11, N° 5, p. 754-762, 2004.

NOBREGA, A. M. Análise da Isolação em XLPE dos Cabos Cobertos Utilizados nas Redes de Média Tensão. Tese – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2013.

NOBREGA, A. M. Estudo das Redes Aéreas Compactas por Meio de Ensaio e Modelagens Utilizando o Método dos Elementos Finitos. Dissertação – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2011.

OLEINIK, E. F. Plasticity of Semicrystalline Flexible-chain Polymers at the Microscopic and Mesoscopic Levels. In: *Journal of Polymer Science, Part C: Polymer Letters*, Vol. 45, p. 17-117, 2003.

OLIVEIRA, M. C. B. R. Gestão de Resíduos Plásticos Pós-Consumo: Perspectivas para a Reciclagem no Brasil. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

PEACOCK, A. *Handbook of Polyethylene: Structures: Properties, and Applications*, New York: Marcel Dekker, 2000. 554 p.

PERROT, F.; MACKINLAY, R. Comparative Accelerated Ageing Test to Assess the Sealing Performance of Composite Surge Arresters and Insulators. *In: High Voltage Engineering Symposium, N° 467, p. 164-167, 1999.*

PLP Brasil – Preformed Line Products. Disponível em <www.plp.com.br>. Acesso em: 08 de junho de 2015.

RAIKOS, G. Development of the Hendrix Polyethylene Pin Type Insulator. *In: ECNE T&D Committee Meeting, N° 67, 1972.*

RITCHER, B. et al.. MO Surge Arresters Stresses and Test Procedures. *In: Working Group A3.17, CIGRÉ, August 2013.*

ROWLAND, S. M.; ROBERTSON, J.; XIONG, Y. Electrical and Material Characterization of Field-aged 400 kV Silicone Rubber Composite Insulators. *In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, N° 2, p. 375-383, 2010.*

SAKSHAUG, E. C. A Brief History of AC Surge Arresters. *In: IEEE Journals & Magazines, Vol. 11, N° 8, p. 11-13, 1991.*

SAKSHAUG, E. C.; KRESGE, J. S.; MISKE, S. A. A New Concept in Station Arrester Design. *In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 96, N° 2, p. 647-656, 1977.*

SALDIVAR-GUERRERO, R.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, F.; HERNÁNDEZ-CORONA, R.; PANIAGUA-GARCÍA, G. Physical and Chemical Characterization of Polymer Housed Surge Arresters Tested under Accelerated Weathering. *In: Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Yokkaichi, Mie, Japan, p. 291-294, 2008.*

SARMA, H. Accelerated Life Test on a New Water Tree Retardant Insulation for Power Cables. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, N° 2, p. 551-559, 1997.*

SHI, X.; WANG, J.; STAPF, S.; MATTEA, C.; LI, W.; YANG, Y. Effects of Thermo-Oxidative Aging on Chain Mobility, Phase Composition, and Mechanical Behavior of High-Density Polyethylene. *In: Polymer Engineering Science, Vol. 51, p. 2171-2177, 2011.*

SMITH, R. C.; LIANG, C.; LANDRY, M.; NELSON, K. K.; SCHADLER, L. S. The Mechanisms Leading to the Useful Electrical Properties of Polymer Nanodielectrics.

In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, N° 1, p. 187-196, 2008.

STIR Hydrophobicity Classification Guide, 92/1, Swedish Transmission Research Institute, 1992.

SUGIMOTO, M.; SHIMADA, A.; KUDOH, H.; TAMURA, K.; SEGUCHI, T. Product Analysis for Polyethylene Degradation by Radiation and Thermal Ageing. *In: Radiation Physical Chemistry, Vol. 82, p. 69-73, 2013.*

SUNDARARAJAN, R.; SOUNDARAJAN, E.; MOHAMMED, A.; GRAVES, J. Multistress Accelerated Aging of Polymer Housed Surge Arresters Under Simulated Coastal Florida Conditions. *In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, N° 1, p. 211-226, 2006.*

TANAKA, T.; MONTANARI, G. C.; MULHAUPT, R. Polymer Nanocomposites as Dielectrics and Electrical Insulation – Perspectives for Processing Technologies, Material Characterization, and Future Applications. *In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, N° 5, p. 763-784, 2004.*

TAYLOR, J. Short Circuit Behaviour – Surge Arresters and Counters. ABB Power Products, Ludvika, Sweden, 2000.

TEYSSÉDRE, G.; LAURENT, C. Advances in High-Field Insulating Polymeric Materials Over the Past 50 Years. *In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 29, N° 5, p. 26-36, 2013.*

THUE, W. A. *Electrical Power Cable Engineering*. New York: Marcel-Dekker, 2005. 379 p.

TORCHIO, P. Note on Lightning-Arresters on Italian High-Tension Transmission Lines. *In: Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 24, N° 10, p. 995-999, 1905.*

USHAKOV, V. Y. *Insulation of High-Voltage Equipment*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 421 p.

VAHEDY, V. Polymer Insulated High Voltage Cables. *In: IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, N° 3, p. 13-18, 2006.*

VAHLSTROM, W. Investigation of Insulation Deterioration in 15 kV and 22 kV Polyethylene Cables Removed from Service. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 91, p. 1023-1035, 1972.

VALLÉS-LLUCH, A.; CONTAT-RODRIGO, L.; RIBES-GREUS, A. Differential Scanning Calorimetry Studies on High- and Low-Density Annealed and Irradiated Polyethylenes: Influence of Aging. In: *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 89, p. 3260–3271, 2003.

VAN OSS, C. J.; CHAUDHURY, M. K.; GOOD, R. J. Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems. In: *Chemical Reviews*, N° 88, p. 927-941, 1988.

VAN OSS, C. J.; CHAUDHURY, M. K.; GOOD, R. J. Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems. In: *Chemical Reviews*, N° 88, p. 927-941, 1988.

VASILE, C. *Handbook of Polyolefins*. New York: Marcel-Dekker, 2000. 1032 p.

VASILE, C.; PASCU, M. *Practical Guide to Polyethylene*. Shawbury: Rapra Technology, 2005. 176 p.

VENKATESULU, B.; THOMAS, M. J. Corona Aging Studies on Silicone Rubber Nanocomposites. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 17, p. 625 – 634, 2010.

WANDERLEY NETO, E. T. Monitoramento e Diagnóstico de Para-raios a ZnO através de Redes Neurais Artificiais. Tese – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2007.

WATANABLE, K.; YAGYU, H.; SEKII, Y.; MARUMO, M. Development of New Water Tree Suppressive XLPE Cable. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1, N° 1, p. 27-33, 1986.

WOO, C. S.; CHOI, S. S.; LEE, S. B.; KIM, H. S. Useful Lifetime Prediction of Rubber Components Using Accelerated Testing. In: *Transactions on Reliability*, Vol. 59, N° 1, p. 11-17, 2010.

WOODWORTH, J. History of Arresters on Power Systems: 1890-1930 (2011). Disponível em < <http://www.arresterworks.com/>>. Acesso em: 11 de maio de 2015.

YANG, R.; YU, J.; LIU, Y.; WANG, K. Effects of inorganic fillers on the natural photo-oxidation of high-density polyethylene. *In: Polymer Degradation and Stability, Vol. 88, p. 333-340, 2005.*

ZIMMERMAN, M. L. Silicone Insulator: Lessons from 30 Years Experience in China. *In: INMR Magazine, Issue 105, Quarter 3, p. 30-44, 2014.*

ZIMMERNAM, M. L. Memorable Past Photos from 100 Issues of INMR – Part. *In: INMR Magazine, Issue 100, Quarter 2, p. 112-122, 2013.*