

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

MATHEUS BRATIROSSETTO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE NOVA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE
MATERIAIS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO
TRILHAMENTO ELÉTRICO COM BASE EM ANÁLISE TÉRMICA**

CURITIBA
2021

MATHEUS BRATIROSSETTO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE NOVA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE
MATERIAIS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO
TRILHAMENTO ELÉTRICO COM BASE EM ANÁLISE TÉRMICA**

Dissertação de Mestrado

**Área de concentração: Engenharia e
Ciência dos Materiais, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia e
Ciência dos Materiais - PIPE. Setor
de Tecnologia, Universidade Federal
do Paraná.**

Orientador: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

**CURITIBA
2021**

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus colegas de trabalho e amigos pessoais César Ricardo Hübsch, Albari Soares Mendes, Alison Baena de Oliveira Monteiro e Gabriel Diovani Buratto Remes por toda a inspiração, apoio e auxílio na montagem, idealização e inspiração para a execução deste projeto. Vocês me ensinaram muito e são uma grande referência de valores que eu trago para a minha vida. Gostaria de agradecer também aos pesquisadores do Lactec Guilherme Cunha da Silva e Fábio Scussiato Richart por ajudar a viabilizar o equipamento e as amostras necessárias para esse projeto. Agradeço também à COPEL e ao engenheiro Márcio Tonetti por ajudar na compra e custeio dos equipamentos utilizados para desenvolver este trabalho. Agradeço profunda e sinceramente também a meu orientador, prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho, por toda a dedicação, paciência e atenção ao longo do programa de mestrado. Agradeço minha noiva Fernanda e meus pais por todo o apoio e carinho que me deram e dão sempre. Sem vocês, nada seria possível. Por fim, agradeço a Deus por toda a força, coragem e sabedoria que Ele me concedeu.

“Eu acho que é algo que inato o desejo de saber como as coisas funcionam por dentro.”

(Grant Imahara)

“Paixão é o que te faz passar pelos momentos mais difíceis que podem tornar os homens fortes fracos, ou fazer você desistir.”

(Neil deGrasse-Tyson)

RESUMO

Em diversas aplicações nos sistemas elétricos de distribuição e transmissão, são utilizados materiais poliméricos como matéria prima. Isoladores, cabos, espaçadores, buchas, terminais e outros diversos equipamentos podem ter partes ou mesmo serem integralmente compostos por materiais como o polietileno e o silicone, por exemplo. Um dos principais modos de falha de tais materiais poliméricos ocorre quando existe a ação sinérgica entre poluentes, umidade, tensão elétrica e luz UV. Tais agentes agressores podem ser advindos de diversas fontes, como poluição de indústrias, solo trazido por meio do vento e névoa salina vindo do mar, e a água proveniente da umidade do ar e das chuvas. A ação conjunta de tais fatores leva ao trilhamento elétrico das superfícies dos equipamentos elétricos, causando degradação e erosão do material com diminuição da vida útil e possivelmente falhas e interrupções no fornecimento de energia. Dessa maneira, o fenômeno tem sido explorado e estudado nas últimas décadas e os fabricantes de matérias primas e equipamentos procuram cada vez mais fabricar produtos resistentes ao trilhamento elétrico. Diversas normas e ensaios foram desenvolvidos ao longo do tempo a fim de determinar e comparar a resistência de diferentes materiais ao trilhamento. Porém, as normas atuais possuem limitações. Os ensaios existentes possuem caráter classificatório, isto é, apenas determinam se certo material é aprovado ou reprovado para determinada aplicação. Contudo, não há comparações entre dois ou mais materiais aprovados para uma mesma categoria de tensão. O presente trabalho tem por intuito avaliar possíveis novas metodologias de análise que possam ser adicionadas aos ensaios atuais, sobretudo no que tange à absorção de energia do material polimérico. Análises de imagens termográfica e na região do visível, bem como a medição da variação da temperatura superficial em amostras de materiais poliméricos com concentrações variáveis de aditivos foram estudadas como uma nova forma de comparar o desempenho de tais amostras no ensaio de trilhamento elétrico em plano inclinado, estabelecendo a relação dos dados com as respectivas resistências ao trilhamento elétrico de cada amostra. A relação entre a taxa de variação de temperatura de cada composição testada e o seu comportamento no ensaio foi estabelecida. Amostras com temperatura mais estável e com menor variação apresentaram melhor desempenho no ensaio, ao passo que amostras nas quais a temperatura elevou-se em poucos minutos tenderam a falhar por trilhamento. Assim, pretende-se contribuir para obter ensaios mais conclusivos e ágeis, auxiliando no desenvolvimento de materiais e equipamentos mais resistentes, permitindo melhorar a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

Palavras-chave: trilhamento elétrico; distribuição de energia; materiais elétricos;

ABSTRACT

In various applications in electrical distribution and transmission systems, polymeric materials are used as raw materials. Insulators, cables, spacers, bushings, terminals and other various equipment may have parts or even be composed entirely of materials such as polyethylene and silicone, for example. One of the main modes of failure of such polymeric materials occurs when there is a synergistic action between pollutants, humidity, high voltage and UV radiation. Those aggressors can come from various sources, such as pollution from industries, soil brought through wind and saline mist from the sea, and the water from air humidity and rains. The joint action of these factors leads to the electrical tracking of the surfaces of electrical equipment, causing degradation and erosion of the material with decreased service life and possibly failures and interruptions in the power supply. Thus, the phenomenon has been explored and studied in recent decades and manufacturers of raw materials and equipment are increasingly seeking to manufacture products resistant to electric tracking. Several standards and tests have been developed over time in order to determine and compare the resistance of different materials to the tracking and erosion. However, current standards have limitations. Existing tests are classificatory in nature, that is, they only determine whether certain material is approved or disapproved for a given application. However, there are no comparisons between two or more approved materials for the same voltage category. The present work aims to evaluate possible new methodologies of analysis that can be added to current tests, especially with regard to the energy absorption of the polymeric materials. Thermographic and visible spectrum imaging analyses, as well as the measurement of the average superficial temperature rise on the specimens were studied as a new way to compare the performance of various materials, establishing the correlation of such data with the respective resistances to electrical tracking. The relationship between the temperature variation rate of each tested composition and its behavior in the test was determined. Samples with more stable temperature and lower variation showed better performance in the test, while samples in which the temperature increased greatly in a few minutes tended to fail by tracking. With that, more conclusive and agile tests can be obtained, assisting in the development of more resistant materials and equipment, allowing improving the quality and reliability of the power grid.

Keywords: electrical tracking; power distribution; electrical materials;

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	15
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação e Justificativa.....	1
1.2. Objetivos.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1. Materiais Poliméricos Utilizados no Setor Elétrico	4
2.1.1. O Transporte da Energia Elétrica – Transmissão e Distribuição.....	4
2.1.2. As Redes Elétricas Compactas de Distribuição.....	5
2.1.3. Os Principais Tipos de Equipamentos das Redes Compactas	10
2.2. Aditivos Aplicados aos Polímeros do Setor Elétrico.....	15
2.3. Os Polímeros Sujeitos ao Campo Elétrico - Dielétricos.....	20
2.4. Ruptura Dielétrica	22
2.5. O Fenômeno do Trilhamento Elétrico em Materiais Dielétricos	27
2.6. Degradação de Polímeros devida ao Trilhamento Elétrico.....	29
2.6.1. Análise da Degradação – Entalpias de Formação	32
2.6.2. Análise da Degradação – Energia Absorvida.....	34
2.6.3. Análise da Degradação – Ligações	35
2.6.4. Análise da Degradação – Efeito de Aditivos à Base de Hidróxidos Metálicos Hidratados	37
2.7. Cenário Científico.....	39
2.7.1. Evolução das Metodologias de Teste de Resistência ao Trilhamento Elétrico	39
2.7.2. Trabalhos Correlatos.....	40

2.8.	Normas e Ensaio Atuais	43
2.8.1.	O Trilhamento Elétrico em Plano Inclinado	43
3.	MATERIAIS E METODOLOGIA	51
3.1.	Ambiente de Ensaio.....	51
3.2.	Mesas de Trilhamento.....	52
3.3.	Procedimentos gerais de ensaio	55
3.4.	Sistema de Detecção de Sobrecorrente	58
3.5.	Câmeras de Monitoramento.....	65
3.6.	Medição da Temperatura e Imagens Térmicas	67
3.7.	Amostras	71
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4.1.	Resultados dos Ensaio	74
4.2.	Registro Termográfico.....	80
4.3.	Análise dos Resultados e Discussão.....	91
	REFERÊNCIAS	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de uma rede de distribuição convencional	5
Figura 2 – Imagens com exemplos de trechos redes compactas	6
Figura 3 - Ilustração de topologias de rede compacta	7
Figura 4 – Ilustração na diferença na área de poda (em vermelho) de uma rede convencional (esq.) e uma rede compacta (dir.).....	8
Figura 5 – Imagens ilustrativas de diferentes tipos de isoladores utilizados em redes compactas de distribuição – a) Isolador tipo suspensão ou ancoragem; b) Isolador tipo pino; c) Isolador tipo pilar	10
Figura 6 – Ilustração do conceito de distância de escoamento de um isolador.....	11
Figura 7 – Ilustração de espaçador losangular (esq.) e espaçador linear (dir.).....	11
Figura 8 – Ilustração da construção típica de um cabo isolado.....	12
Figura 9 – Imagens ilustrativas de acessórios diversos de redes compactas - a) Cruzeta; b) Anel para amarração; c) Braço anti-balanço.....	13
Figura 10 – Representação gráfica da variação da rigidez dielétrica com o tempo de aplicação da tensão e diferentes mecanismos de ruptura associados.....	22
Figura 11 - Representação esquemática das bandas de energia em metais, semicondutores e isolantes.....	23
Figura 12 - Ilustração de arborescências em um cabo isolado	24
Figura 13 – Imagem ilustrativa de descarga superficial durante ensaio de trilhamento elétrico.....	25
Figura 14 – Fotografia de trecho de linha compacta de 35 kV degradada por trilhamento elétrico.....	26
Figura 15 - O fenômeno do trilhamento elétrico – Ilustração do processo teórico.....	28
Figura 16 - O fenômeno do trilhamento elétrico – Ilustração do fenômeno com imagens de um exemplo prático.....	28
Figura 17 – Diagrama esquemático dos processos físicos e químicos de degradação térmica de materiais poliméricos.....	29

Figura 18 – Ilustração esquemática dos mecanismos de feedback positivo de calor no trilhamento elétrico	30
Figura 19 – Diagrama esquemático dos mecanismos de degradação a nível molecular de polímeros sob trilhamento elétrico.....	31
Figura 20 – Gráfico relacionando a resistência ao trilhamento elétrico e a razão entre entalpias de ligações que liberam carbono e as entalpias totais da molécula de polímero (Equação 3)	33
Figura 21 – Representação esquemática do aparato de ensaio para medição de energia aplicada em polímeros sujeitos ao trilhamento elétrico	34
Figura 22 – Curva da energia dissipada instantânea de uma amostra de HDPE.....	35
Figura 23 – Representação esquemática do processo de quebra de ligações em polímeros	35
Figura 24 – Representação esquemática das diferentes ligações químicas de moléculas de polímeros e suas energias de ligação.....	36
Figura 25 – Resultados de ensaio de DSC de um composto de silicone com ATH versus sem ATH mostrando o calor absorvido pela reação de desidratação do aditivo.....	38
Figura 26 – Imagens dos Eletrodos do método “Admiralty”	39
Figura 27 – Ilustração da metodologia Proposta por Gorur et. al (1997)	41
Figura 28 – Ilustração da metodologia proposta por Rowland et. al. (2011)	41
Figura 29 - Ilustração da metodologia utilizada por Khan et. al. (2017)	42
Figura 30 - Ensaio de resistência ao trilhamento elétrico – Ilustração da montagem da amostra e dos eletrodos	43
Figura 31 - Ensaio de resistência ao trilhamento elétrico – Representação esquemática do circuito de alta tensão	44
Figura 32 - Ensaio de resistência ao trilhamento elétrico – Diagrama esquemático de um circuito de sobrecorrente típico.....	46

Figura 33 – Ilustração das especificações técnicas do papel filtro (esq.) e eletrodo superior (dir.)	47
Figura 34 – Gráfico do efeito de diferentes concentrações de contaminante (escala log-log) Fonte: Adaptado de Mathes e McGowan, 1961	48
Figura 35 – Imagem da montagem da amostra no ensaio de trilhamento elétrico – vista superior	50
Figura 36 – Imagem da montagem da amostra no ensaio de trilhamento elétrico – vista inferior.....	50
Figura 37 – Imagem do ambiente de ensaio	51
Figura 38 – Imagem da bancada de ensaios.....	52
Figura 39 – Imagem dos dados de placa dos transformadores de potencial.....	53
Figura 40 – Imagem da bomba peristáltica	54
Figura 41 - Princípio de funcionamento da bomba peristáltica.....	54
Figura 42 – Imagem do equipamento de medição da condutividade do líquido contaminante.....	56
Figura 43 – Imagem ilustrativa do posicionamento de proveta para verificação da vazão do eletrólito.....	57
Figura 44 – Imagem de uma das gavetas das mesas de trilhamento	58
Figura 45 – Imagem de uma das placas eletrônicas do sistema de detecção de sobrecorrente	59
Figura 46 - Diagrama esquemático do circuito eletrônico das placas do sistema de detecção de sobrecorrente.....	60
Figura 47 - Diagrama de blocos do circuito eletrônico das placas do sistema de detecção de sobrecorrente	61
Figura 48 - Utilização de resistor <i>shunt</i> para a leitura do sinal de corrente.....	62
Figura 49 – Imagem de um dos resistores <i>shunt</i> dos sistemas de sobrecorrente.....	62
Figura 50 – Imagem do padrão de corrente utilizado para a verificação do sistema de sobrecorrente	63

Figura 51 – Imagem das câmeras de vídeo - espectro visível	65
Figura 52 – Imagens da evolução do processo de trilhamento elétrico	66
Figura 53 – Imagem das câmeras de imagem térmica - espectro infravermelho.....	67
Figura 54 - Imagem térmica do processo de trilhamento elétrico	68
Figura 55 – Imagem do sistema de medição da temperatura média superficial das amostras.....	69
Figura 56 – Exemplo de gráfico resultante do acompanhamento da temperatura superficial média dos corpos de prova sob ensaio	70
Figura 57 – Diagrama representativo do campo visual dos sensores de temperatura	70
Figura 58 – Representação esquemática do corpo de prova padrão para os ensaios de resistência ao trilhamento elétrico em plano inclinado	71
Figura 59 – Ilustração do processo de moldagem por termoprensagem.....	73
Figura 60 – Imagem da termoprensa utilizada na confecção de amostras	73
Figura 61 – Sequência de imagens do processo de falha da Amostra PE_0%.....	75
Figura 62 - Sequência de imagens do processo de falha da Amostra PE_5%	76
Figura 63 – Sequência de imagens do processo de falha da Amostra PE_10%	77
Figura 64 – Imagem dos minutos finais do ensaio da Amostra PE_15%	78
Figura 65 – Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_0% ao longo do ensaio - Todos os CPs	80
Figura 66 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_0% ao longo do ensaio - CP4.....	81
Figura 67 - Imagem térmica mostrando a distribuição de temperatura na amostra PE_0%.....	82
Figura 68 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_5% ao longo do ensaio - Todos os CPs.....	83
Figura 69 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_5% ao longo do ensaio - CP1	83

Figura 70 - Imagem térmica mostrando a distribuição de temperatura na Amostra PE_5%	84
Figura 71- Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_10% ao longo do ensaio - Todos os CPs	85
Figura 72 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_10% ao longo do ensaio - CP3	86
Figura 73 - Imagem térmica mostrando a distribuição de temperatura na Amostra PE_10%	87
Figura 74 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_15% ao longo do ensaio - Todos os CPs	88
Figura 75 – Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_15% ao longo do ensaio - CP4	89
Figura 76 – Imagem térmica mostrando a distribuição de temperatura na Amostra PE_15%	90
Figura 77 – Gráfico contendo a comparação entre as formulações quanto à temperatura nos patamares finais do ensaio.....	92
Figura 78 – Gráfico da taxa de elevação de temperatura no patamar de falha de cada formulação	93
Figura 79 - Comparação das imagens térmicas mostrando a distribuição de energia nas diferentes formulações testadas	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Redução do número de falhas após adoção da rede compacta	9
Tabela 2 – Resumo dos principais materiais utilizados nos componentes de redes compactas	14
Tabela 3 – Resumo dos principais efeitos das cargas de preenchimento nas propriedades dos compostos poliméricos	18
Tabela 4 - Rigidez dielétrica de alguns materiais isolantes.....	21
Tabela 5 – Resumo dos parâmetros de ensaio.....	46
Tabela 6 - Tensões de ensaio para acessórios poliméricos	49
Tabela 7 - Tensões de ensaio para isoladores do tipo pino.....	49
Tabela 8 - Composição em massa do líquido contaminante para diferentes volumes.....	55
Tabela 9 – Resultados da verificação das correntes de disparo das placas de sobrecorrente	64
Tabela 10 – Resultados da verificação dos tempos de disparo das placas de sobrecorrente	64
Tabela 11 - Formulações de polietileno avaliadas.....	72
Tabela 12 – Resultados da Amostra PE_0%.....	74
Tabela 13 - Resultados da Amostra PE_5%	75
Tabela 14 - Resultados da Amostra PE_10%	76
Tabela 15 - Resultados da Amostra PE_15%	78
Tabela 16 - Resumo dos resultados obtidos	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
ATH	Alumina Tri-Hidratada
C ₂ H ₄	Etileno
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina (Concessionária)
CIGRÈ	Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
CP	Corpo de Prova
DBA	Arcos de Bandas Secas (<i>Dry-Band Arcing</i>)
EPR	Borracha de Etileno-Propileno
ES	Espírito Santo (UF)
HDPE	Polietileno de Alta Densidade (ou PEAD)
IV	Infravermelho
LDPE	Polietileno de Baixa Densidade (ou PEBD)
Mg(OH) ₂	Hidróxido de Magnésio
NBI	Nível Básico de Isolamento
NBR	Norma Brasileira
NH ₄ Cl	Cloreto de Amônio
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PRFV	Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
RBC	Rede Brasileira de Calibração
UV	Ultravioleta
XLPE	Polietileno Entrecruzado

1. INTRODUÇÃO

Materiais poliméricos são atualmente amplamente utilizados como matéria prima para a confecção de equipamentos empregados na estrutura de isolamento das redes de distribuição por causa de suas propriedades dielétricas superiores, peso leve e compacto, quando comparado com os isoladores de porcelana ou vidro (Gorur et al 1999).

Um dos principais meios de falha em materiais poliméricos aplicados em eletricidade é o fenômeno do trilhamento elétrico, geralmente associado a contaminantes e água presentes nas suas superfícies (Sarathi, 2003). É um fenômeno, portanto, que consiste em arco elétrico induzido como resultado do efeito sinérgico de tensão, umidade e poluição.

Uma vez que o trilhamento ocorre, a propriedade de isolamento elétrico de superfície é perdida completamente e nunca se recupera, gerando falhas nos equipamentos elétricos da rede de distribuição, desligamentos de energia e interrupções de fornecimento. Por causa disso, o fenômeno é amplamente estudado em todo o mundo.

1.1. Motivação e Justificativa

O fenômeno do trilhamento elétrico pode ser descrito por meio da análise de como o material interage com a energia aplicada nele. Assim, analisar o comportamento térmico de amostras no ensaio de Resistência ao Trilhamento em Plano Inclinado pode oferecer informações importantes acerca do desempenho desses materiais em campo. Por exemplo, várias blindas de polímeros, com diferentes aditivos podem ser estudadas e, mais importante, comparadas a fim de se obter padrões de comportamento que possam ser utilizados para comparar e classificar materiais.

A análise sob a ótica da termodinâmica, conforme apresentada neste documento, é um meio de prever ou ao menos estimar o comportamento dos diversos materiais empregados no setor elétrico frente ao campo elétrico e as intempéries e fenômenos que os levam à degradação.

Trata-se, portanto, de uma oportunidade de melhor caracterizar e comparar materiais a serem aplicados em diversos equipamentos elétricos sujeitos a estresses que possam causar o trilhamento elétrico de suas superfícies. Tal característica se torna cada vez mais importante à medida que novas tecnologias em engenharia de materiais permitem com que estes obtenham desempenhos cada vez melhores, testando os limites das normas e métodos atuais de resistência ao trilhamento elétrico. Obter uma metodologia válida e confiável de comparação de desempenho entre diferentes materiais é, sem dúvida, essencial nesse processo de desenvolvimento.

O presente trabalho proposto tem, portanto potencial de contribuir para melhorar a maneira como os materiais poliméricos são testados no que tange às suas resistências ao trilhamento elétrico. Assim, o trabalho pode contribuir para melhorar a confiabilidade e sobretudo, a segurança dos equipamentos elétricos e redes de distribuição e transmissão.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo propor e estudar uma nova metodologia de análise dos materiais sujeitos a ensaios de resistência ao trilhamento elétrico baseada no acompanhamento de dados de temperatura, imagem térmica e fotografia, a fim de estudar padrões e tendências que possam ser utilizados para caracterizar e classificar os materiais.

As normas e procedimentos atuais para trilhamento elétrico (entre elas, ABNT NBR 10296 e ASTM D2303) propõem metodologias de ensaios que visam classificar e categorizar amostras (em geral, cinco corpos-de-prova iguais) de materiais com base em suportabilidade, isto é, se o material suporta ou não determinadas condições de ensaio. As normas não preveem, portanto, comparações de desempenho entre duas amostras que suportaram (ou falharam) o mesmo patamar de ensaio. O presente trabalho proposto possui o potencial, por meio do acompanhamento individual dos dados de temperatura, imagem e corrente para cada corpo-de-prova, estudar metodologias que permitam comparar o desempenho de diferentes compostos e materiais.

Como objetivos específicos para este trabalho, pode-se elencar o seguinte:

- a) Avaliar o comportamento de diferentes formulações de um mesmo composto a base de polímero frente às agressões múltiplas proporcionadas pelo ensaio de Resistência ao Trilhamento Elétrico sob Severas Condições Ambientais;
- b) Avaliar e compreender os limites e defeitos das normas atuais que regem o ensaio e estudar maneiras e metodologias para abordar tais limitações normativas;
- c) Analisar termicamente e por meio de imagem, tanto no espectro de luz visível quanto no de infravermelha, as diferentes formulações de polímero sob ensaio;
- d) Estudar os dados e resultados obtidos a fim de identificar padrões de comportamento que possam prever antecipadamente o sucesso ou falha de um material em determinada condição de ensaio;
- e) Avaliar se os padrões obtidos permitem, em tese, elaborar uma nova metodologia de análise que possa vir a ser adotada por normas de ensaio no futuro e/ou como fonte de informação para o desenvolvimento de novas formulações de polímeros e compostos resistentes ao trilhamento elétrico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados alguns dos conceitos principais relacionados ao tema desenvolvido no presente trabalho, facilitando o entendimento e contextualizando o assunto e sua importância para o setor elétrico.

2.1. Materiais Poliméricos Utilizados no Setor Elétrico

2.1.1. O Transporte da Energia Elétrica – Transmissão e Distribuição

De maneira geral, a transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil e no mundo é realizada por meio de linhas aéreas convencionais, isto é, baseada em cabos nus e isoladores cerâmicos ou de vidro. São raros os casos nos quais linhas subterrâneas ou outras topologias são utilizadas. Contudo, nos últimos anos, o emprego de materiais poliméricos tem se tornado cada vez mais comum com a popularização das redes de distribuição compactas nas concessionárias, tornando cada vez mais importantes as pesquisas e estudos nesse tema. (Lima, 2008).

O segmento de transmissão de energia elétrica é aquele responsável por transportar quantidades elevadas de energia, geralmente de grandes centros de geração para grandes centros consumidores. No Brasil, o segmento de transmissão é aquele que se caracteriza por operar linhas em tensão elétrica superior a 230 mil volts (ABRADEE, 2021).

Já o segmento de distribuição é o que recebe energia das linhas de transmissão e a leva de forma disseminada a todos os consumidores de médio e pequeno porte, proporcionando capilaridade ao sistema elétrico. No Brasil, existem mais de 53 concessionárias, que são responsáveis por operar, gerir e manter, geralmente em regime de concessão, sobretudo as redes de média e baixa tensão, como aquelas instaladas nas ruas e avenidas das grandes cidades (ABRADEE, 2021).

No caso das redes de distribuição, materiais poliméricos têm sido utilizado com mais frequência nos últimos 40 anos para a construção de diversos acessórios para as redes compactas de distribuição e também como material isolante, sobretudo na isolação de cabos (Lima, 2008).

Interrupções nas redes podem gerar diversos transtornos e prejuízos tanto às concessionárias quanto aos seus consumidores. Além de estarem sujeitas a

penalizações pecuniárias em forma de multas caso os indicadores de qualidade e continuidade do fornecimento de energia não estejam de acordo com as normas, as empresas concessionárias podem ser forçadas a indenizar consumidores pela perda de produtos perecíveis ou paralização das linhas de produção nas indústrias (Nóbrega, 2011).

Assim, sendo o trilhamento elétrico um dos principais causadores de falhas e faltas nas redes e equipamentos elétricos que utilizam materiais poliméricos sujeitos a poluição e intempéries – isto é, sobretudo nas redes compactas de distribuição instaladas em áreas fabris ou litorâneas – é de fundamental importância entender, estudar e simular com propriedade o fenômeno e suas repercussões.

2.1.2. As Redes Elétricas Compactas de Distribuição

Uma rede de distribuição convencional, é geralmente composta de postes de concreto, cruzetas de madeira, isoladores de vidro e porcelana e cabos nus (sem capa). Geralmente, tal tipo de rede é montado conforme mostra a Figura 1, isto é, com os cabos dispostos em isoladores na horizontal na rede primária (alta tensão) e verticalmente nas redes secundárias (baixa tensão) (Ribeiro, 2008).

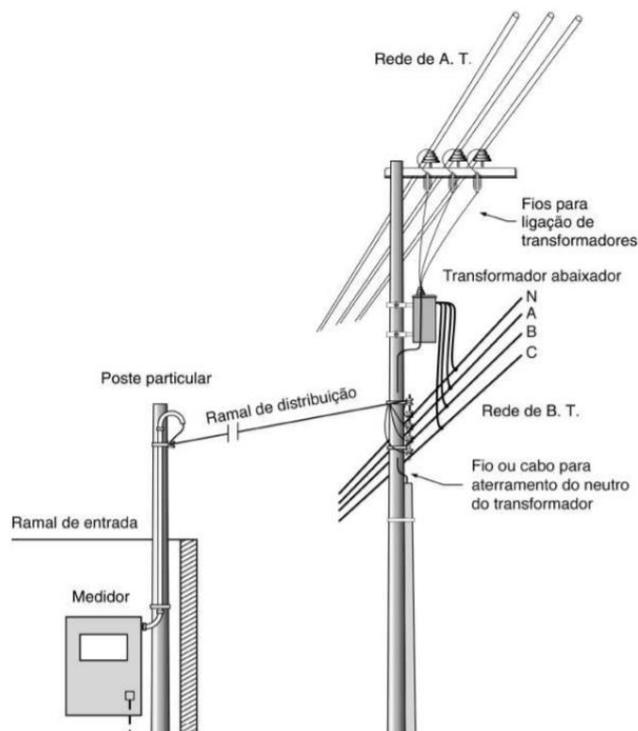


Figura 1 - Ilustração de uma rede de distribuição convencional
Fonte: (Creder, 2013)

Com a maior disponibilidade e redução substancial dos custos de materiais poliméricos desde a década de 50 até hoje, foi possível a produção de cabos com isolação polimérica por extrusão, sobre tudo de Polietileno e PVC (Lima, 2008). Além disso, o desenvolvimento de compostos poliméricos mais resistentes mecanicamente e mais estáveis perante a radiação ultravioleta, a fabricação de acessórios poliméricos para suportar tais cabos se tornou factível (Nóbrega, 2011). A Figura 2 mostra exemplos de linhas compactas de distribuição.



Figura 2 – Imagens com exemplos de trechos redes compactas

Fonte: Ribeiro (2008).

Assim surgiram as redes compactas de distribuição, que apresentam uma série de vantagens em relação às convencionais (Nóbrega, 2011). Basicamente, são redes suportadas por um cabo de aço mensageiro, fixado ao poste por meio de um suporte metálico ou por isoladores de suspensão. Os espaçadores losangulares (ou lineares) são suspensos no cabo mensageiro, sustentando os cabos em seus berços (Freitas, 2010), conforme mostra a Figura 3.

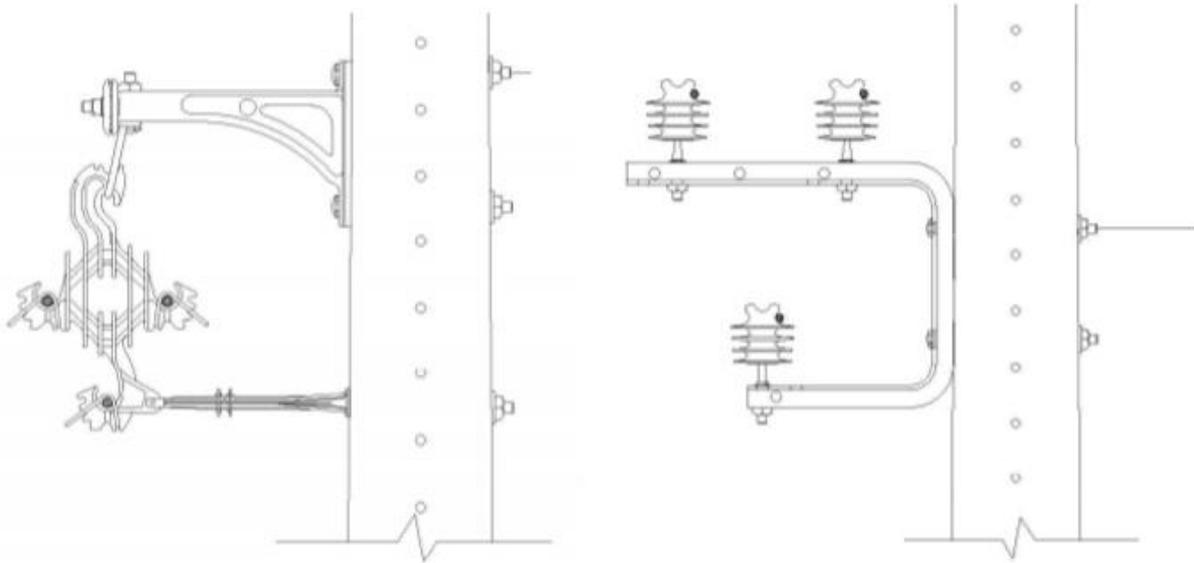


Figura 3 - Ilustração de topologias de rede compacta

Fonte: FECOERUSC (2010)

Dentre as vantagens das redes compactas está a possibilidade de utilizar vários circuitos em um mesmo poste e o aumento na confiabilidade e do Nível Básico de Isolamento (NBI) das redes (Nóbrega, 2011). Além disso, o fato de existir um material dielétrico entre o condutor e o ar, permite que os cabos sejam instalados com distanciamento menor entre si e permitem ainda toques eventuais de galhos de árvores e folhas. Assim, reduz-se o impacto ambiental das redes e a necessidade de podas agressivas na arborização urbana (Nóbrega, 2011). A Figura 4 ilustra a diferença na área de poda de uma árvore próxima a uma rede compacta e no caso de uma rede convencional.

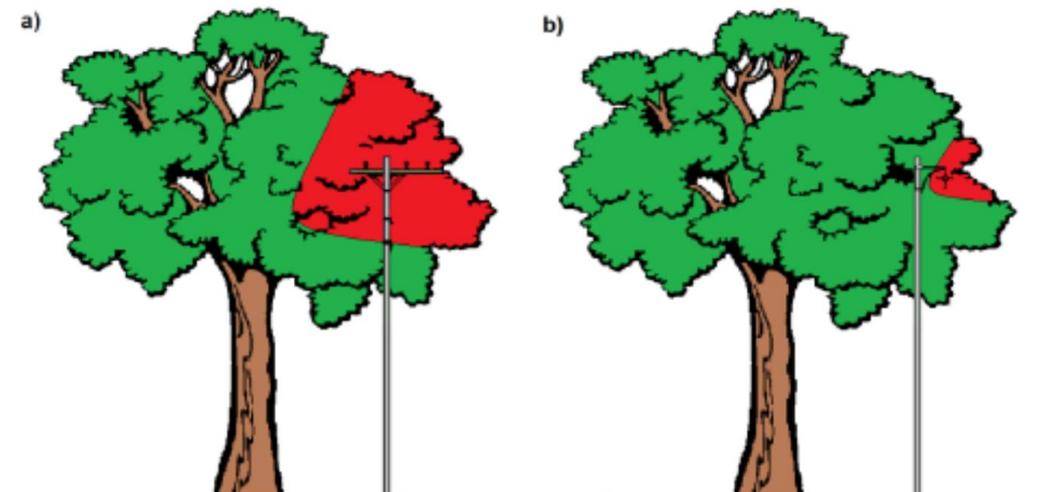


Figura 4 – Ilustração na diferença na área de poda (em vermelho) de uma rede convencional (esq.) e uma rede compacta (dir.).

Fonte: Nóbrega (2011)

As redes compactas de distribuição podem, ademais, contribuir para a redução dos custos e aumento da confiabilidade do sistema elétrico. Um exemplo é o estudo realizado pela concessionária Escelsa – ES, constituído de um levantamento comparativo do número e causa de falhas antes e após a substituição de um trecho de rede convencional por compacta na cidade de Cachoeira do Itapemirim – ES (Segatto, 2008). Analisando os dados, apresentados na Tabela 1, é possível constatar redução no número de ocorrências após a instalação da rede compacta no local. O fato de a rede compacta ser menos sensível a eventuais contatos com galhos de árvores e outros corpos estranhos permite essa melhoria na confiabilidade constatada.

Tabela 1 - Redução do número de falhas após adoção da rede compacta

Causa	Rede Convencional					Rede Compacta				Redução nas Ocorrências
	Ocorrências Anuais					Ocorrências Anuais				
	2001	2002	2003	Total	Média Anual	2005	2006	Total	Média Anual	
Pipa	7	8	19	34	11,33	2	--	2	1	91,2%
Deterioração de Material	2	--	--	2	0,67	1	1	2	1	-50,0%
Falha Humana	2	--	--	2	0,67	--	--	0	0	100,0%
Objeto na Rede	1	--	--	1	0,33	--	--	0	0	100,0%
Árvore	1	--	--	1	0,33	--	--	0	0	100,0%
Causa Ignorada	1	4	2	7	2,33	--	--	0	0	100,0%
Choques Mecânicos	--	1	1	2	0,67	--	--	0	0	100,0%
Temporal	--	1	4	5	1,67	2	2	4	2	-20,0%
Animal	--		1	1	0,33			0	0	100,0%
TOTAL	14	14	27	55	18,33	5	3	8	4	78,2%

Fonte: Adaptado de Segatto, 2008

Cabem algumas ressalvas, porém, com relação às redes de distribuição compactas. Conforme será explorado ao longo deste trabalho, o emprego de materiais poliméricos em ambientes com significativa poluição atmosférica, sinergicamente à ação do campo elétrico e em presença de umidade e chuva, podem acelerar drasticamente processos de degradação nos polímeros, levando a falhas precoces nos equipamentos. Não obstante, é possível observar na Tabela 1 que, apesar da redução nas falhas causadas por contato com fauna, flora e outros objetos alheios à rede, o número de ocorrências por temporais e deterioração dos materiais constituintes da rede na verdade aumentou, o que corrobora o fato de redes de distribuição compactas podem estar sujeitas à ação concomitante de poluentes e água.

A avaliação com base na medição dos níveis de poluição local, bem como um estudo das condições climáticas do local de instalação das redes é portanto, de fundamental importância, tanto no projeto como na seleção do tipo de equipamentos e acessórios a serem empregados na construção das redes de distribuição (Cigrè, 2007). Para estabelecer o nível de poluição, por exemplo, pode-se medir o depósito superficial de poluentes em um isolador, assim como medidores de depósito de poeira direcionais podem ser utilizados (Cigrè, 2007). O documento técnico Cigrè *“Guide for the establishment of naturally polluted insulator testing stations – Ref. 333 – WG B2.03”*, de 2007, estabelece algumas metodologias para a classificação de níveis de poluição local, bem como os métodos e ensaios para a medição e categorização da poluição local.

2.1.3. Os Principais Tipos de Equipamentos das Redes Compactas

A montagem e a construção das redes compactas de distribuição envolvem vários equipamentos, acessórios, elementos estruturais e, por conseguinte, materiais poliméricos. Os principais componentes das redes compactas podem ser resumidos conforme segue:

- Isoladores: Têm – conforme o nome indica – a função principal de isolar os cabos das demais estruturas que, via de regra, estão sob potencial nulo ou aterradas, sobretudo postes, cruzetas e ferragens. Além disso, servem a função de suporte mecânico dos cabos, sustentando o seus pesos e servindo de ancoragem a tais componentes. Podem ser de vários tipos e materiais, conforme mostrado na Figura 5. Normalmente, tais equipamentos possuem saias de modo a aumentar as suas distâncias de escoamento, isto é, a distância que uma descarga - ou trilhamento - superficial teria que percorrer para vencer a isolação do isolador (CELESC, 2009). A Figura 6 ilustra esse conceito.

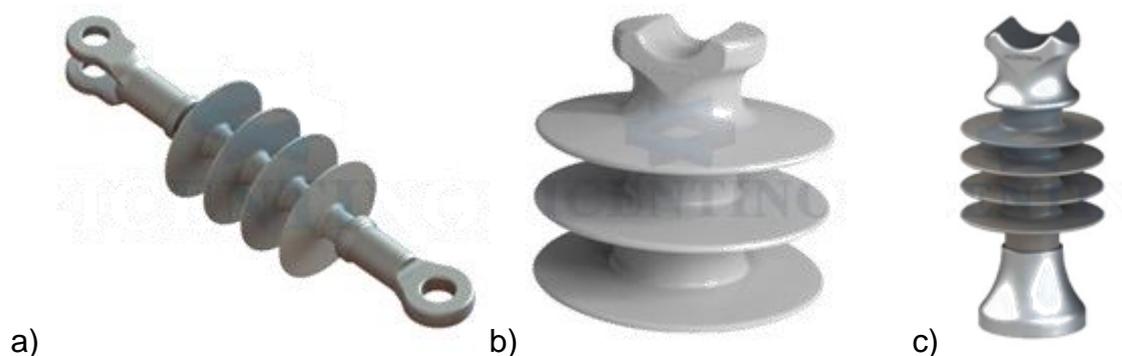


Figura 5 – Imagens ilustrativas de diferentes tipos de isoladores utilizados em redes compactas de distribuição – a) Isolador tipo suspensão ou ancoragem; b) Isolador tipo pino; c) Isolador tipo pilar

Fonte: (Vicentinos, 2018)

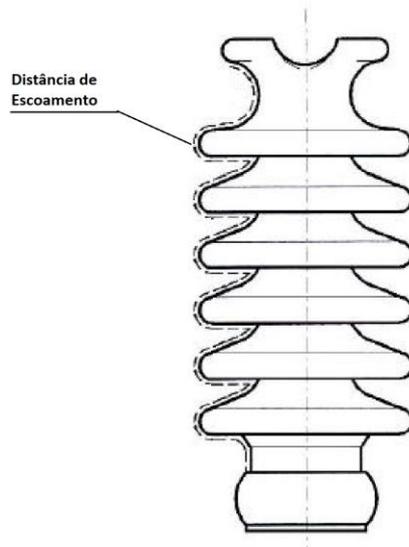


Figura 6 – Ilustração do conceito de distância de escoamento de um isolador
 Fonte: Adaptado de (CELESC, 2009).

- Espaçadores: Possuem a função de distanciar os cabos que constituem cada fase da rede e ao mesmo tempo, prover suporte mecânico a tais cabos nos vãos entre os postes. São suspensos em um cabo de aço, chamado cabo mensageiro e por suas vezes, suspendem os cabos condutores. Geralmente possuem formato losangular, mas podem também ser lineares (CELESC, 2009). A Figura 7 ilustra esse tipo de equipamento.

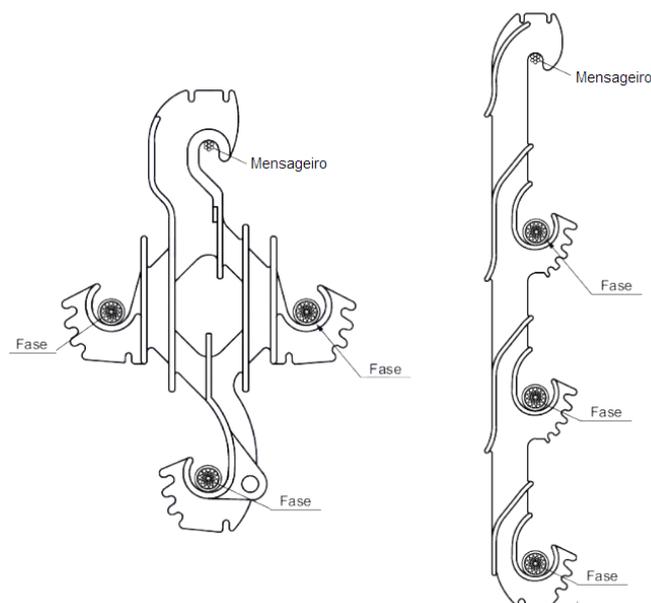


Figura 7 – Ilustração de espaçador losangular (esq.) e espaçador linear (dir.)
 Fonte: Adaptado de (ABNT, 2017).

- Cabos cobertos: São denominados cabos cobertos, aqueles cujos condutores (na maioria das vezes compostos de alumínio) são recobertos diretamente por materiais poliméricos isolantes. Tais cabos propiciam certa resistência a contatos eventuais de fauna e flora e também a diminuição da distância exigida entre os condutores mas, por não confinar completamente o campo elétrico devido à ausência de uma blindagem metálica, apresentam valor de campo não nulo em suas superfícies e não são, portanto considerados isolados (Nóbrega, 2011).

A fim de suavizarem as linhas de campo elétrico nos seus interiores, evitando gradientes elevados e por consequência, diferenças grandes de potencial elétrico que possam causar a falha dos materiais poliméricos que os constituem, muitos cabos possuem uma camada semicondutora, que tem a função de propiciar uma transição suave entre o material condutor e o isolante (Ribeiro Júnior, 2008). A Figura 8 ilustra uma construção típica de cabo coberto com semicondutora.

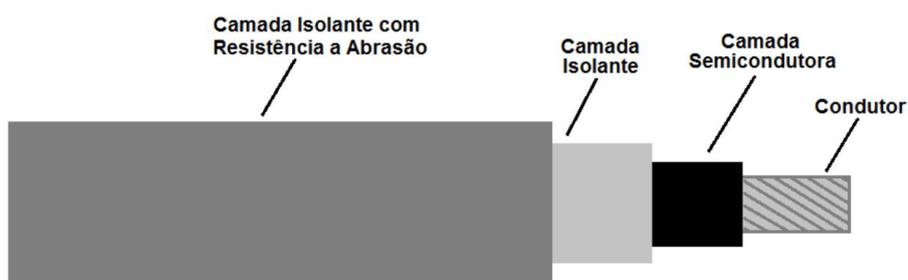


Figura 8 – Ilustração da construção típica de um cabo isolado
Fonte: (Nóbrega, 2011).

- Cruzetas, suportes e amarrações: Podem ser compostos de diversos materiais poliméricos e compósitos e também por aço. Tem a função de alicerçar mecanicamente os isoladores e demais componentes da rede (CELESC, 2009). Alguns exemplos de acessórios são mostrados na Figura 9.

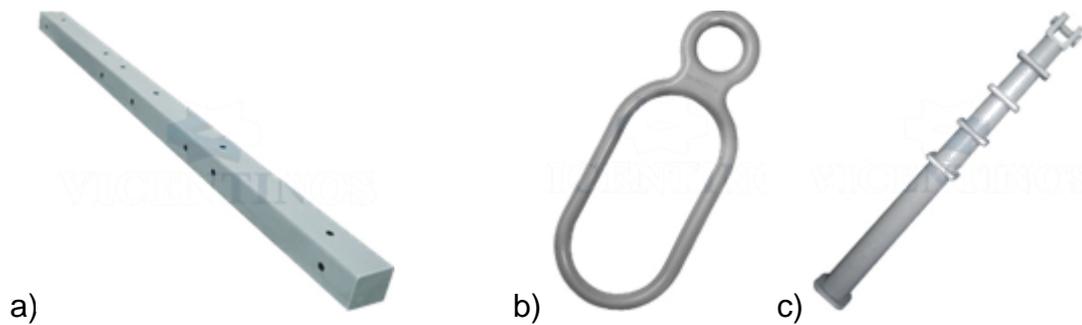


Figura 9 – Imagens ilustrativas de acessórios diversos de redes compactas - a) Cruzeta; b) Anel para amarração; c) Braço anti-balanço

Fonte: (Vicentinos, 2018).

Os principais materiais utilizados nas redes compactas estão resumidos na Tabela 2, apresentada a seguir. Conforme é possível observar, uma grande variedade de materiais poliméricos são empregados em tais redes.

Tabela 2 – Resumo dos principais materiais utilizados nos componentes de redes compactas

Equipamento	Componentes	Materiais Utilizados
Cruzetas	Corpo	Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)
	Cobertura	Resina Poliéster (Gel Coating)
	Tampas e Reforços	Poliétileno de Alta Densidade (HDPE)
Espaçadores Losangulares	Corpo	Poliétileno de Alta Densidade (HDPE)
Espaçadores Verticais	Corpo	Poliétileno de Alta Densidade (HDPE)
Isoladores Tipo Pino ou Pilar	Corpo	Poliétileno de Alta Densidade (HDPE) Cerâmica (Porcelana Aluminosa) ou Vidro
	Ferragens	Aço e Ligas de Alumínio
Isoladores de Suspensão Tipo Bastão	Núcleo	Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)
	Corpo e saias	Silicone (siloxano)
	Ferragens	Aço e Ligas de Alumínio
Suportes tipo "L" e tipo "C"	Corpo	Aço e Ligas de Alumínio
Braço Anti-Balanço	Corpo	Poliamida
Cabos Cobertos ou Isolados	Condutor	Alumínio
	Alma	Aço e Ligas de Alumínio
	Semicondutora	Polímeros Aditivados
	Capa	Poliétileno de Alta Densidade (HDPE) Poliétileno Entrecruzado (XLPE) Borracha de Etileno Propileno (EPR)
Transformadores a Seco	Isolação do Núcleo	Resina Epóxi
Anéis e Laços de Amarração	Corpo	Silicone (siloxano)
		Poliétileno de Alta Densidade (HDPE)

Fonte: Resumido de ABNT, 2014

2.2. Aditivos Aplicados aos Polímeros do Setor Elétrico

Nas aplicações práticas, dificilmente os materiais poliméricos são utilizados em suas formas puras. Geralmente são adicionadas outras substâncias químicas a fim de melhorar as características e a durabilidade dos polímeros. A tecnologia de aditivação de diferentes tipos de polímeros vem se desenvolvendo consideravelmente desde o fim da II Guerra Mundial ao ponto que atualmente, é possível afirmar que virtualmente todos os polímeros comerciais recebem algum tipo de aditivo em pelo menos uma das etapas do seu processamento (De Paoli, 2013).

De maneira geral, é possível classificar os aditivos mais frequentemente empregados na indústria da seguinte maneira (De Paoli, 2013):

- Auxiliares de processo: lubrificantes e solventes que facilitam os processos de injeção, extrusão e processamento do material;
- Estabilizantes: substâncias capazes de proporcionar ao polímero maior estabilidade e resistência à degradação de suas moléculas. Entre eles estão os antioxidantes, aditivos anti-UV, fungicidas e bactericidas, estabilizantes térmicos, entre outros;
- Modificadores de Propriedades: aditivos que conferem ao polímero características e propriedades melhoradas ou diferenciadas em relação ao material puro, visando adequá-lo às aplicações ao qual este se destina. Entre eles estão os retardantes de chama, os pigmentos e corantes, as cargas de preenchimento e os plastificantes.

A utilização de tais aditivos porém, é uma tarefa complexa e que exige muitos cuidados. Muitos dos aditivos mais comuns ao melhorar algumas das características do polímero podem ter ações antagônicas em outras. Um exemplo é o negro de fumo que, apesar de tornar os materiais mais resistentes à degradação por luz ultravioleta, pode reduzir a resistência ao trilhamento elétrico dependendo da quantidade adicionada, tornando essencial a obtenção de um ponto ótimo de concentração, balanceando essas duas propriedades (Nóbrega, 2011).

Um dos aditivos mais utilizados no mercado de polímeros é o já mencionado negro-de-fumo (*carbon black* em inglês). Tal substância é formada

por partículas finamente divididas e é geralmente obtido da queima incompleta ou decomposição em altas temperaturas de hidrocarbonetos ou derivados de petróleo (Montenegro, 1998). Basicamente, o negro-de-carbono, como também é conhecido, é um pó preto e bastante fino que é amplamente utilizado como pigmento na indústria. Para se ter uma ideia da dimensão e da importância do aditivo, em 2020, a produção global estimada foi de pouco mais de 8 milhões de toneladas, com a China responsável por cerca de 60% dessa produção (Wood, 2020).

Tamanho ubiquidade do pigmento na indústria é devida a versatilidade, baixo custo e importância de suas aplicações. O negro-de-fumo pode ser utilizado como: reforçador de propriedades mecânicas, protetor anti-UV, melhorador de condutividade elétrica e térmica, além de ser utilizado como pigmento propriamente dito (Murphy, 1996).

No caso dos polímeros utilizados no setor elétrico, as propriedades mais importantes alteradas pelo negro-de-fumo são também a condutividade elétrica e térmica, mas sobretudo, a resistência à radiação solar. O fato de o material possuir coloração preta faz com que ele absorva radiação em todo o espectro visível da luz evitando a foto oxidação e a degradação natural do polímero (De Paoli, 2013).

Como todo aditivo, o negro-de-carbono deve ser utilizado com cautela no setor elétrico. Por exemplo, concentrações de cerca de 3% em massa do pigmento em polietileno proporcionam ao polímero resistência à radiação UV e degradação térmica (Kowalski et al., 2009). Contudo, valores superiores a 3% de teor de negro-de-fumo podem alterar a condutividade elétrica do material, interferindo no seu desempenho como isolante (Andrade, 2016).

Outro tipo de aditivo muito comum na indústria de polímeros são as cargas de preenchimento (*fillers*, em inglês). O termo “carga de preenchimento” – ou comumente somente “carga” - é muitas vezes associado a outros tipos de aditivos hoje em dia, mas foi originalmente utilizado para designar aditivos de baixo custo utilizados para reduzir custos e aumentar o volume de um composto, reduzindo o seu custo (Murphy, 1996). Contudo, com a necessidade de desenvolver polímeros cada vez mais avançados e com as mais diversas

aplicações, a noção de cargas apenas com finalidade de redução de custos foi se tornando obsoleta, uma vez que é possível obter melhoria em algumas características dos polímeros com as cargas corretas em concentrações ideais (De Paoli, 2013). Além disso, as cargas podem apresentar outras funções, como: retardantes de chamas e alterações das propriedades mecânicas, térmicas e elétricas do polímero (De Paoli, 2013). As principais propriedades alteradas pelas diferentes cargas de preenchimento utilizadas mais comumente estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo dos principais efeitos das cargas de preenchimento nas propriedades dos compostos poliméricos

	Carbonato de Cálcio, Silicato de Cálcio, Alumínio ou Cobre em Pó	Alumina, Carborundum, Sílica, Dissulfato de Molibdênio	Vidro Granulado	Mica, Sílica, Pó de Vidro	Preenchedores Metálicos, Hidróxido de Magnésio ou Alumina	Sílica Coloidal, Argila Bentonita
PROPRIEDADES FÍSICAS						
Condutividade Térmica	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento	Redução
Temperatura de Deformação Térmica	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento	Neutro
Resistência à Abrasão	Neutro	Aumento	Aumento	Aumento	Redução	Redução
Resistência ao Impacto	Redução	Redução	Aumento	Redução	Aumento	Neutro
Resistência à Tração	Redução	Neutro	Aumento	Redução	Neutro	Neutro
Resistência à Flexão	Redução	Neutro	Aumento	Redução	Neutro	Neutro
Resistência à Compressão	Redução	Neutro	Aumento	Redução	Neutro	Neutro
Constante Dielétrica	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento	Neutro
PROPRIEDADES DE PROCESSAMENTO						
Exotermia	Redução	Redução	Redução	Redução	Redução	Redução
Tixotropia	Neutro	Neutro	Neutro	Neutro	Neutro	Aumento
Capacidade de Usinagem	Aumento	Redução	Redução	Redução	Aumento	Aumento
Redução de Custo	Redução	Redução	Neutro	Redução	Redução	Aumento

Fonte: Adaptado de (Murphy, 1996).

Minerais inorgânicos são amplamente utilizados como enchimentos na indústria de plásticos (Murphy,1996), os principais são:

- Alumina Tri-hidratada ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) – Também denominada Gibbsita, a substância é uma das cargas mais utilizadas como retardante de chamas em materiais poliméricos (Murphy, 1996). Isto porque o mineral sofre decomposição em temperaturas entre 250 a 300 °C, desidratando em um processo endotérmico, liberando água em forma de vapor (De Paoli, 2013). A água emanada do composto polimérico contendo alumina se mistura aos vapores combustíveis e fumos nocivos liberados no estágios iniciais da combustão, diluindo-os (Murphy, 1996).

A alumina tri-hidratada (ATH), pode também por meio dos mecanismos mencionados, melhorar a resistência ao trilhamento elétrico quando adicionada em pequenas proporções (até 4% em massa) (Venkatesulu e Thomas, 2010).

Em quantidades maiores (superiores a 20% em massa) porém, a ATH pode ter efeito deletério em blendas de alguns tipos de polímeros e em vez de melhorar a resistência à inflamabilidade do composto, acaba por prejudicar fortemente as suas propriedades mecânicas (Silva, 2015).

- Hidróxido de Magnésio Hidratado ($\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) – Age de maneira bastante similar à da ATH, porém em temperaturas mais elevadas, de cerca de 350 °C, possibilitando a utilização em HDPE, por exemplo (De Paoli, 2013). Uma proteção eficaz contra chamas só é possível a teores de cerca de 50%, com efeito adverso nas propriedades mecânicas e de processamento (Murphy, 1996).
- Dióxido de titânio (TiO_2) – Trata-se de um pigmento branco que tem função análoga à do negro de fumo – proteção contra a fotodegradação por luz ultravioleta – mas com mecanismo de ação antagônico. Neste caso, o aditivo age não como absorvedor de luz UV, mas sim refletindo até 95 % da luz UV com comprimento de onda inferior a 380 nm. Contudo, o pigmento, em algumas de suas

formas alotrópicas, pode acelerar processos de degradação por oxidação nos polímeros (Andrade, 2016).

Em suma, os polímeros são raramente utilizados na indústria em seu estado puro. Pelo contrário, diversas blendas e formulações com aditivos e cargas são utilizadas para obter diferentes propriedades nos produtos finais produzidos com elas como matéria-prima. Tais aditivos podem ter efeitos simultaneamente favoráveis em alguns aspectos e desfavoráveis em alguns outros, como por exemplo, a resistência ao trilhamento elétrico. Assim, estudar os seus efeitos em tal propriedade é de fundamental importância para o setor elétrico.

2.3. Os Polímeros Sujeitos ao Campo Elétrico - Dielétricos

De maneira geral, os materiais poliméricos empregados no setor elétrico são utilizados como isolantes. Contudo, nenhum material isolante é perfeito. Na verdade, os átomos e moléculas que os compõem interagem, ainda que oferecendo resistência, com os campos elétricos aos quais são submetidos. É possível definir os materiais dielétricos como aqueles que sofrem polarização perante a um campo elétrico (Schmidt, 2011). Excetuando-se o vácuo (que, por definição, não é constituído de partículas) todos os materiais isolantes, incluindo os polímeros, podem ser considerados dielétricos.

Diferentemente do que ocorre em um material condutor, nos quais uma quantidade "ilimitada" de cargas elétricas livres podem se mover através do material na presença de um campo elétrico, em materiais dielétricos as cargas são anexadas a átomos ou moléculas específicas e podem se mover de forma bastante limitada apenas. Tais deslocamentos microscópicos, cumulativamente explicam o comportamento característico dos materiais dielétricos (Griffiths, 2013).

Uma das mais importantes características de um material isolante é a sua resistência à passagem interna da corrente, quando submetido a uma tensão elétrica. Porém, os dielétricos utilizados como isolantes possuem limitações, sobretudo pois sob a ação de um campo elétrico orientado, tais materiais absorvem certa quantidade de energia ao se polarizarem. Quando essa energia ultrapassa o valor crítico do material, ele se rompe, permitindo a passagem de corrente elétrica e perdendo a sua função. Esse valor é conhecido por rigidez dielétrica, medido em

kV/mm (Schmidt, 2011). A Tabela 4 mostra alguns valores típicos de rigidez dielétrica de alguns materiais.

Tabela 4 - Rigidez dielétrica de alguns materiais isolantes

Material	Rigidez dielétrica em campo homogêneo (kV/cm) f = 60 Hz	Particularidades
Vidro	1000 – 3000	Material isolante de elevado peso específico e homogêneo, bem como laminado, quando o campo é dirigido perpendicularmente às camadas laminadas.
Sal	1000 – 1500	
Papel impregnado	1000 – 3000	
Mica	2000 – 3000	
Polistírol, triacetato de celulose (em filme)	900 – 1200	
Cerâmica	100 – 300	Isolantes de estrutura heterogênea, poros fechados ou canais capilares interligados
Resina siatética (fenólica etc.)	100 – 150	
Composto de mica	100 – 150	
Mármore	40 – 50	Isolantes porosos, com poros abertos
Madeira	40 – 60	
Papel sem impregnação	70 – 100	
Cerâmica térmica	15 – 25	

Fonte:(Schmidt, 2011).

2.4. Ruptura Dielétrica

O processo de ruptura de um material dielétrico é complexo e envolve grande quantidade de variáveis e, portanto, gerou várias hipóteses e suposições (Schmidt, 2013). Diversos fatores podem influenciar a rigidez dielétrica de materiais sólidos, como: como temperatura ambiente, umidade, tempo de aplicação, impurezas ou defeitos estruturais, forma de onda e intensidade da tensão elétrica aplicada, entre outros. Diferentes mecanismos podem levar ao rompimento de um material dielétrico dependendo do campo elétrico ao qual o material é submetido e ao tempo pelo qual tal campo persiste (Wang & Zeng, 2011).

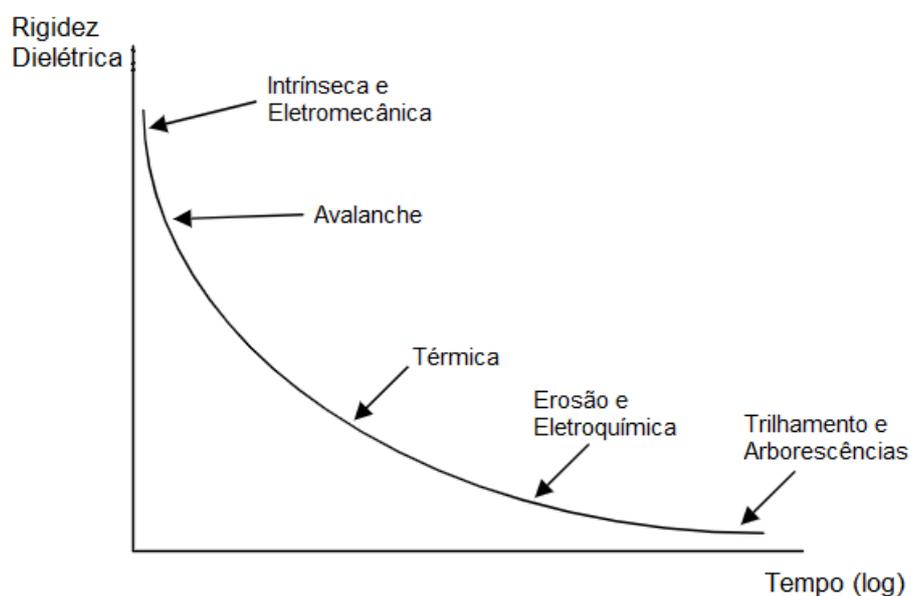


Figura 10 – Representação gráfica da variação da rigidez dielétrica com o tempo de aplicação da tensão e diferentes mecanismos de ruptura associados.

Fonte: Adaptado de (Naidu e Kamaraju, 1995).

A Figura 10 mostra como a rigidez dielétrica varia com o tempo de aplicação do campo elétrico. Tensões elétricas elevadas, acima de 5000 kV/cm, levam o material a romper rapidamente (escala de microssegundos) por meio da ação de alguns dos mecanismos de degradação como ruptura iônica e avalanches eletrônicas, ao passo que tensões aplicadas por longos períodos (escala de tempo de semanas ou meses), sobretudo com a ação concomitante de impurezas, defeitos e agentes agressores externos, levam à ruptura do dielétrico por outros mecanismos como trilhamento e arborescências (Naidu e Kamaraju, 1995).

A ruptura intrínseca, também denominada iônica, é caracterizada pela destruição instantânea de um material dielétrico causada por forças elétricas intensas exercidas nas moléculas que o compõem. Neste caso, os elétrons do isolante recebem energia suficiente para que saltem a banda de energia proibida de valência para a banda de condução. O fenômeno ocorre geralmente na escala de tempo de centenas de microssegundos (Wang & Zeng, 2011). A Figura 11 mostra uma representação das bandas de energia de materiais sólidos.

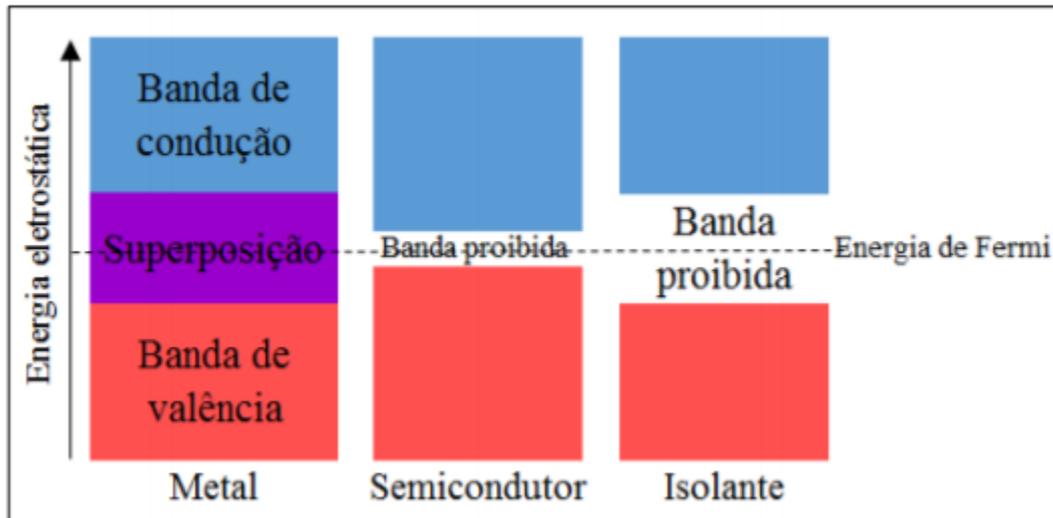


Figura 11 - Representação esquemática das bandas de energia em metais, semicondutores e isolantes

Fonte: Adaptado de Correia et. al., 2017

A degradação por avalanche ou *streamers*, ocorre quando um elétron livre inicial acelerado pelo campo elétrico produz elétrons secundários por ionização direta de partículas do isolante, levando a uma avalanche eletrônica, com geração de seu próprio campo elétrico (Klämpfl, 2014). Assim que a avalanche excede determinado tamanho crítico, a ruptura do material ocorre (Wang & Zeng, 2011).

Já a degradação térmica ocorre devido ao aquecimento do material isolante pela interação com o campo elétrico. Quando um dielétrico é sujeito a estresse elétrico, a tendência de partes polarizadas da estrutura do material de se alinharem ao campo geram correntes parasitas e aquecimento (Wang & Zeng, 2011). Assim, caso o calor gerado supere a capacidade do material em trocar calor com o ambiente, dependendo, portanto, da sua condutividade térmica, desenvolve-se a tendência de originar fissuras, amolecimento, fusão e carbonização do polímero que compõe o dielétrico (Schmidt, 2013).

Existem também os mecanismos que atuam degradando os materiais isolantes por meio da ocorrência de descargas parciais recorrentes e cujos danos ao material se acumulam ao longo de meses ou anos (Naidu e Kamaraju, 1995). De maneira geral, as descargas parciais podem ser descritas como correntes elétricas geradas por ruptura parcial do isolante entre dois materiais condutores, não chegando a uni-los de forma completa (Kreuger, 1989). Entre os mecanismos que são caracterizados pela degradação dos materiais envolvendo descargas parciais estão o trilhamento elétrico e as arborescências.

As arborescências são ocasionadas, de maneira geral, por descargas parciais internas no material dielétrico, na presença de fissuras e defeitos que permitem a entrada de água e poluentes condutivos no material – arborescência em água ou *water-treeing*, em inglês – ou então por bolhas ou vazios presentes no interior do polímero, geralmente preenchidas por gás – arborescência elétrica ou *electrical-treeing*, em inglês (Ribeiro Jr., 2008). Tal tipo de degradação, ilustrada na Figura 12, podem acabar por atravessar toda a extensão do isolante, levando à sua falha por completo.

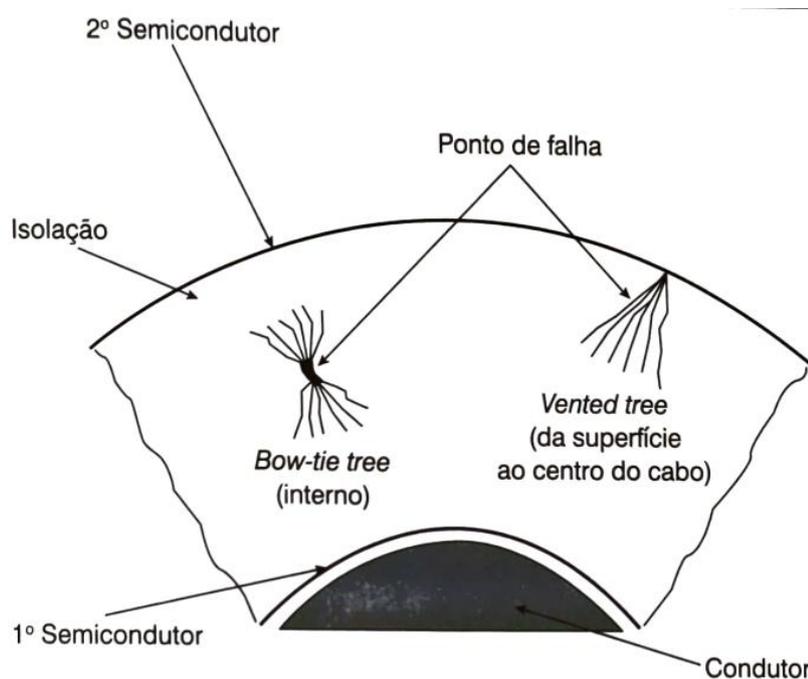


Figura 12 - Ilustração de arborescências em um cabo isolado

Fonte: (Schmidt, 2011)

O trilhamento elétrico é causado por descargas parciais na superfície do material. Tais descargas geram alterações na superfície do material, formando caminhos ou “trilhas” condutivas – daí o nome “trilhamento elétrico”. Tais trilhas se propagam na direção do campo elétrico e podem levar ao rompimento do isolante (Silva, 2005). O fenômeno, ilustrado na Figura 13 é o objeto de estudo do presente trabalho e será descrito em mais detalhes nos itens seguintes. O efeito prático de tal forma de degradação em uma linha compacta real é mostrado na Figura 14.

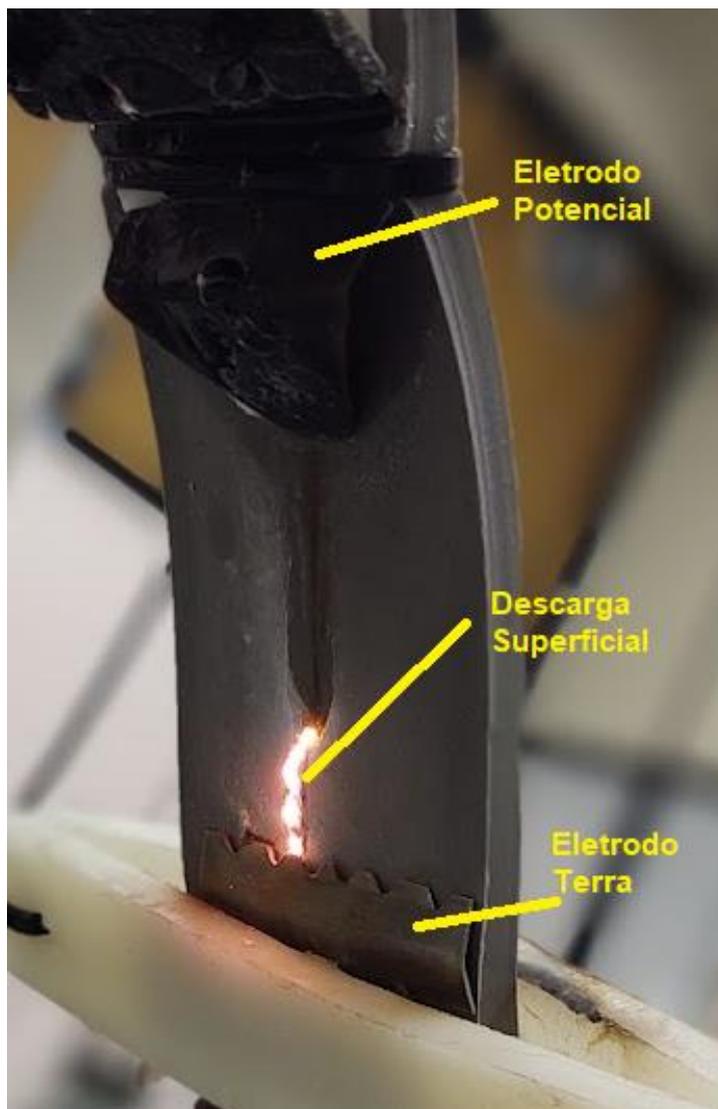


Figura 13 – Imagem ilustrativa de descarga superficial durante ensaio de trilhamento elétrico

Fonte: (O Autor, 2019)



Figura 14 – Fotografia de trecho de linha compacta de 35 kV degradada por trilhamento elétrico

Fonte: O Autor, 2021

2.5. O Fenômeno do Trilhamento Elétrico em Materiais Dielétricos

O trilhamento elétrico pode ser descrito, basicamente, como um processo de degradação do material com quebra de ligações químicas e formação de caminho condutivo carbonáceo (Tomczak, 2000). Na presença de uma solução contaminante e de um campo elétrico, podem se formar caminhos para a condução de corrente elétrica. Tal corrente de fuga, começa a fluir no caminho condutor formado pelo contaminante e provoca evaporação parcial neste, formando bandas secas (Sarathi, 2003). Com a interrupção do caminho condutor, a tensão nessas bandas secas eleva-se consideravelmente, permitindo que haja descargas na superfície do material, elevando rapidamente a temperatura (Tomczak, 2000). A Figura 15 e a Figura 16 ilustram de maneira geral como esse fenômeno ocorre. De maneira geral, o processo segue os seguintes passos (Malik et al, 1998):

- a) Quando a água suficiente se acumula na superfície do material, ela escorre levando consigo contaminantes da poluição;
- b) Isso forma um caminho condutor para a eletricidade fluir. A corrente que flui através do líquido faz com que ele aqueça-se e evapore;
- c) A heterogeneidade no líquido e na superfície faz com que o líquido evapore em taxas diferentes, criando pontos ou bandas secas;
- d) A corrente salta através dessas lacunas, que é chamado de Arcos de Bandas Secas ou em inglês Dry-band Arcing (DBA);
- e) O arco é um plasma e portanto gera temperaturas elevadas, o que aquece o polímero, derretendo e degradando-o;
- f) Isso erode e carboniza o material, levando a um caminho condutor. O processo se repete e se intensifica por causa do caminho carbonizado formado até o rompimento completo do material, com perda da sua propriedade isolante.

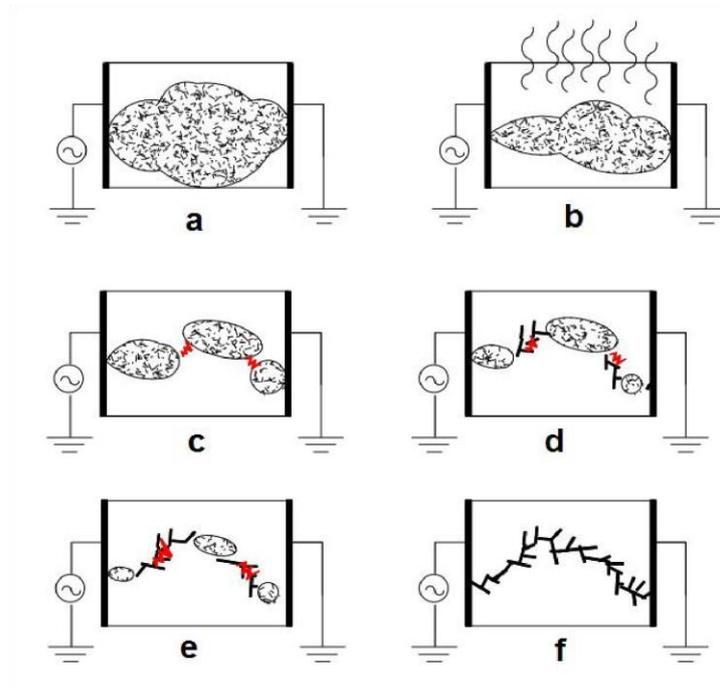


Figura 15 - O fenômeno do trilhamento elétrico – Ilustração do processo teórico

Fonte: (Malik et al, 1998).

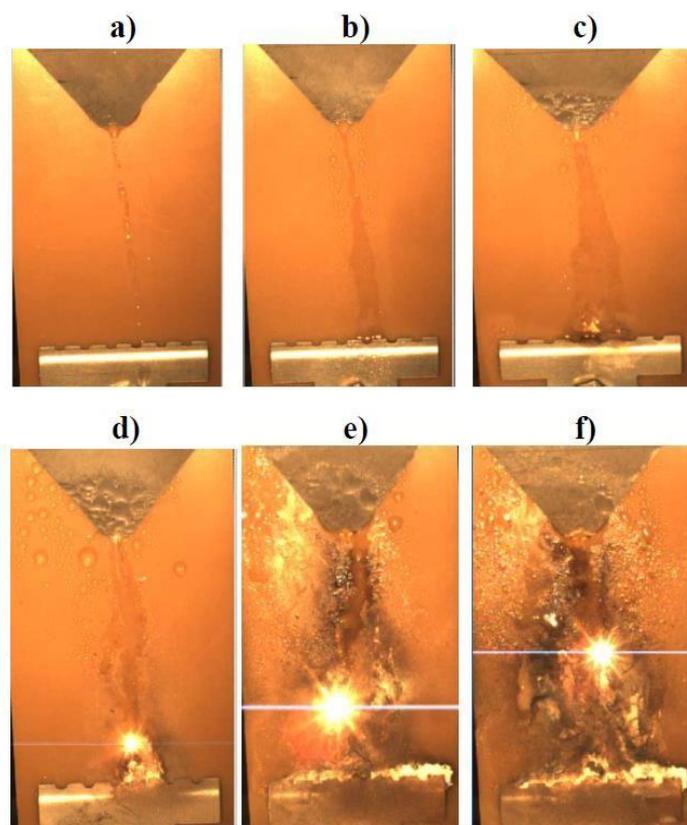


Figura 16 - O fenômeno do trilhamento elétrico – Ilustração do fenômeno com imagens de um exemplo prático

Fonte: (Malik et al, 1998).

2.6. Degradação de Polímeros devida ao Trilhamento Elétrico

Sabe-se que materiais poliméricos, de maneira geral, apresentam alterações, muitas vezes irreversíveis, em suas estruturas e em várias propriedades físico-químicas quando expostos a temperaturas elevadas (Kutz, 2018). Diversos processos de degradação podem ocorrer quando da exposição desses materiais ao calor, como quebra de cadeias, reticulação indesejada e, principalmente, carbonização (*charring*), conforme resumido na Figura 17 (Bayler e Hirschler, 2002). No caso do trilhamento elétrico, todos esses processos podem ocorrer e contribuir para o fenômeno. Além disso, as diversas cargas e aditivos influem de maneira significativa nesses processos e na capacidade de absorção de energia do material (Sarathi, 2003).

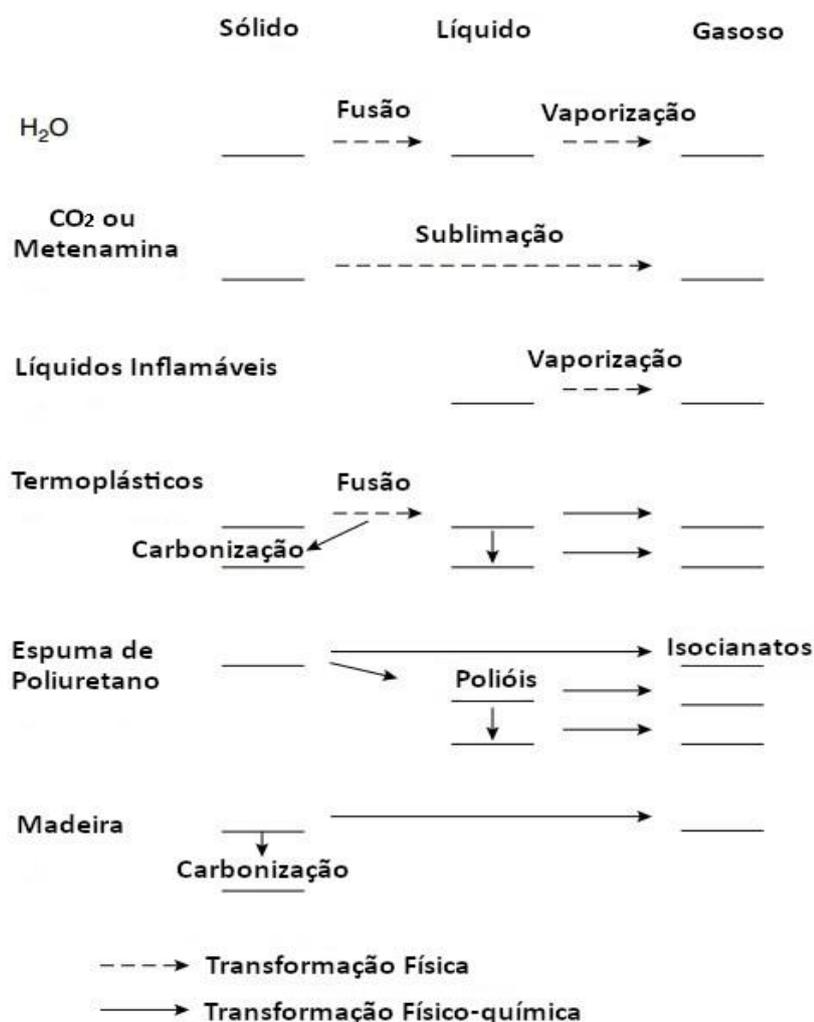


Figura 17 – Diagrama esquemático dos processos físicos e químicos de degradação térmica de materiais poliméricos

Fonte: Adaptado de (Bayler e Hirschler, 2002).

O fenômeno de trilhamento pode causar dois tipos principais de degradação nos polímeros, que podem ocorrer simultaneamente: trilhamento propriamente dito, isto é, a formação de um caminho carbonáceo, principalmente em termoplásticos; e a erosão do polímero, com desagregação completa do material queimado, principalmente em elastômeros. Além disso, outros processos como emissão e combustão de gases combustíveis oriundos da degradação do polímero e o próprio calor do plasma do arco elétrico de bandas secas agravam e aceleram o trilhamento, fornecendo mais calor ao polímero e formando um mecanismo de *feedback* positivo à degradação do material (Ghunem, 2015), o que é ilustrado na Figura 18.

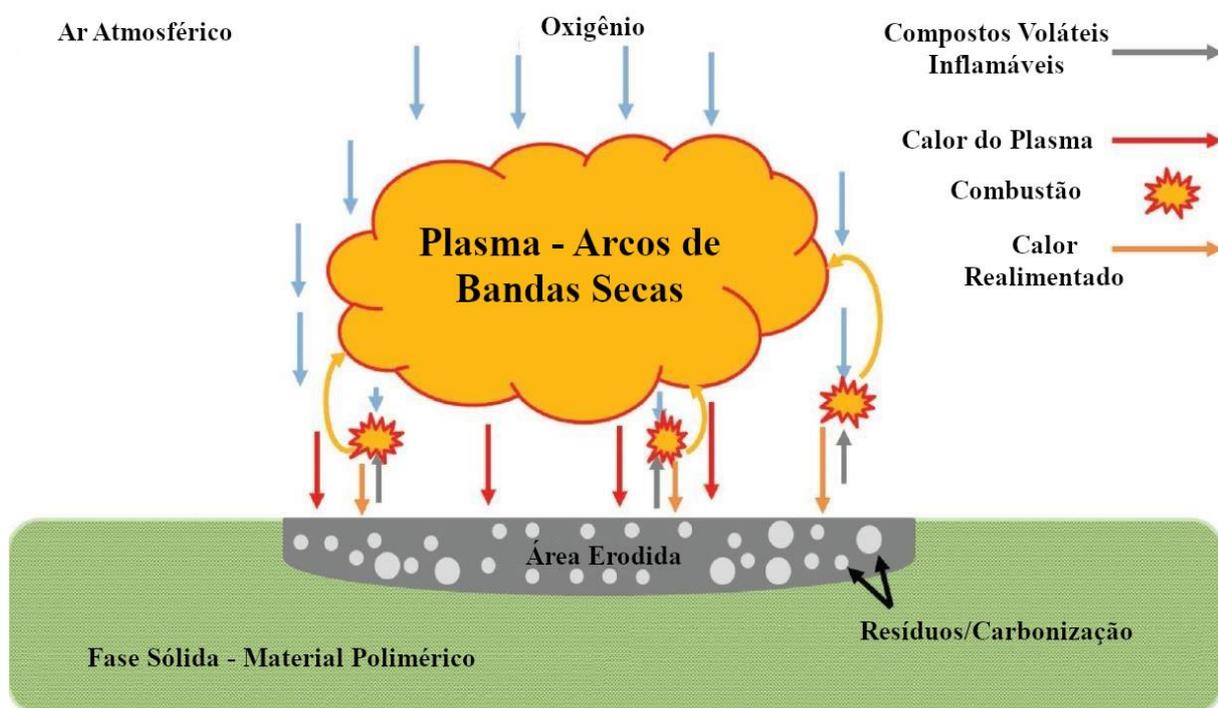


Figura 18 – Ilustração esquemática dos mecanismos de feedback positivo de calor no trilhamento elétrico

Fonte: Adaptado de (Ghunem, 2015).

Em um nível molecular, os principais mecanismos de degradação podem ser resumidos conforme mostra a Figura 19. Entre eles, um dos processos mais importantes é a cisão de ligações (Ghunem, 2015). Quando a energia térmica é continuamente fornecida ao polímero, pode-se chegar um ponto em que as ligações químicas começam a quebrar (Parr e Scarisbrick, 1965). Evidentemente, as ligações mais fracas tendem a ser quebradas mais facilmente, o que será abordado nas seções seguintes.

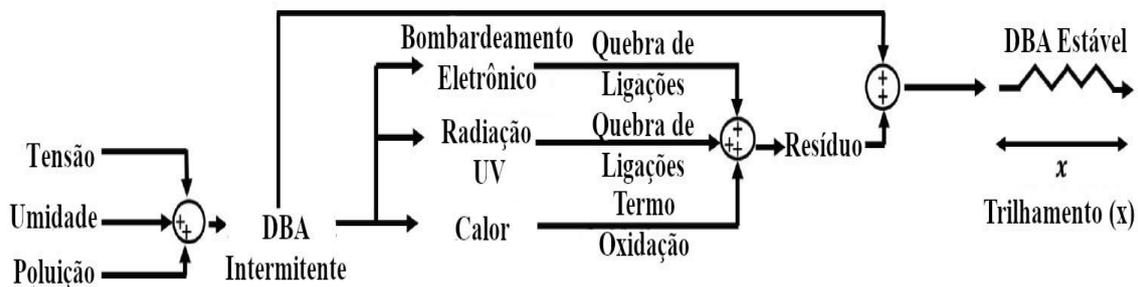


Figura 19 – Diagrama esquemático dos mecanismos de degradação a nível molecular de polímeros sob trilhamento elétrico

Fonte: Adaptado de (Ghunem, 2015).

Como o trilhamento elétrico é um fenômeno que envolve calor e energia, uma maneira de analisar o comportamento de um material sujeito a trilhamento elétrico seria acompanhar a temperatura deste material bem como a maneira com que ela é distribuída ao longo do objeto em questão. Uma vez que muitos polímeros possuem tendência a absorver calor e não dissipam esse calor de forma tão eficiente ao ambiente, sofrem degradação de sua estrutura química com elevadas temperaturas (Bayler e Hirschler, 2002), o que faz com que seja provável que haja relação entre o perfil de temperatura observado em um ensaio de trilhamento em um determinado material e seu desempenho em tal teste.

Conforme dito anteriormente, o fenômeno do trilhamento elétrico está intimamente ligado a fenômenos térmicos, relacionados à troca e absorção de calor nos materiais poliméricos. Tanto a geração de calor por meio do plasma, quanto o rompimento das ligações que constituem o material podem ser analisadas sob o ponto de vista da termodinâmica e seus conceitos básicos, como a entalpia. Os itens seguintes mostram algumas análises nesse sentido, baseadas em trabalhos da literatura científica existente sobre o assunto.

2.6.1. Análise da Degradação – Entalpias de Formação

Não é recente a percepção que a quantidade de carbono em uma determinada estrutura molecular é importante para determinar a tendência para que carbono seja formado por pirólise devido a arcos de bandas secas na superfície (Parr e Scarisbrick, 1965). Vários artigos e trabalhos têm estudado esta relação ao longo dos anos.

De modo geral, a tendência de um material isolante para formar trilhas de carbono na presença de poluição pode ser considerada dependente de dois processos opostos: formação de carbono e remoção de carbono (Parr e Scarisbrick, 1965). Essa tendência pode ser expressa em termos de entalpias de formação (ΔH) do composto, do carbono e dos produtos voláteis da seguinte maneira:



Com a relação energética expressa como calores de formação:

$$\Delta H_{\text{composto}} = \Delta H_{\text{carb}} + \Delta H_{\text{volát}} \quad (2)$$

Onde:

$\Delta H_{\text{composto}}$ = a soma de todas as energias de ligação da molécula;

ΔH_{carb} = a soma das energias de ligações que tendem a produzir carbono;

$\Delta H_{\text{volát}}$ = a soma das energias de ligações que tendem a remover carbono por meio de compostos voláteis.

Assim, a tendência para que uma molécula forme trilhas de carbono é expressa como a relação da energia disponível para este processo com energia total na molécula, em outras palavras (Parr e Scarisbrick, 1965):

$$\Delta H_{\text{carb}} / \Delta H_{\text{composto}} \quad (3)$$

Quanto menor esta relação, melhor tende a ser o desempenho do material frente ao trilhamento.

Tal relação dá origem (utilizando as energias de ligação conforme o trabalho de Linus Pauling: “*Nature of the chemical bond*”) a um gráfico, conforme mostra a Figura 20 (Parr e Scarisbrick, 1965). A curva está de acordo com o que se observa na prática quanto à resistência ao trilhamento de diferentes materiais poliméricos.

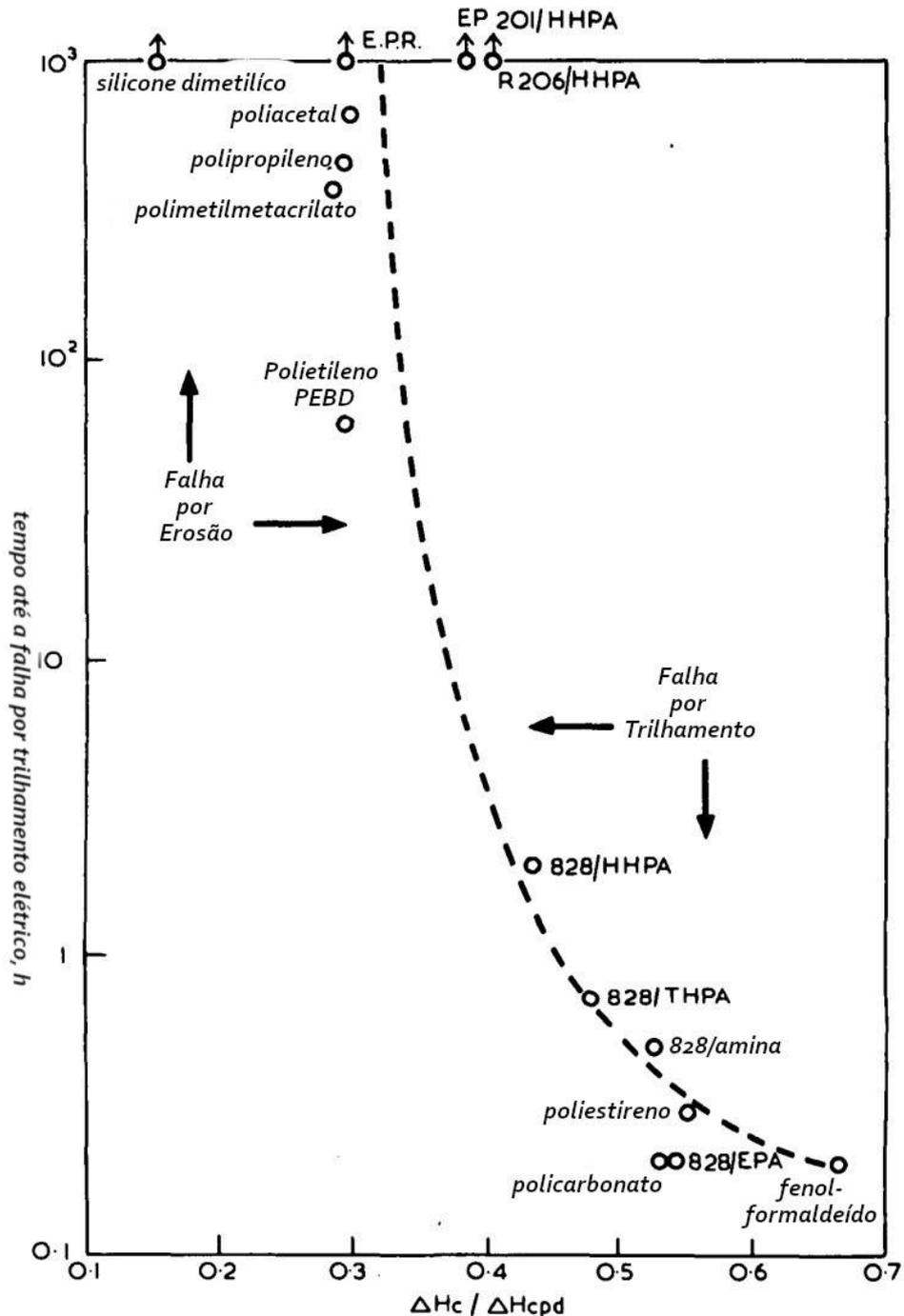


Figura 20 – Gráfico relacionando a resistência ao trilhamento elétrico e a razão entre entalpias de ligações que liberam carbono e as entalpias totais da molécula de polímero (Equação 3)

Fonte: Adaptado de (Parr e Scarisbrick, 1965).

2.6.2. Análise da Degradação – Energia Absorvida

Outra forma de analisar o comportamento dos materiais poliméricos sujeitos ao trilhamento elétrico é por meio da taxa de absorção de energia que estes apresentam (Da Silva e Swinka Filho, 2016). Uma das formas de se obter tal análise é monitorando a potência, isto é, a corrente e a tensão elétrica fornecidas pela fonte no ensaio de Resistência ao Trilhamento Elétrico. A Figura 21 mostra a montagem do aparato de ensaio utilizada para tal medição (Da Silva e Swinka Filho, 2016).

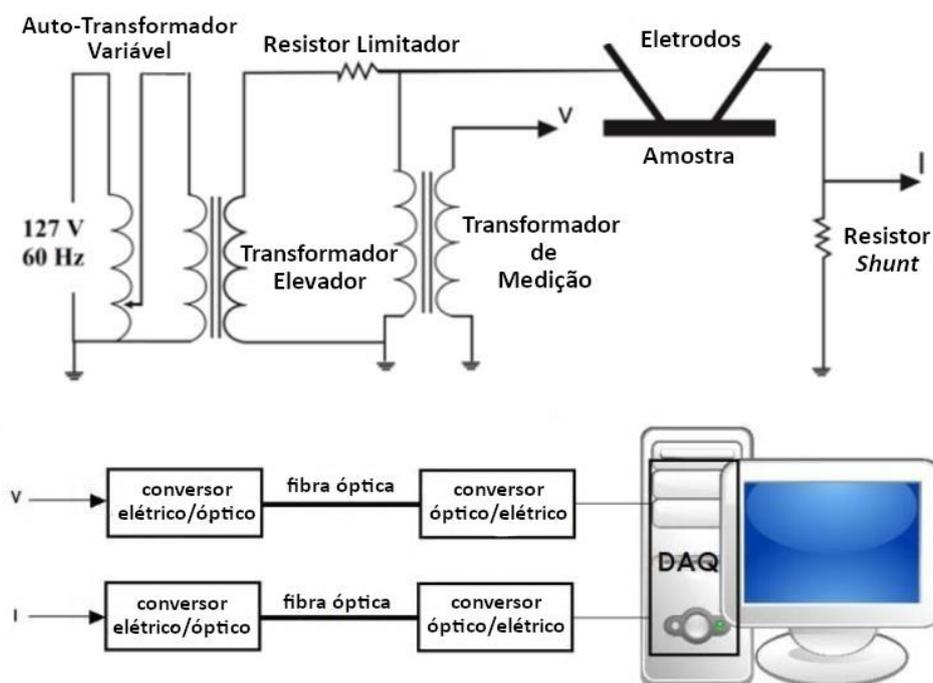


Figura 21 – Representação esquemática do aparato de ensaio para medição de energia aplicada em polímeros sujeitos ao trilhamento elétrico

Fonte: (Da Silva e Swinka Filho, 2016).

É possível perceber uma relação entre a inclinação da curva de energia dissipada e a degradação do material polimérico. Quanto maior a inclinação, maior a energia absorvida pelo polímero e maior sua degradação. No caso do HDPE, a inclinação na curva de absorção de energia aumentou de 12,8 para 21,5 W após cerca de 150 minutos de exposição ao trilhamento, conforme mostrado na Figura 22 (Da Silva e Swinka Filho, 2016). Tal resultado mostra que existe relação entre a energia fornecida pelo trilhamento a um material e a taxa com a qual o material absorve essa energia e seu desempenho no que diz respeito à resistência à degradação por trilhamento elétrico.

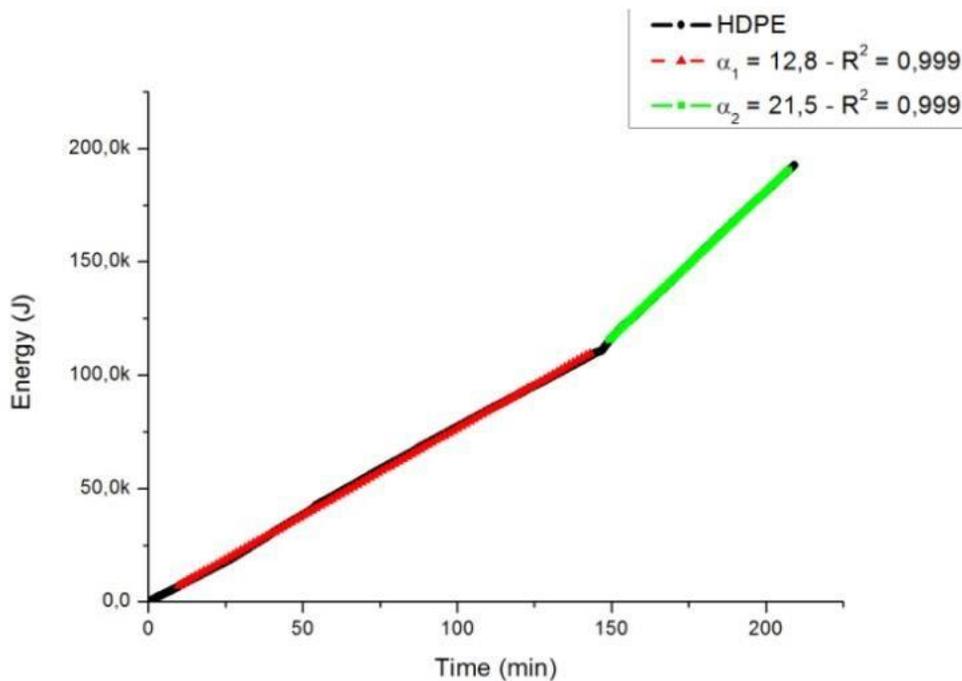


Figura 22 – Curva da energia dissipada instantânea de uma amostra de HDPE

Fonte: (Da Silva e Swinka Filho, 2016).

2.6.3. Análise da Degradação – Ligações

A entalpia de dissociação das ligações é uma quantidade termodinâmica importante que pode exemplificar a atividade química da reação dos radicais livres. Em suma, quanto menor a entalpia de dissociação das ligações é, mais facilmente tais ligações são quebradas (Huang et. al., 2018). Conforme já discutido nos itens anteriores, a quebra de ligações é um dos principais processos de degradação que ocorrem no trilhamento. Assim, estudar essa ligação é de suma importância. A Figura 23 ilustra um desses processos de cisão de ligações em polímeros.

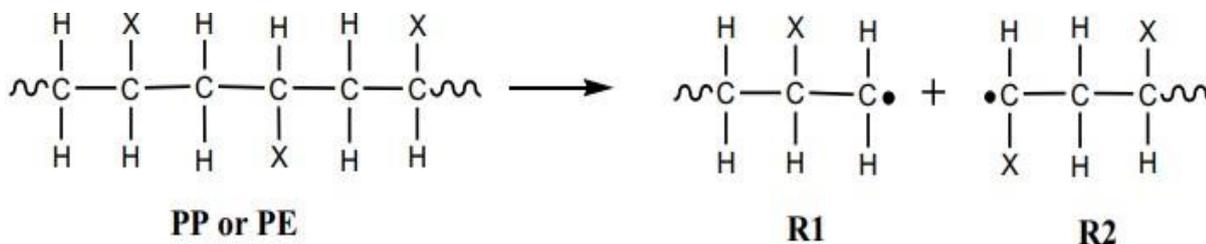


Figura 23 – Representação esquemática do processo de quebra de ligações em polímeros

Fonte: (Huang et. al., 2018).

Para tal cálculo, pode-se utilizar a técnica de Teoria do funcional da densidade (DFT, do inglês Density Functional Theory), por meio do software Gaussian 09 (Huang et. al., 2018). O cálculo segue a seguinte expressão:

$$BDE_{298}(R-X) = H_{298}(R) + H_{298}(X) - H_{298}(R-X) \quad (4)$$

Onde:

BDE₂₉₈ = Entalpia de Dissociação das Ligações;

H₂₉₈ = Entalpias de Formação.

Ainda, as entalpias de formação foram calculadas da seguinte forma:

$$H_{298} = E + ZPE + H_{trans} + H_{rot} + H_{vib} + RT \quad (5)$$

Pode-se perceber que as expressões citadas consideram as diversas formas de energia que podem ser apresentadas pelas moléculas, como: translação, rotação e vibração. Os resultados obtidos por meio de tal metodologia de simulação estão resumidos na Figura 24.

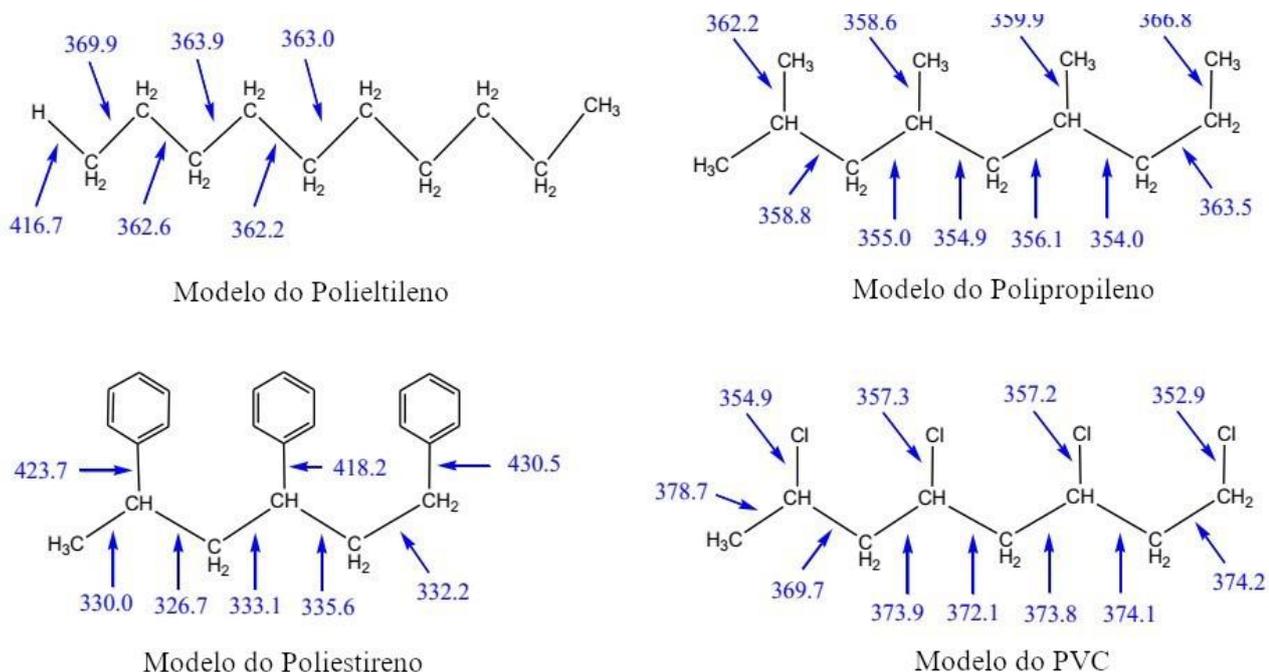


Figura 24 – Representação esquemática das diferentes ligações químicas de moléculas de polímeros e suas energias de ligação

Fonte: Adaptado de (Huang et. al., 2018).

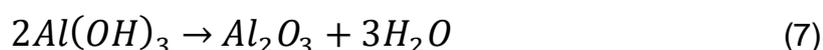
Analisando os dados obtidos para as energias de ligação, a seguinte ordem em relação à estabilidade térmica dos polímeros pode ser inferida (Huang *et. al.*, 2018):



É importante constatar que a classificação proposta está de acordo com o que se observa na prática em relação à resistência à degradação térmica e, por conseguinte, ao trilhamento elétrico.

2.6.4. Análise da Degradação – Efeito de Aditivos à Base de Hidróxidos Metálicos Hidratados

Alguns aditivos adicionados aos polímeros podem ter a capacidade de inibir ou ao menos retardar o trilhamento elétrico do material. Muitos desses aditivos funcionam por meio de efeitos térmicos. Um dos casos é a alumina tri-hidratada (ATH) (Ghunem e Chemey, 2015). A principal reação química envolvida no caso de tal aditivo é a de desidratação, conforme mostrado a seguir:



No caso do hidróxido de magnésio, outro aditivo frequentemente empregado em polímeros do setor elétrico, a reação química de desidratação se dá da seguinte maneira (Gravogl *et. al.*, 2018):



As reações de desidratação são processos endotérmicos e, dessa maneira, contribuem com uma variação de entropia negativa ao processo de degradação de polímeros. Em outras palavras, a desidratação “rouba” parte da energia que seria utilizada para romper as ligações do material (Ghunem e Chemey, 2015). Tal característica pode ser comprovada por meio de ensaios calorimétricos, como o mostrado na Figura 25. Apesar de tal figura apresentar resultados especificamente para a alumina tri-hidratada, espera-se comportamento análogo para a reação de desidratação do hidróxido de magnésio.

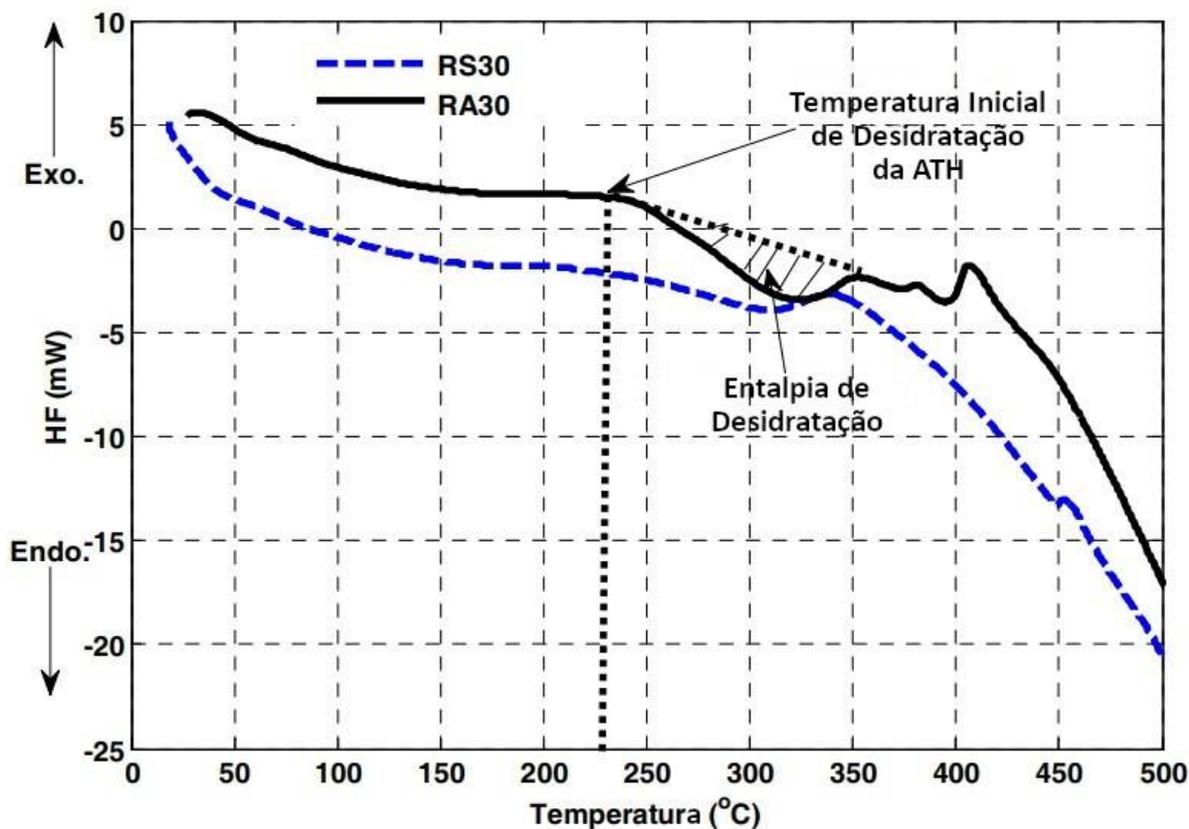


Figura 25 – Resultados de ensaio de DSC de um composto de silicone com ATH versus sem ATH mostrando o calor absorvido pela reação de desidratação do aditivo

Fonte: (Ghunem e Cherney, 2015).

Quanto ao custo, a ATH é um material mais barato que o hidróxido de magnésio em cerca de 10% a 20%. Porém, o hidróxido de magnésio, por se decompor em temperaturas mais altas (cerca de 350 °C), é comumente utilizado em polímeros que possam estar sujeitos a tais temperaturas (Gallo, 2018). Um dos processos que podem gerar temperaturas elevadas como estas são os arcos de bandas secas (DBA) que ocorrem durante o trilhamento elétrico (Ghunem e Cherney, 2015). Assim, o hidróxido de magnésio se torna adequado para materiais potencialmente sujeitos a trilhamento elétrico intenso.

2.7. Cenário Científico

Dada a importância de estudar e testar a resistência dos materiais poliméricos ao trilhamento elétrico, muitas metodologias de ensaio têm sido propostas ao longo dos anos até as normas utilizadas atualmente serem propostas. Os itens seguintes descrevem alguns desses métodos.

2.7.1. Evolução das Metodologias de Teste de Resistência ao Trilhamento Elétrico

Mais de 20 métodos diferentes já foram utilizados ao longo das últimas décadas a fim de determinar a resistência de materiais utilizados no setor elétrico ao trilhamento (Tomczak, 2000).

Na década de 1930, na Suécia e nos EUA foi desenvolvido o teste “Detroit-Edison”, o primeiro a utilizar o gotejamento de um líquido contaminante conhecido para a avaliação da suportabilidade dos materiais. Já a marinha britânica utilizava o teste “Admiralty” que utilizava um corpo de prova montado horizontalmente e gotejava líquido contaminante entre eletrodos, medindo a corrente entre eles e interrompendo o ensaio caso esta ultrapassasse o valor de 0.7 ampères. (Tomczak, 2000). A Figura 26 contém uma fotografia mostrando os eletrodos utilizados no método.

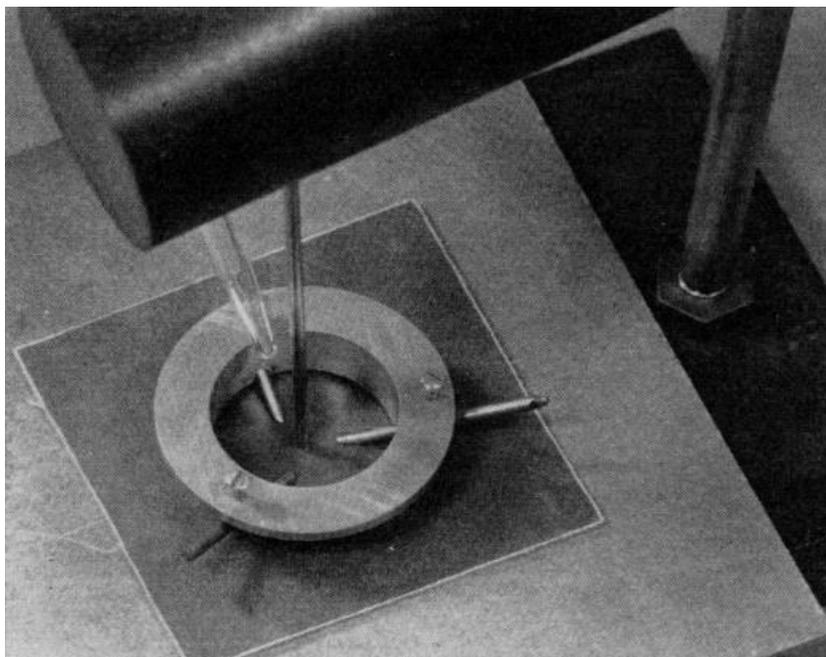


Figura 26 – Imagens dos Eletrodos do método “Admiralty”

Fonte: (Tomczak, 2000).

Algumas outras metodologias foram propostas por Albright e Starr em 1956 e Sommerman em 1960, mas a metodologia mais popular e que é utilizada até hoje foi proposta em 1961 por Mathes e McGowan, utilizando corpos de prova montados com uma inclinação de 45° em relação à horizontal (Tomczak, 2000). Tal método será descrito nos itens seguintes.

Embora o método proposto pelos pesquisadores escoceses tenha se modificado pouco desde então, estudos mais recentes foram realizados. Em 2006, um estudo liderado por Sarathi, propôs um método utilizando processamento do sinal da corrente de fuga observada no ensaio para classificar os materiais (Sarathi, 2006) e em 2011, pesquisadores da Universidade de Manchester propuseram um sistema de detecção de descargas elétricas via imagem (Rowland et. al., 2011).

No Brasil, destacam-se os trabalhos realizados no PIPE UFPR por Fábio Tomczak em 2000 e por Ricardo Fernandes da Silva em 2014. O primeiro estabeleceu relação entre os resultados dos diferentes ensaios existentes, mostrando as semelhanças e diferenças entre eles (Tomczak, 2020). O segundo propôs uma metodologia de análise da absorção de energia que ocorre nos materiais poliméricos durante o trilhamento. Tal medição foi feita por meio do monitoramento da corrente aplicada nas amostras (Da Silva e Swinka Filho, 2016).

2.7.2. Trabalhos Correlatos

Alguns trabalhos na literatura apresentaram metodologias semelhantes ou correlatas à metodologia proposta neste trabalho.

Por exemplo, o trabalho desenvolvido por R. Gorur et. al. (1997), utilizou uma metodologia com aquisição da corrente de fuga no ensaio e contagem do tempo de duração das descargas de bandas secas por meio de uma câmera de alta velocidade, conforme mostrado na Figura 27.

Os pesquisadores observaram que a magnitude e o conteúdo harmônico da corrente de fuga, bem como a duração da descarga são significativamente diferentes quando há degradação visível no material, em contraste com quando não a há. Essas constatações, segundo afirmam os autores, podem ser usados para detecção precoce de falhas em materiais poliméricos utilizados para confecção de isoladores, cabos e espaçadores.

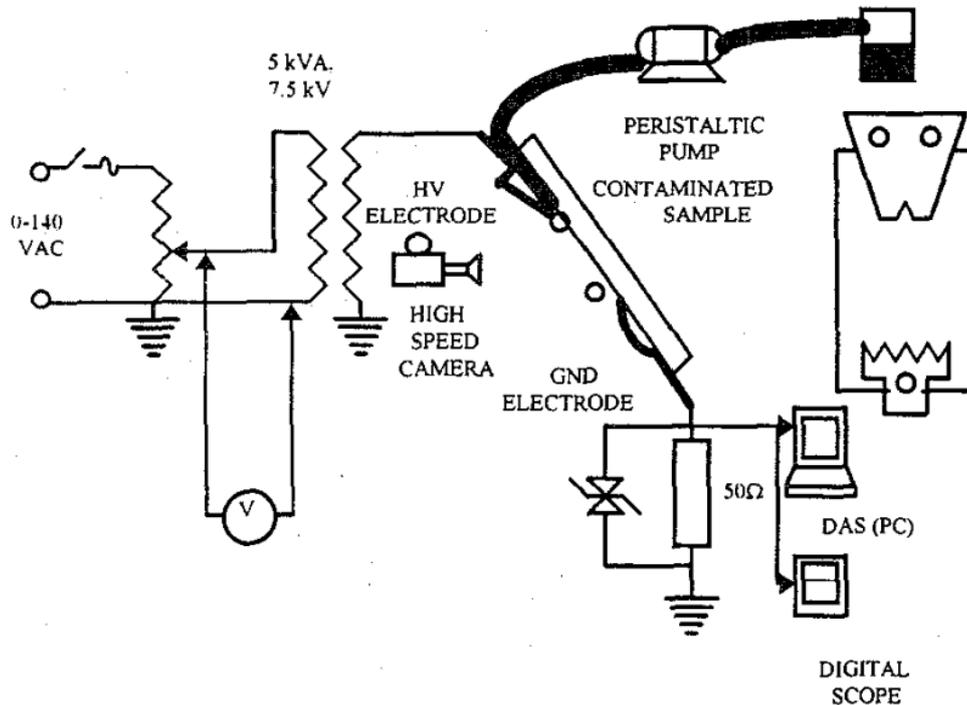


Figura 27 – Ilustração da metodologia Proposta por Gorur et. al (1997)

O trabalho desenvolvido por Rowland et. al. (2011), por outro lado, apesar de utilizar uma metodologia semelhante, realizou a aplicação de patamares de tensão em corrente contínua (em ambas as polaridades), conforme diagrama mostrado na Figura 28. Os autores constataram maiores níveis de corrente de fuga e maior erosão para tensões positivas, em relação às negativas. Além disso, segundo os pesquisadores, a intensidade luminosa e a movimentação das descargas teve relação direta com a velocidade com a qual os materiais se degradaram.

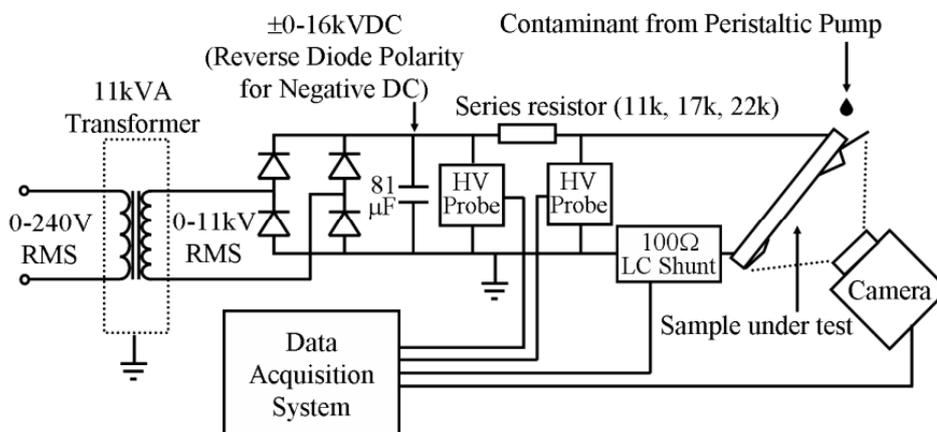


Figura 28 – Ilustração da metodologia proposta por Rowland et. al. (2011)

Alguns outros trabalhos utilizaram também imagens infravermelho para avaliar a evolução da degradação em amostras de material polimérico. O trabalho de Khan et. al. (2017), por exemplo, relacionou a perda da hidrofobicidade a rigidez dielétrica de diferentes blendas de silicone com o desempenho de tais formulações frente ao ensaio de trilhamento, utilizando a imagem infravermelha como evidência adicional. Contudo, o trabalho não teve como foco a utilização de padrões de imagem térmica como nova metodologia de análise dos materiais. A Figura 29 mostra o aparato utilizado pelos autores.

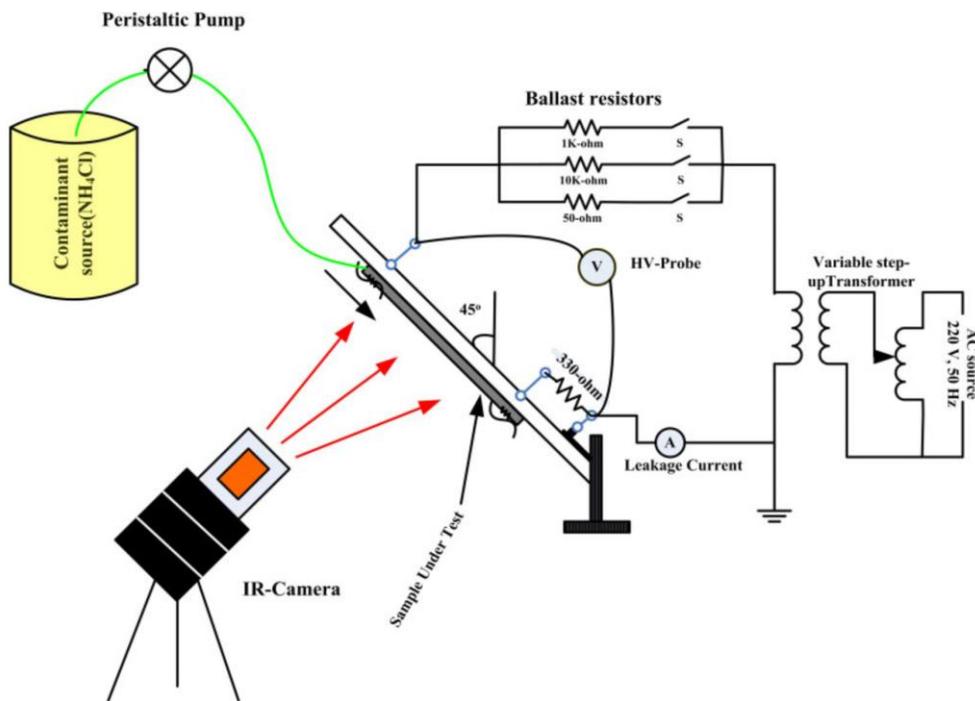


Figura 29 - Ilustração da metodologia utilizada por Khan et. al. (2017)

2.8. Normas e Ensaio Atuais

2.8.1. O Trilhamento Elétrico em Plano Inclinado

Um dos métodos mais populares foi proposto em 1961: o ensaio de Resistência ao Trilhamento Elétrico em Plano Inclinado (Mathes e McGowan, 1965). O método foi normatizado por meio da ASTM D2303 em 1964 e posteriormente pela norma europeia IEC 60587. No Brasil, a norma vigente para tal metodologia é a ABNT NBR 10296.

O ensaio de trilhamento elétrico consiste na exposição simultânea de cinco corpos de prova retangulares, fabricados a partir da matéria prima de composto polimérico que será empregada em algum equipamento elétrico, à tensão elétrica e fluxo de líquido contaminante, em um ambiente com condições atmosféricas favoráveis ao trilhamento elétrico (ASTM, 2020). A Figura 30 mostra um resumo da disposição das amostras no equipamento e a sua forma de montagem.

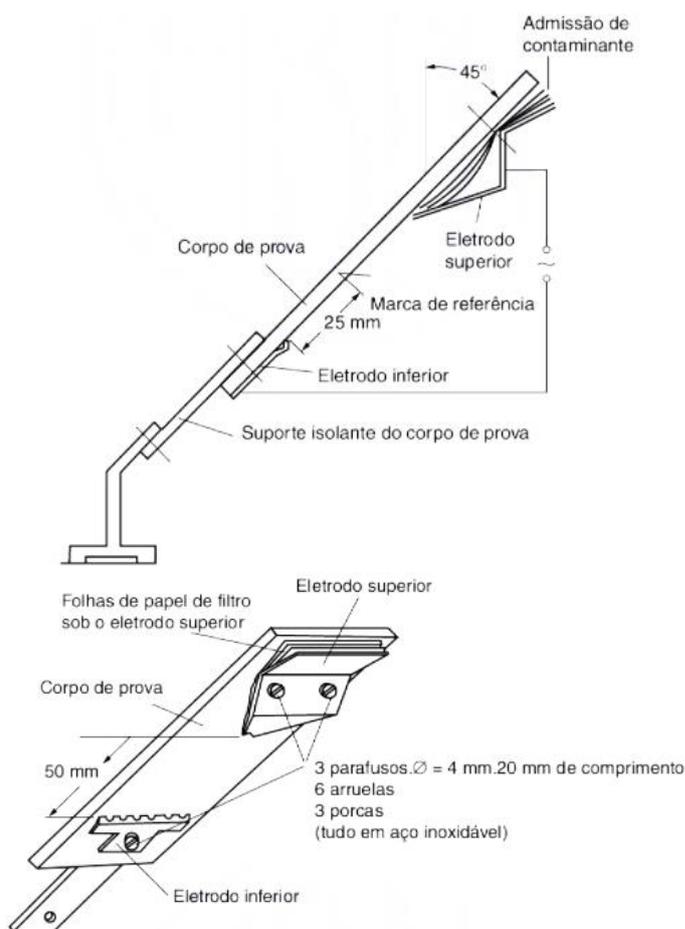


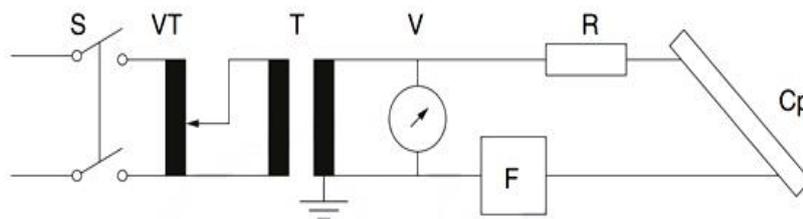
Figura 30 - Ensaio de resistência ao trilhamento elétrico – Ilustração da montagem da amostra e dos eletrodos

Fonte:(ABNT NBR 10296, 2014)

O procedimento de ensaio pode ser resumido da seguinte maneira (ABNT NBR 10296, 2014):

- Tensão elétrica alternada de 1 a 6 kV é aplicada entre eletrodos;
- Uma taxa constante de líquido contaminante é alimentada ao filtro de papel;
- O líquido flui pela da superfície da amostra;
- Arcos de bandas secas e trilhamento começam a ocorrer;
- O teste é interrompido quando uma corrente superior a 60 mA flui entre dos eletrodos ou quando a erosão atinge um ponto crítico;
- Registra-se o tempo decorrido até a falha e o nível de tensão no qual a falha ocorreu.

O circuito de ensaio é apresentado na Figura 31. Conforme mostra o esquemático, utiliza-se um transformador variável alimentando um transformador elevador de potencial, permitindo assim o controle da tensão aplicada aos eletrodos.



Legenda

S – Contator de alimentação

VT – Variador de tensão

T – Transformador de alta tensão

R – Resistores em série

V – Voltímetro

C_p – Corpo de prova

F – Dispositivos de sobrecorrente, fusível ou relé

Figura 31 - Ensaio de resistência ao trilhamento elétrico – Representação esquemática do circuito de alta tensão
Fonte:(ABNT NBR 10296, 2014)

De acordo com a norma ABNT NBR 10296, são estabelecidos dois métodos principais para a aplicação da tensão de ensaio:

- Método 1: aplicação de uma tensão constante por um período de 6 (seis) horas;
- Método 2: Aplicação de tensão em patamares. Cada patamar é mantido constante por 1 (uma) hora, sendo que a diferença entre cada patamar é de 0,25 kV.

Para ambos os métodos, podem ser utilizados, como critério de determinação do fim do ensaio e consequente falha da amostra testada (ABNT, 2014):

- Critério "A": desligamento do circuito quando a corrente na superfície de um ou mais corpos de prova excede 60 mA por 2 segundos;
- Critério "B": erosão dos corpos de prova (25 mm ou perfuração do corpo de prova).

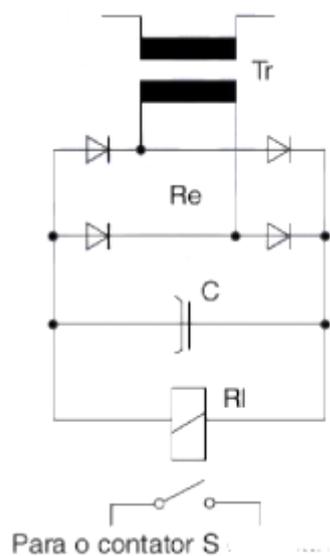
Em geral, o método 1 é mais utilizado nos casos em que a falha por erosão do composto polimérico da amostra é predominante, como no caso de elastômeros como Silicone, EPR e EPDM, por exemplo. Já os materiais termoplásticos, como o polietileno, o poliéster e o epóxi, são geralmente testados segundo o Método 2 (ASTM, 2020).

Em série com os eletrodos do ensaio, fazem também parte do circuito um banco de resistores de potência e um dispositivo para interrupção do ensaio a partir de um nível de corrente, podendo ser um fusível ou relé de sobrecorrente (ABNT, 2014). Os resistores, cujos valores são descritos na Tabela 5, têm a função de limitar a corrente dos arcos elétricos de bandas secas (DBA) a fim de garantir com que o arco circule pela superfície do material testado e não pelo ar (ASTM, 2020). Já o dispositivo de sobrecorrente tem a função de automaticamente cessar o ensaio quando a corrente atinge o valor estabelecido na norma (ABNT, 2014). Um circuito de sobrecorrente típico é mostrado na Figura 32.

Tabela 5 – Resumo dos parâmetros de ensaio

Tensão de ensaio (kV)	Tensão preferencial para ensaio método 1 (kV)	Resistor em série (kΩ)	Fluxo de Contaminante (mL/min)
1,0 a 1,75	-	1	0,075
2,0 a 2,75	2,5	10	0,15
3,0 a 3,75	3,5	22	0,30
4,0 a 4,75	4,5	33	0,60
5,0 a 6,0	-	33	0,60

Fonte:(ABNT NBR 10296, 2014)



Legenda

Re – Retificador

Tr – Transformador (enrolamento de 300/900 espiras)

RI – relé (2 500 Ω/ 11 000 espiras)

C – Capacitor (200 μF)

Figura 32 - Ensaio de resistência ao trilhamento elétrico – Diagrama esquemático de um circuito de sobrecorrente típico

Fonte:(ABNT NBR 10296, 2014)

Outra parte fundamental do ensaio é o líquido contaminante que flui pelos corpos de prova, uma vez que este é responsável pela produção dos arcos de bandas secas. A fim de garantir um filete constante e previsível de eletrólito sobre a superfície inferior dos materiais testados, um conjunto de folhas de papel filtro funciona com reservatório ou *buffer* de líquido (ASTM, 2020). Como o papel fica completamente saturado de contaminante, uma vez que altamente absorvente, cada nova gota de líquido fornecida a ele resulta em uma gota que escorre pelo material ensaiado. Ainda, o eletrodo superior possui uma ranhura a fim de induzir o gotejamento a ocorrer na parte central do corpo de prova. A Figura 33 mostra detalhes desse sistema.

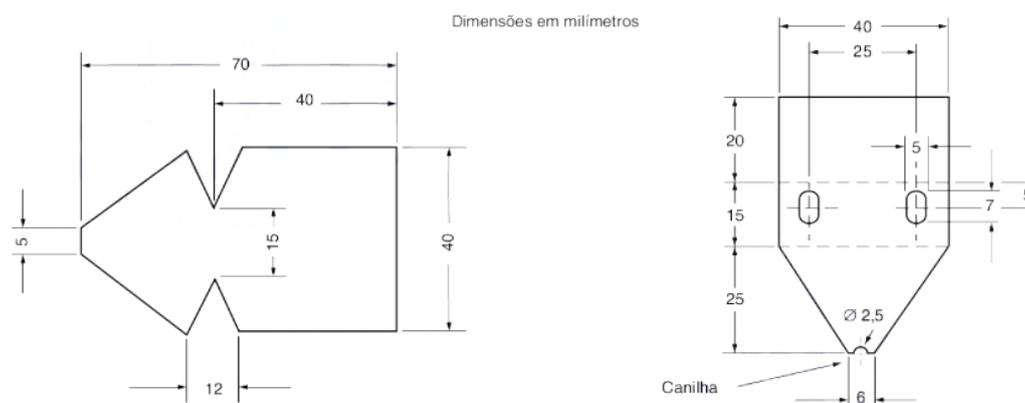


Figura 33 – Ilustração das especificações técnicas do papel filtro (esq.) e eletrodo superior (dir.)

Fonte: ABNT NBR 10296, 2014

Quanto à composição do líquido contaminante, vários estudos e testes foram realizados ao longo da história. Mathes e McGowan (1961) realizaram um dos mais importantes: estudos com diferentes fluxos de contaminantes, diferentes níveis de tensão e também diferentes concentrações a fim de encontrar uma formulação ideal. O trabalho dos autores serviu como base para as metodologias atuais. A Figura 34 mostra parte dos resultados apresentados pelos pesquisadores.

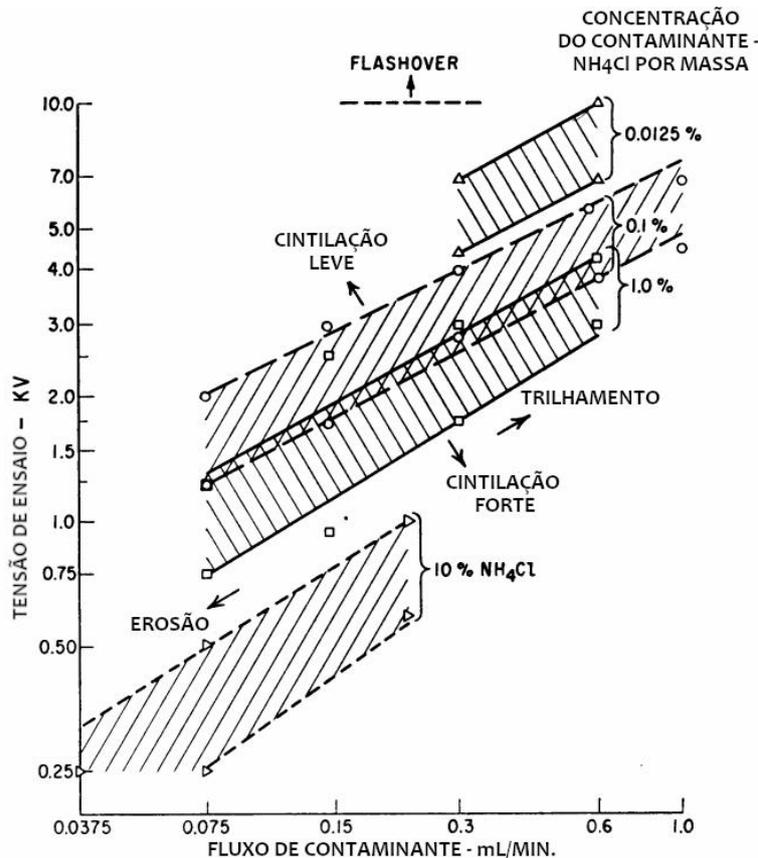


Figura 34 – Gráfico do efeito de diferentes concentrações de contaminante (escala log-log) Fonte: Adaptado de Mathes e McGowan, 1961

Tomando como referência os trabalhos de Mathes e McGowan, os principais comitês normativos definiram o líquido contaminante como uma solução em água deionizada contendo:

- 0,1% em massa de Cloreto de Amônio (NH₄Cl);
- 0,02% em massa de iso-octil fenoxipolietoxietanol (C₃₄H₆₂O₁₁).

O primeiro componente é o responsável por simular o efeito da poluição depositada na superfície dos materiais que compõem os equipamentos elétricos, além de ajudar na interação da água com as suas superfícies. Segundo o trabalho de Mathes e McGowan (1961), os sais do tipo cloreto realizam tais funções adequadamente. De acordo com os autores, o cloreto de sódio (NaCl) e o cloreto de amônio (NH₄Cl) geram resultados bastante semelhantes quanto ao trilhamento, porém o segundo é mais solúvel em água e não tem a tendência de formar depósitos na superfície dos corpos de prova e foi portanto o sal escolhido como padrão.

Já o segundo componente da solução é um tipo de sabão não-iônico que tem a função de agir como surfactante no líquido contaminante. Em outras palavras, é

um tipo de sabão que não libera íons quando dissolvido em água - logo, não influenciando na condutividade elétrica da solução - ao passo que auxilia a cancelar a tensão superficial do eletrólito, proporcionando fluxo consistente sobre a superfície dos materiais testados (Mathes e McGowan, 1965).

Dependendo da aplicação na qual o material polimérico testado será empregado e a qual tipo de equipamento será produzido com ele, diferentes tensões de ensaio são utilizadas. Por exemplo, no caso de acessórios poliméricos (espaçadores, braços anti-balanço, etc.), a norma vigente (ABNT NBR 16094) prevê os valores mostrados na Tabela 6 seguindo método e critério 2A. Já para isoladores do tipo pino, a norma vigente (ABNT NBR 16327-1) prevê os valores mostrados na seguindo também método e critério 2A.

Tabela 6 - Tensões de ensaio para acessórios poliméricos

Norma a ser utilizada para os ensaios	Ensaio	Requisitos				Unidade
		Polietileno PEAD	Borracha de silicone	Poliamida	EPDM	
ABNT NBR 10296:2014	Resistência ao trilhamento e erosão no composto novo	3,00	3,00	-	3,00	kV
	Resistência ao trilhamento e erosão no composto envelhecido	2,75	2,75	-	2,75	kV

Fonte:(ABNT NBR 16094, 2017)

Tabela 7 - Tensões de ensaio para isoladores do tipo pino

Norma a ser utilizada para ensaios	Ensaio	Requisitos		
		Polietileno PEAD	Epóxi	Unidade
ABNT NBR 10296	Resistência ao trilhamento e erosão (novo)	3,0	3,0	kV
	Resistência ao trilhamento e erosão (envelhecido)	2,75	2,75	kV

Fonte:(ABNT NBR 16327-1, 2014)

Com o intuito de ilustrar o procedimento descrito neste item, a Figura 35 e a Figura 36 mostram exemplos de amostras instaladas no setup real de ensaio, descrevendo as partes mais relevantes. Mais detalhes acerca dos equipamentos e métodos específicos empregados no presente trabalho serão apresentados no capítulo seguinte.

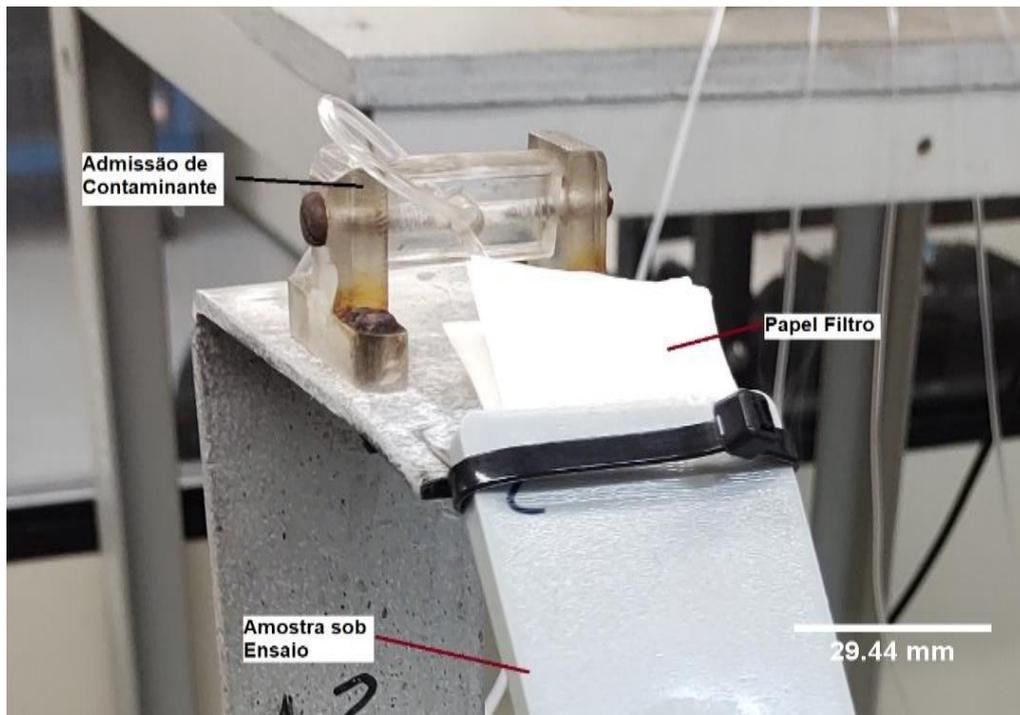


Figura 35 – Imagem da montagem da amostra no ensaio de trilhamento elétrico –
 vista superior
 Fonte: O Autor, 2019

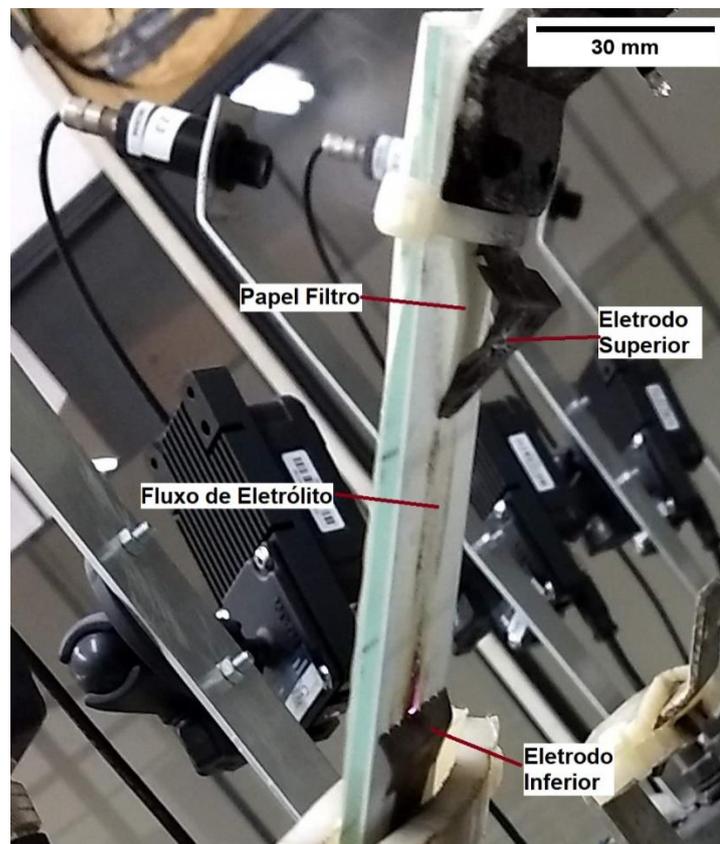


Figura 36 – Imagem da montagem da amostra no ensaio de trilhamento elétrico –
 vista inferior
 Fonte: O Autor, 2019

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Nesta seção serão descritos e listados os principais procedimentos e informações relevantes acerca da metodologia de ensaio, equipamentos utilizados e outras considerações pertinentes.

3.1. Ambiente de Ensaio

Os ensaios foram conduzidos em uma sala própria, isolada e com controle de temperatura e umidade, conforme mostrado na Figura 37. Assim, a temperatura no recinto de ensaio é mantida sempre a 23 ± 2 °C, a cerca de 50% de umidade relativa. Tal controle é de fundamental importância para a garantia da confiabilidade dos ensaios, uma vez que a atmosfera na qual são conduzidos pode interferir no comportamento do material das amostras. Isto porque, conforme já discutido no capítulo anterior, a troca de calor dos corpos de prova com o ambiente tem influência direta na sua degradação e na evolução do processo de trilhamento elétrico (ASTM, 2020).



Figura 37 – Imagem do ambiente de ensaio
Fonte: O Autor, 2020

3.2. Mesas de Trilhamento

Os testes de Resistência ao Trilhamento Elétrico em Plano Inclinado foram realizados em bancadas de ensaio construídas para esse fim específico e que contém todos os equipamentos necessários para a sua execução. Tais bancadas são denominadas “Mesas de Trilhamento” no presente trabalho. A Figura 38 mostra alguns dos principais equipamentos utilizados na montagem de tal *setup* de ensaio.

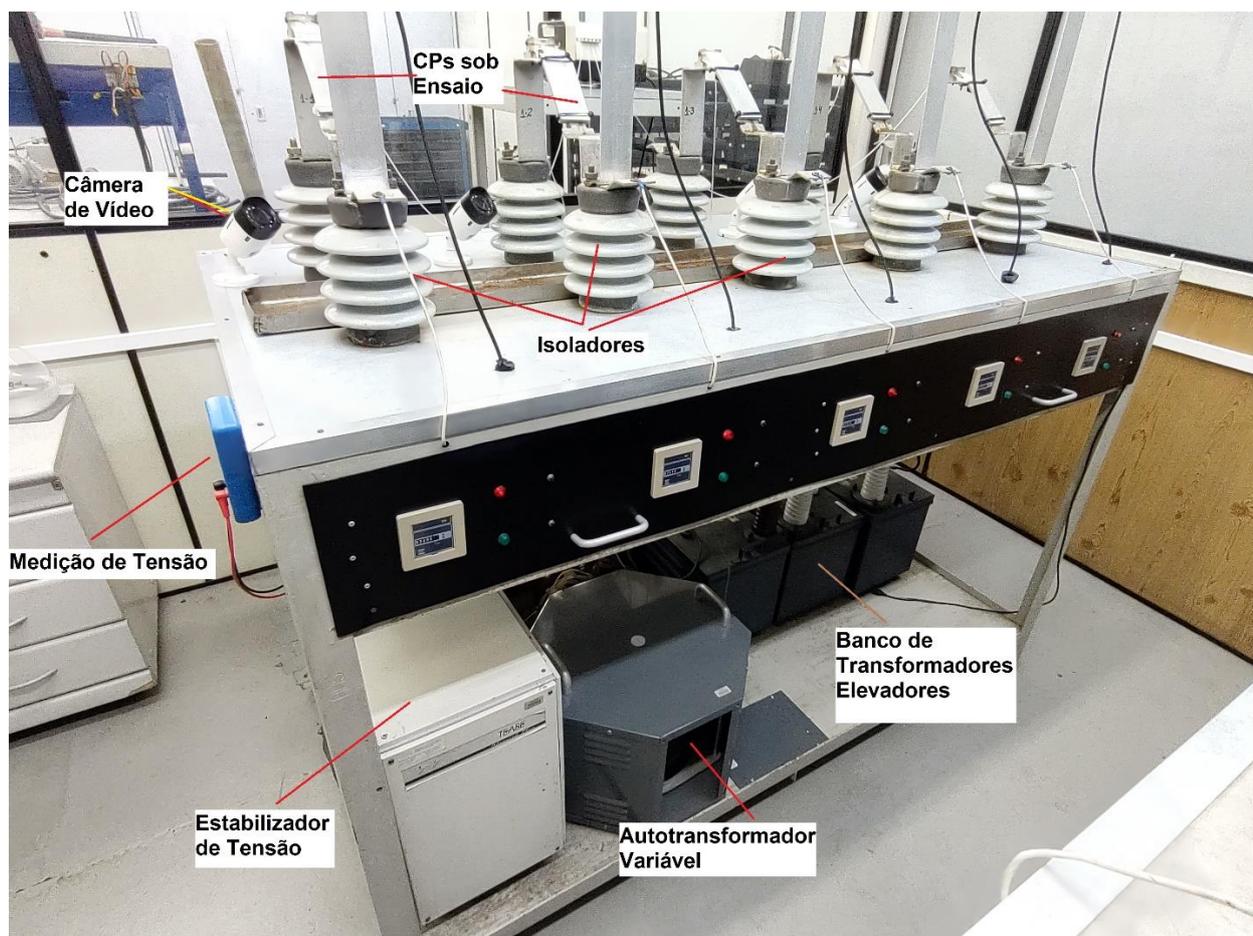


Figura 38 – Imagem da bancada de ensaios

Fonte: O Autor, 2021

O circuito segue o recomendado pela ABNT NBR 10296 e mostrado na Figura 31, sendo constituído de um estabilizador de tensão associado a um Variador de Tensão motorizado, que por suas vezes, alimentam um banco de transformadores de potencial com relação de 120:1 (115 para 13800 V) ligados em paralelo entre si, a fim de obter uma potência suficiente para sustentar os arcos de bandas secas (DBA) que o ensaio provoca. Conforme mostrado por Chrzan (2009), a potência mínima necessária para garantir a cintilação efetiva simultaneamente em todos os corpos de

prova e em todo o intervalo de valores de tensão de ensaio (1,0 a 6,0 kV) é de 3000 VA. Assim, na montagem das Mesas de Trilhamento utilizadas neste trabalho, foram utilizados quatro transformadores de mesmo modelo em associação paralelo, atingindo cerca de 4000 VA. Os dados de placa de tais transformadores são mostrados na Figura 39.

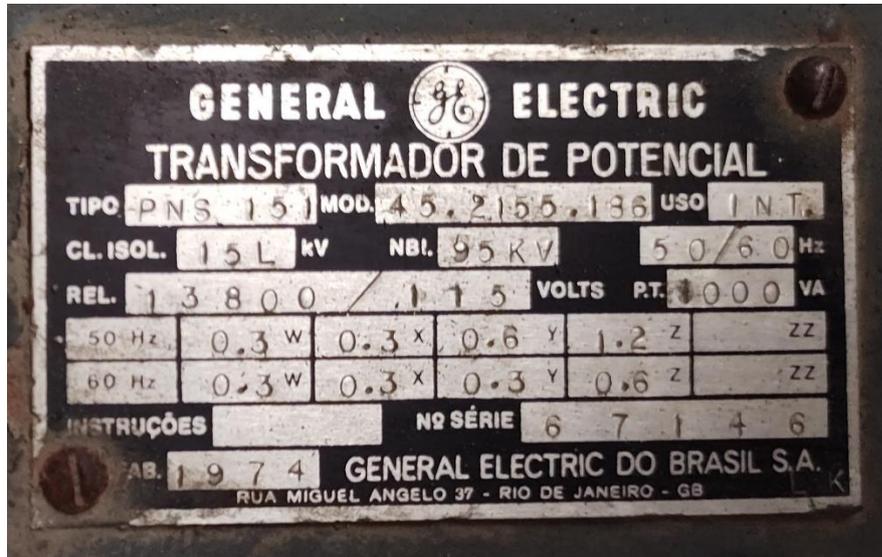


Figura 39 – Imagem dos dados de placa dos transformadores de potencial

Fonte: O Autor, 2021

O sistema de distribuição de líquido contaminante se dá por meio de uma bomba peristáltica com múltiplos canais, que alimentam as cinco posições da mesa, nas quais os corpos de prova são instalados. A Figura 40 mostra o equipamento, que possui velocidade ajustável, permitindo assim, o controle preciso do fluxo de eletrólito durante o ensaio.



Figura 40 – Imagem da bomba peristáltica
Fonte: O Autor, 2021

O funcionamento de tal tipo de bomba é baseado em um rotor com diversos roletes fixados em posições excêntricas a tal rotor. Ao rotacionar, a peça comprime a mangueira contra um suporte de formato côncavo, empurrando o líquido e estabelecendo um fluxo constante, conforme ilustra a Figura 41.

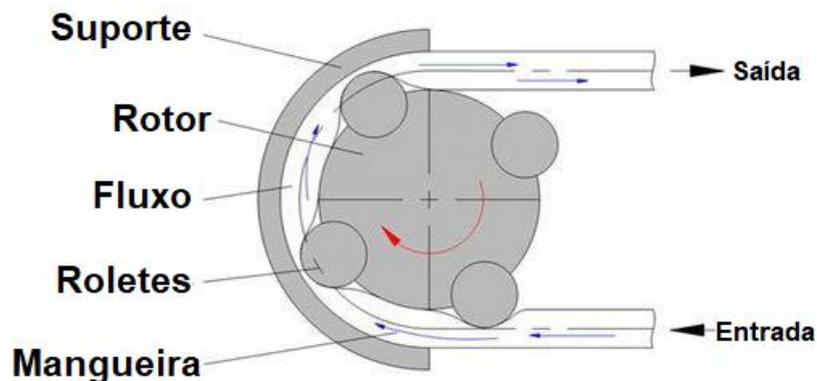


Figura 41 - Princípio de funcionamento da bomba peristáltica
Fonte: Degryse (2015).

Ainda, cada mesa de trilhamento possui em sua alimentação um estabilizador de tensão automático, da fabricante *Tease*, capaz de manter a tensão de alimentação dos transformadores elevadores de potencial estável dentro de um intervalo de 5%.

3.3. Procedimentos gerais de ensaio

Para cada amostra testada no presente trabalho, alguns procedimentos gerais, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 10296 foram seguidos. Tais procedimentos serão apresentados a seguir.

Conforme mencionado anteriormente, a solução contaminante utilizada no ensaio é de fundamental importância para a garantia da validade dos resultados. Assim, para os testes realizados neste trabalho, a preparação foi realizada sempre da mesma maneira: utilizando-se um béquer graduado com capacidade para 2 litros e uma balança de precisão analítica, cuidadosamente mediu-se a massa de água deionizada adicionada ao recipiente; à água deionizada, acrescentou-se o Cloreto de Amônio (fabricante Synth) e o agente surfactante não iônico (para este caso, o produto Triton X-100, da fabricante ACS), posteriormente agitando a solução vigorosamente. A Tabela 8 mostra os valores referência para as massas de cada componente da solução.

Tabela 8 - Composição em massa do líquido contaminante para diferentes volumes

Volume (mL)	Massa NH ₄ Cl (g)	Massa Triton X-100 (g)
250	0,25	0,05
500	0,50	0,10
1000	1,00	0,20
2000	2,00	0,40
5000	5,00	1,00
10000	10,00	2,00

Fonte: O Autor, 2021.

Após um período de estabilização de cerca de 30 minutos, mediu-se a resistividade da solução utilizando-se um condutivímetro, conforme mostrado na Figura 42. A resistividade da solução, preparada de acordo com as proporções da Tabela 8 deve ser de 3,95 $\Omega \cdot m$ a uma temperatura de 23°C (ABNT, 2014).



Figura 42 – Imagem do equipamento de medição da condutividade do líquido contaminante
Fonte: O Autor, 2021.

Neste ponto, cabe uma ressalva importante. Na revisão mais atual da norma ABNT NBR 10296, de 2014, a tolerância para o valor de resistividade é de 0,50 $\Omega.m$ para mais ou para menos, o que está em desacordo com as normas europeias e internacionais, que consideram uma tolerância dez vezes menor (0,05 $\Omega.m$) (ASTM, 2020). Conforme mostrado por Mathes e McGowan (1961), a condutividade do eletrólito tem influência direta no comportamento dos materiais testados, diretamente interferindo nos resultados obtidos. Dessa maneira, para os testes realizados neste trabalho, assumiu-se a faixa de tolerância menor, isto é, de $\pm 0,05 \Omega.m$. Caso a solução preparada para um teste estivesse fora de tal faixa, a mesma era descartada e uma nova solução preparada.

A fim de garantir a correta taxa de fluxo em cada posição da mesa de trilhamento, tal parâmetro foi verificado antes de todo ensaio realizado no equipamento. Para tal, utilizou-se provetas graduadas com capacidade volumétrica para 5 mililitros. Tais provetas eram posicionadas diretamente abaixo do ponto no qual o líquido escoava do eletrodo superior, conforme mostra a Figura 43. Medindo-se o volume acumulado na proveta durante um intervalo fixo de tempo, pode se calcular o fluxo da solução.

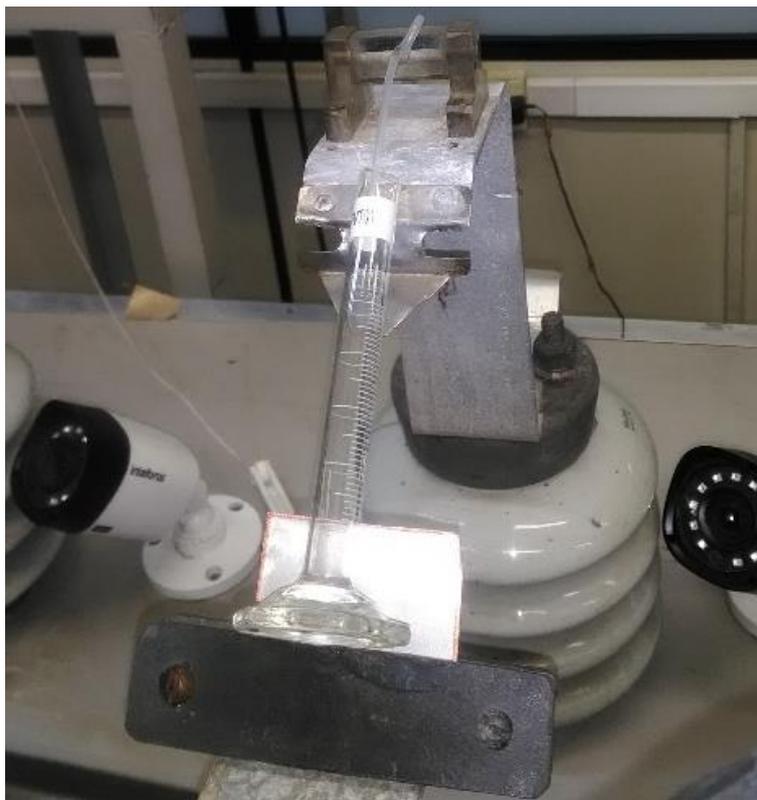


Figura 43 – Imagem ilustrativa do posicionamento de proveta para verificação da vazão do eletrólito

Fonte: O Autor, 2020

Antes de cada ensaio, as superfícies inferiores dos corpos de prova, nas quais o ensaio é realizado, foram levemente lixados com lixa de carbeto de silício granulação 400 (grãos por cm^2) sob água destilada e foram limpos com algodão embebido em álcool isopropílico, a fim de remover a hidrofobicidade superficial do material da superfície, permitindo o estabelecimento de um fluxo de solução contaminante sem gotejamento e removendo impurezas e sujidades da face das amostras.

Todas as amostras foram testadas seguindo o Método 2 e o Critério A da ABNT NBR 10296. Além disso, todas foram submetidas à tensão inicial de 2,50 kV, aumentada a cada hora em 0,25 kV até as suas falhas. Seguiu-se os parâmetros da Tabela 5.

3.4. Sistema de Detecção de Sobrecorrente

Conforme citado anteriormente, é necessário que o equipamento de ensaio de trilhamento elétrico seja dotado de um dispositivo de detecção de sobrecorrente, a fim de interromper o ensaio caso correntes superiores a 60 mA circulem por mais de 2 segundos na superfície de qualquer um dos corpos de prova testados (ASTM, 2014). No caso dos equipamentos utilizados neste trabalho, os dispositivos de detecção e controle estão localizados em gavetas situadas abaixo do aparato de ensaio, conforme mostrado na Figura 44.

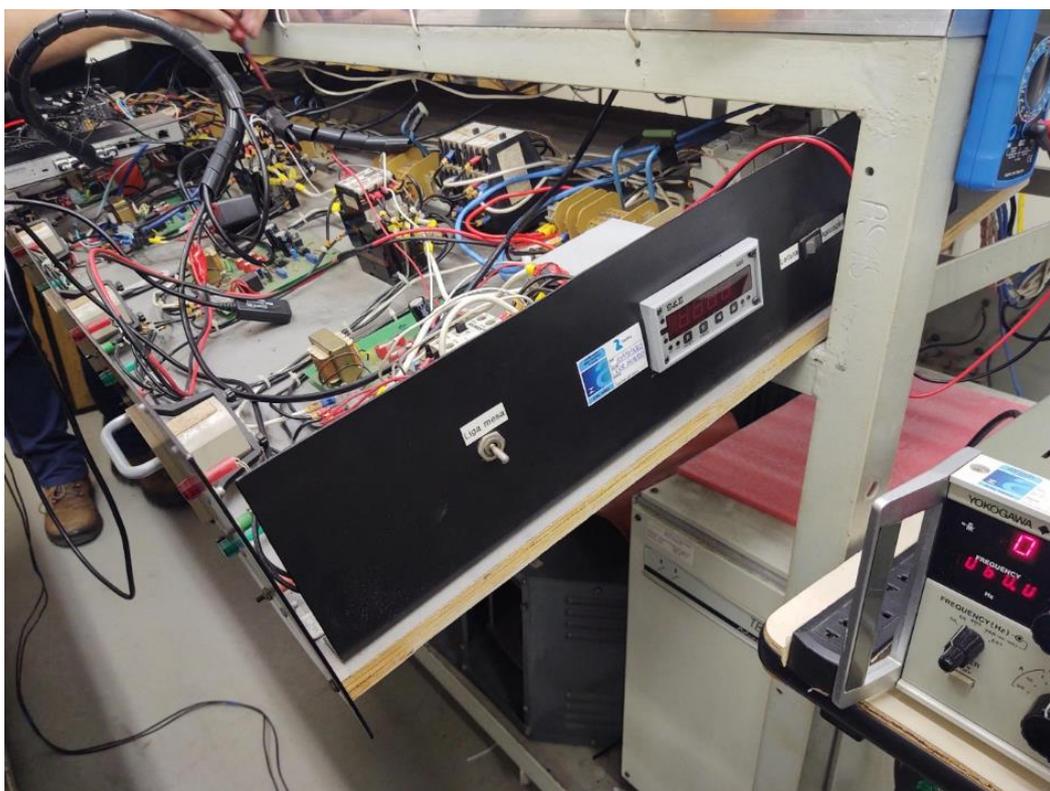


Figura 44 – Imagem de uma das gavetas das mesas de trilhamento

Fonte: O Autor, 2019.

No interior das gavetas estão localizadas placas de circuito impresso, mostradas na Figura 45, que fazem a função de relés de sobrecorrente ajustáveis. Cada posição das Mesas de Trilhamento possui uma placa dedicada, que funciona de maneira independente das demais. As placas já faziam parte do equipamento de ensaio quando da execução dos testes apresentados neste trabalho. Contudo, como estes eram inexistentes, para garantir o perfeito funcionamento do sistema de sobrecorrente, foi necessário desenhar os diagramas esquemáticos dos circuitos de tais placas. Assim, o processo de análise dos circuitos, determinação da função dos

seus componentes e posterior manutenção e teste das placas de sobrecorrente foi parte do desenvolvimento do trabalho apresentado neste documento.

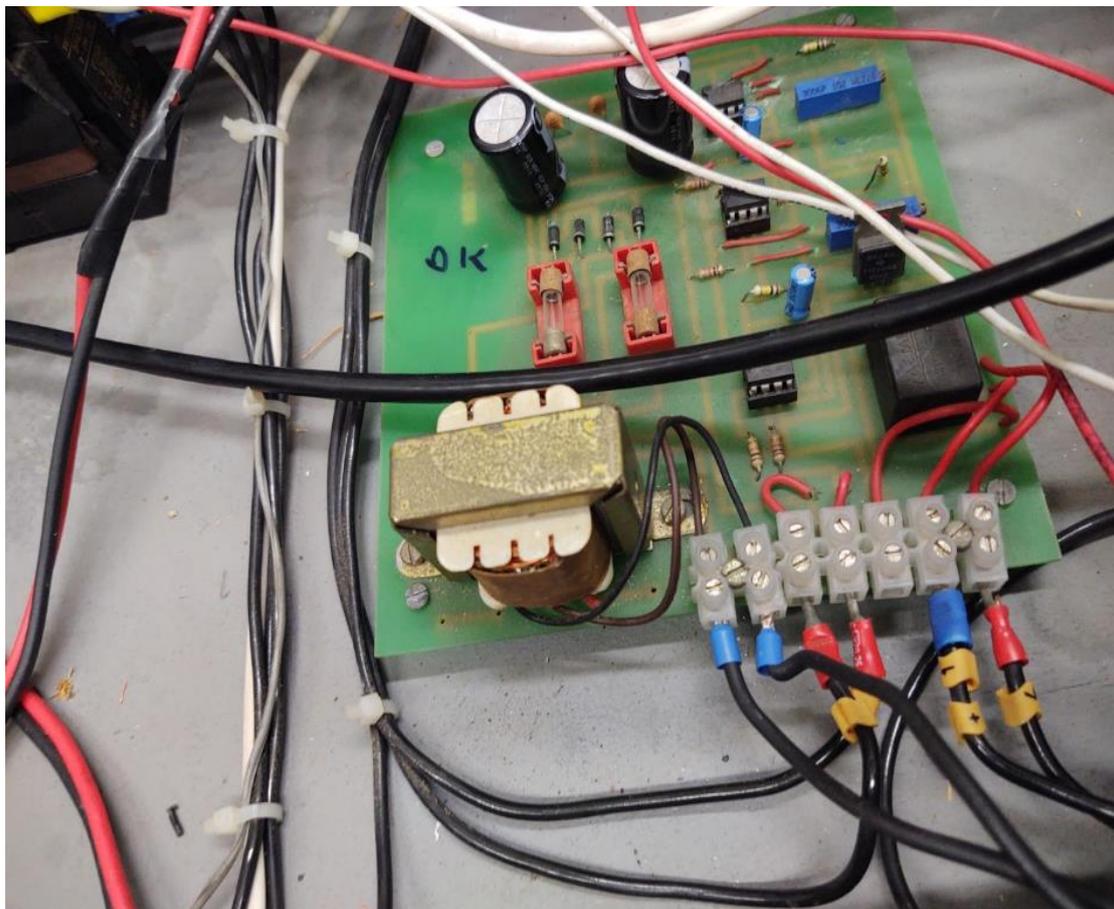


Figura 45 – Imagem de uma das placas eletrônicas do sistema de detecção de sobrecorrente

Fonte: O Autor, 2019.

O esquemático dos sistemas de detecção de sobre corrente é mostrado na Figura 46. O sistema é baseado em amplificadores operacionais e um circuito RC, realizando assim a leitura e condicionamento do sinal de entrada e disparando um relé caso o nível de corrente máximo do ensaio seja superado. A lista dos componentes das placas de sobrecorrente consta a seguir:

- Resistor 10 Ω 5W 5%;
- Resistor 1 k Ω ¼W;
- Resistor 10 k Ω ¼W;
- Resistor 100 k Ω ¼W;
- 2 Potenciômetros 10 k Ω ;
- 2 Fusíveis 250 mA;

Já a Figura 47 mostra o esquemático da Figura 46 em forma de diagrama de blocos, a fim de facilitar o entendimento do modo de funcionamento do circuito. O circuito possui quatro blocos funcionais principais. O primeiro bloco recebe os sinais da leitura da corrente que circula pela superfície do corpo de prova ensaiado, adequando a intensidade do sinal para os blocos seguintes. O segundo bloco é o de tempo de inibição, que recebe o sinal vindo do primeiro bloco e somente o alimenta para o bloco seguinte caso tal sinal se mantiver acima do seu valor de referência por um determinado tempo, definido por um circuito RC. Já o terceiro bloco, o de nível de disparo, compara a intensidade do sinal recebido com um nível de referência, que pode ser ajustado por meio de um potenciômetro. Se a amplitude do sinal de entrada superar o valor de referência e também o sinal vindo do bloco de tempo de inibição estiver com valor alto, o bloco envia um sinal também alto para o último bloco, o de disparo. Tal bloco é o responsável por alterar o estado do relé que comanda a posição respectiva da Mesa de Trilhamento e pode interromper a alimentação de tensão para os transformadores elevadores.

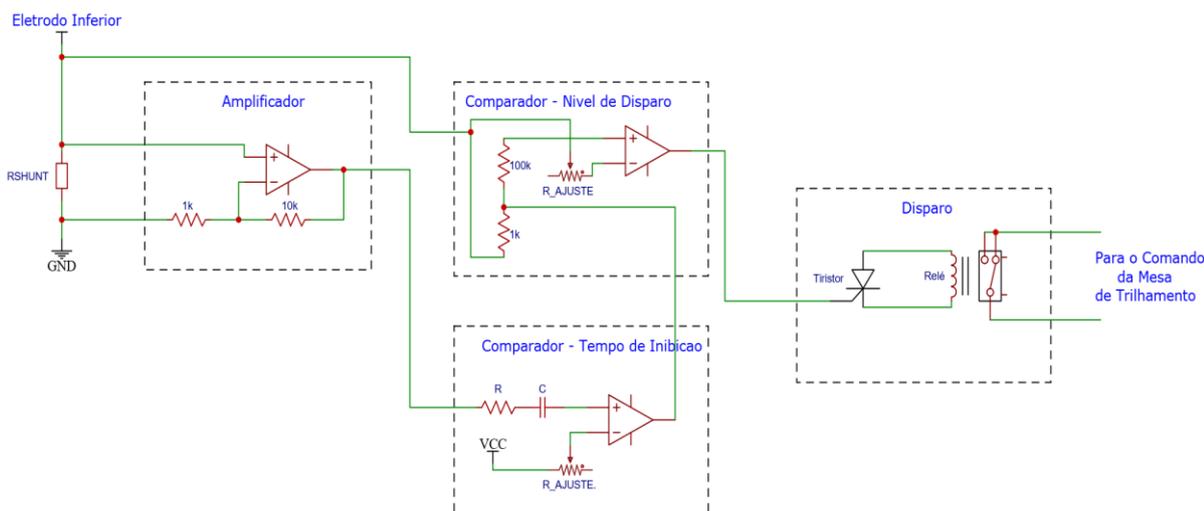


Figura 47 - Diagrama de blocos do circuito eletrônico das placas do sistema de detecção de sobrecorrente

Fonte: O Autor, 2021

A leitura da intensidade da corrente circulante no ensaio é feita por meio de resistores *shunt*. Tal técnica consiste em fazer com que a corrente que circula do eletrodo de potencial para o eletrodo terra o faça passando por um resistor de impedância conhecida e estável. Dessa forma, pode-se medir a tensão sobre tal resistor – que será diretamente proporcional à corrente - e utilizar esse sinal de

tensão, de manipulação mais fácil, nos circuitos eletrônico. A Figura 48 ilustra tal conceito, assim como a Figura 49 mostra um dos resistores *shunt* instalados nas Mesas de Trilhamento utilizadas neste trabalho.

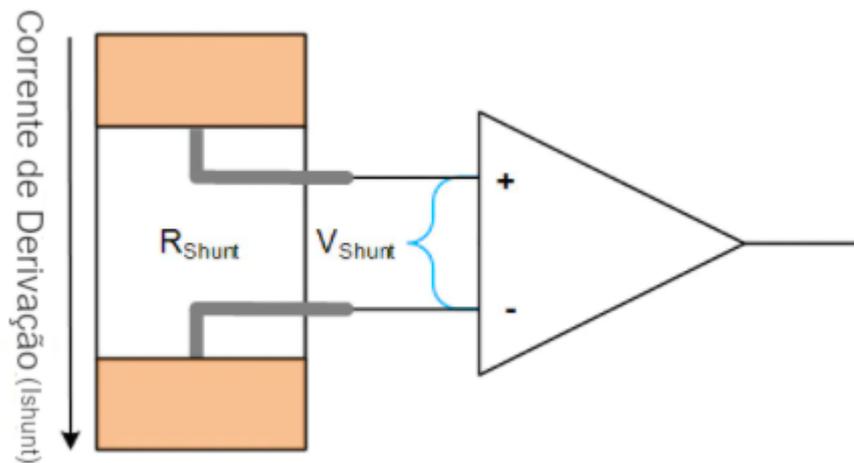


Figura 48 - Utilização de resistor *shunt* para a leitura do sinal de corrente

Fonte: Adaptado de ON Semiconductors, 2019.

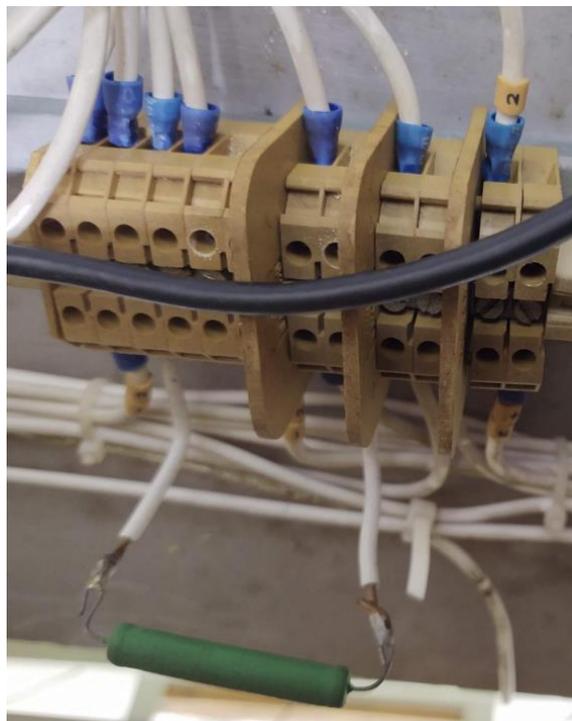


Figura 49 – Imagem de um dos resistores *shunt* dos sistemas de sobrecorrente

Fonte: O Autor, 2021.

Visto que as placas eletrônicas de detecção de sobrecorrente foram construídas e soldadas manualmente, utilizando componentes discretos do tipo *through-hole*, julgou-se necessária, anteriormente à realização dos ensaios, realizar uma verificação do correto funcionamento dos sistemas de detecção de sobrecorrente.

A verificação dos equipamentos de sobrecorrente foi executada utilizando um padrão calibrado para aplicar corrente diretamente nos resistores *shunt* de medição. A Figura 50 mostra o equipamento utilizado para a injeção de corrente (fonte de corrente Yokogawa 2558). O padrão utilizado estava, no momento da execução da verificação, com a sua calibração (rastreadável RBC) em dia.

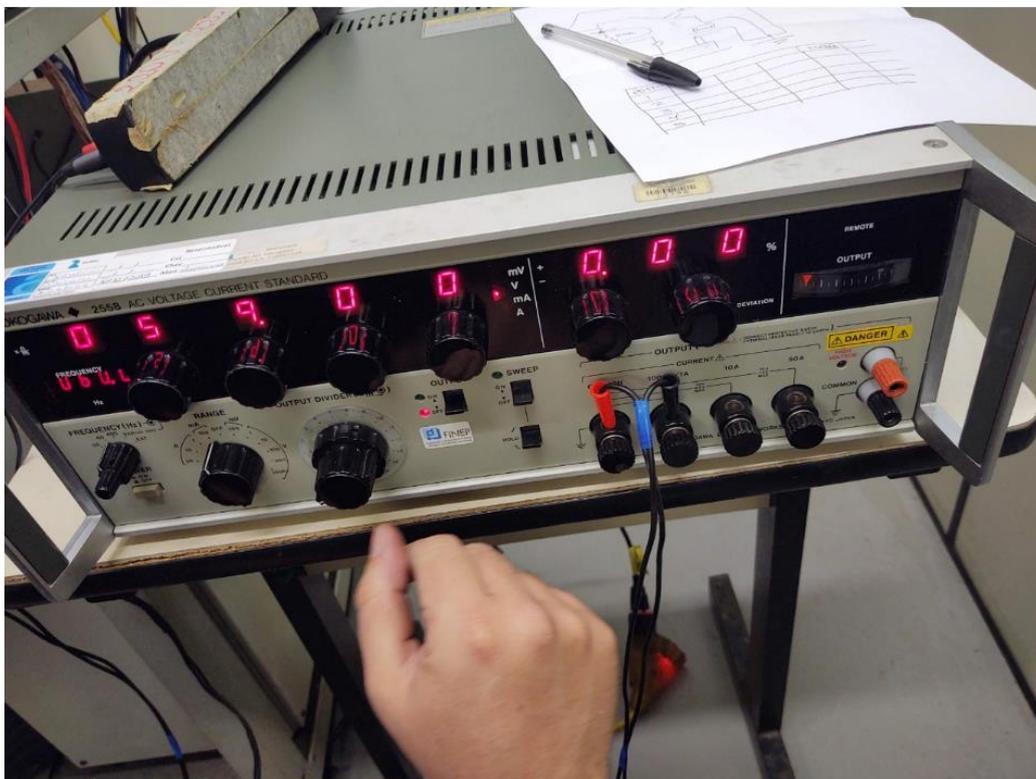


Figura 50 – Imagem do padrão de corrente utilizado para a verificação do sistema de sobrecorrente

Fonte: O Autor, 2020.

Aferiu-se então, o nível de corrente necessário para o disparo de cada posição, bem como o tempo necessário para tal disparo, utilizando-se de um cronômetro digital. O cronômetro utilizado também estava com a sua calibração (rastreadável RBC) em dia. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 9 e na Tabela 10 e atestam o correto funcionamento dos sistemas de sobrecorrente.

Tabela 9 – Resultados da verificação das correntes de disparo das placas de sobrecorrente

Posição da Mesa	Corrente de Disparo (Trip) [mA]			Média [mA]	Valor Padrão [mA]	Desvio
	Medição					
	1	2	3			
1.1	60,10	60,08	60,05	60,077	60,00	0,13%
1.2	59,95	59,94	59,96	59,950		-0,08%
1.3	60,42	60,42	60,43	60,423		0,71%
1.4	60,40	60,43	60,43	60,420		0,70%
1.5	59,94	59,94	59,94	59,940		-0,10%
Posição da Mesa	Corrente de Disparo (Trip) [mA]			Média [mA]	Valor Padrão [mA]	Desvio
	Medição					
	1	2	3			
2.1	59,99	59,98	59,97	59,980	60,00	-0,03%
2.2	60,27	60,31	60,29	60,290		0,48%
2.3	59,99	59,96	59,98	59,977		-0,04%
2.4	60,32	60,33	60,3	60,317		0,53%
2.5	60,31	60,33	60,3	60,313		0,52%

Fonte: O Autor, 2020

Tabela 10 – Resultados da verificação dos tempos de disparo das placas de sobrecorrente

Posição da Mesa	Verificação do Tempo de Disparo (Trip)			Valor Padrão [s]
	Medição			
	1	2	3	
1.1	OK	OK	OK	2,00
1.2	OK	OK	OK	
1.3	OK	OK	OK	
1.4	OK	OK	OK	
1.5	OK	OK	OK	
Posição da Mesa	Tempo de Disparo (Trip) [s]			Valor Padrão [s]
	Medição			
	1	2	3	
2.1	OK	OK	OK	2,00
2.2	OK	OK	OK	
2.3	OK	OK	OK	
2.4	OK	OK	OK	
2.5	OK	OK	OK	

Fonte: O Autor, 2020

3.5. Câmeras de Monitoramento

A fim de monitorar o aspecto visual da evolução do processo de trilhamento, câmeras de vídeo foram instaladas de modo a registrar durante todo o ensaio a face inferior de cada corpo de prova, que estará em contato com o líquido contaminante. Dessa forma, pode-se ter a noção exata dos momentos nos quais o trilhamento evoluiu ou passou a ocorrer de forma mais intensa, isto é, a trilha carbonácea formada atingiu um comprimento maior. As câmeras, mostradas na Figura 51, possuem resolução 720p e permitem a visualização de detalhes da amostra e do trilhamento que nela eventualmente ocorra. Já a Figura 52 mostra um exemplo das imagens e informações que podem ser obtidas.



Figura 51 – Imagem das câmeras de vídeo - espectro visível

Fonte: O Autor, 2019



Figura 52 – Imagens da evolução do processo de trilhamento elétrico
Fonte: O Autor, 2019

3.6. Medição da Temperatura e Imagens Térmicas

A importância da taxa de absorção pelo material testado da energia fornecida pelo centelhamento e demais processos que ocorrem durante o fenômeno do trilhamento elétrico já foi discutida nos itens anteriores. Ademais, como o trilhamento ocorre na parte inferior das amostras e estas se situam a uma inclinação de 45° em relação à horizontal, avaliar o perfil de distribuição de temperatura ao longo das suas faces superiores pode fornecer informações acerca de como a energia fornecida ao material é absorvida e como se distribui ao longo de todo o seu volume (Ghunem e Cherney, 2015). Para tal análise, utilizou-se câmeras de espectro infravermelho da fabricante *FLIR*, modelo *AX8*, mostradas na Figura 53. Já a Figura 54 mostra um exemplo das imagens e informações que podem ser obtidas.



Figura 53 – Imagem das câmeras de imagem térmica - espectro infravermelho

Fonte: O Autor, 2020



Figura 54 - Imagem térmica do processo de trilhamento elétrico
 Fonte: O Autor, 2019

Além disso, a fim de acompanhar a evolução da temperatura média da face superior das amostras ensaiadas, foram também instalados sensores de temperatura da fabricante *Omega*, modelo, *IR-USB*. Tais equipamentos, mostrados na Figura 55, são capazes de registrar em tempo real as alterações na temperatura de forma gráfica, conforme mostrado na Figura 56. Conforme é possível perceber na Figura 55, tais sensores foram instalados a uma distância específica das faces dos corpos de prova testados, de maneira a medir a temperatura média da superfície e não de pontos específicos. Para tal, seguiu-se a recomendação (Figura 57) fornecida pelo fabricante sobre o campo de visão dos equipamentos, de modo que o cone de leitura de temperatura dos termômetros se situasse no trecho entre os eletrodos.

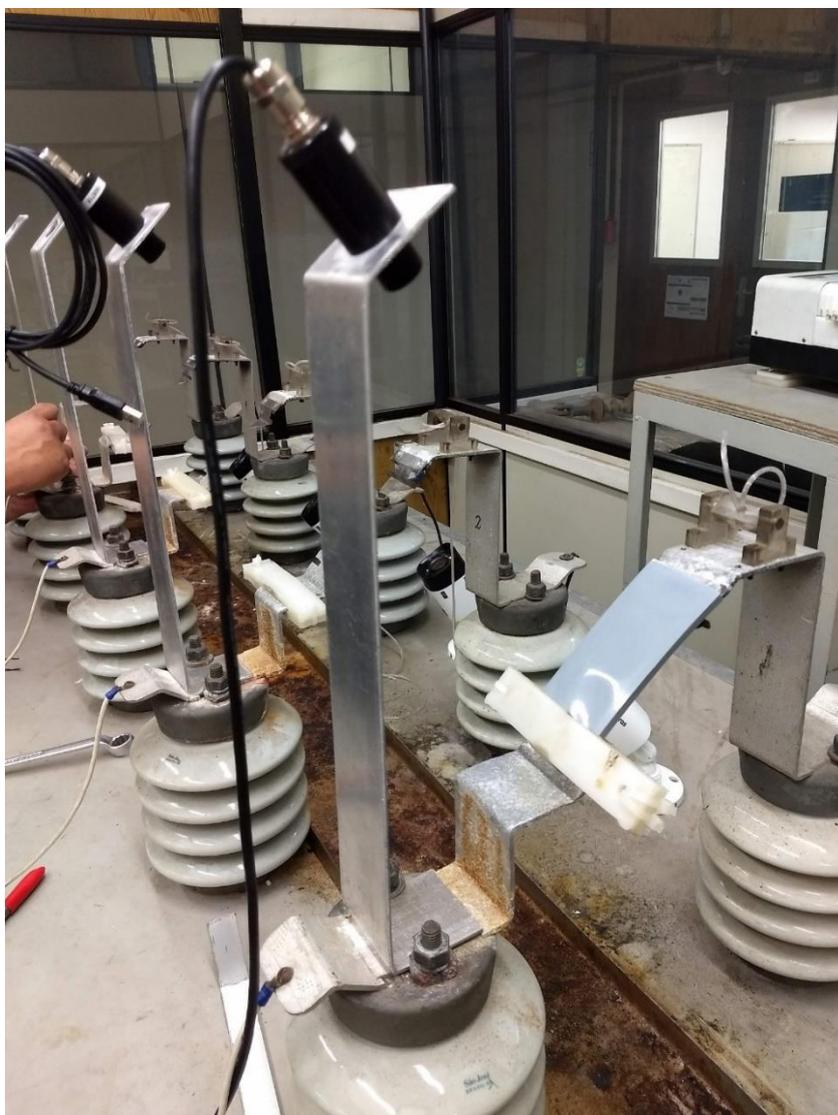


Figura 55 – Imagem do sistema de medição da temperatura média superficial das amostras

Fonte: O Autor, 2020

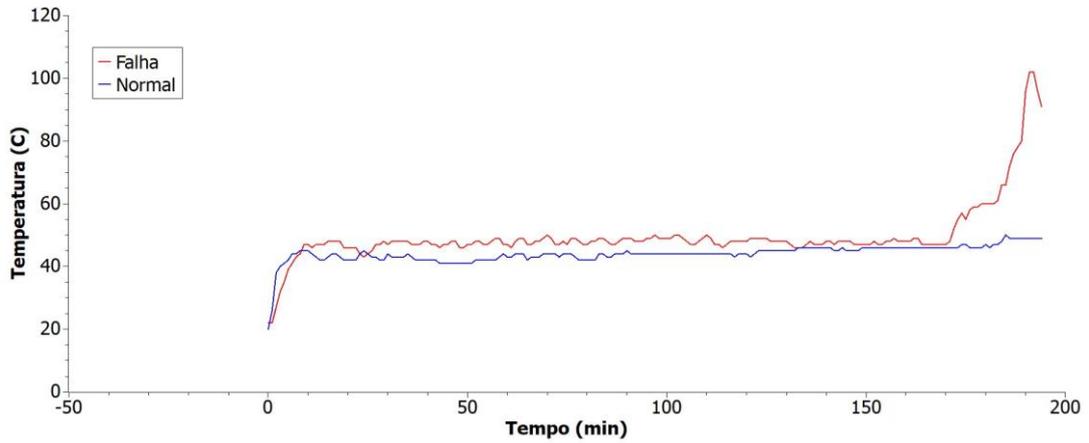


Figura 56 – Exemplo de gráfico resultante do acompanhamento da temperatura superficial média dos corpos de prova sob ensaio

Fonte: O Autor, 2018

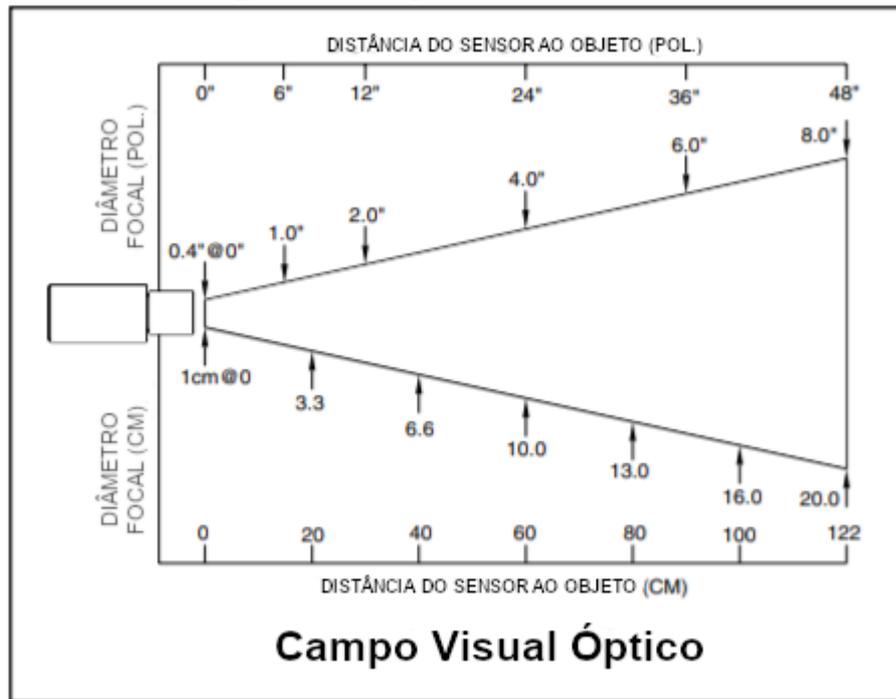


Figura 57 – Diagrama representativo do campo visual dos sensores de temperatura

Fonte: Adaptado de Omega, 2018

3.7. Amostras

A fim de estudar o comportamento de materiais poliméricos submetidos ao trilhamento elétrico e analisar como a evolução do fenômeno interfere na temperatura e distribuição de calor nesses materiais, diferentes formulações de um mesmo polímero foram produzidas com concentrações variáveis de aditivos e cargas. Para tal, foram produzidas pelo processo de termoprensagem cinco corpos de prova com cada formulação, formando placas retangulares padrão conforme as mostradas na Figura 58. As amostras padrão possuem três orifícios, que servem para fixar as placas no aparato de ensaio (ASTM, 2020). Como o equipamento utilizado neste trabalho não necessita de tais furos para prender os corpos de prova – as amostras são presas utilizando cintas plásticas de amarração – estes furos não foram feitos e os corpos de prova eram, portanto, contínuos.

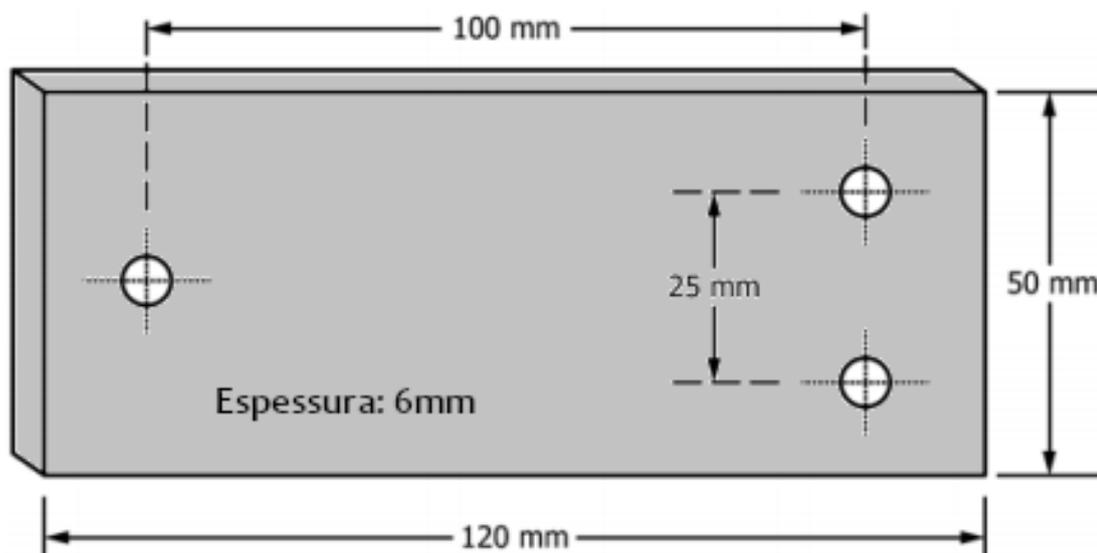


Figura 58 – Representação esquemática do corpo de prova padrão para os ensaios de resistência ao trilhamento elétrico em plano inclinado

Fonte: Adaptado de ASTM, 2020.

As formulações testadas no desenvolvimento deste trabalho utilizaram como polímero base o polietileno de alta densidade (PEAD). As composições consideradas também continham antioxidantes, negro de fumo e aditivos, como o hidróxido de magnésio e o dióxido de titânio. Assim, buscou-se obter formulações semelhantes às utilizadas por fabricantes na produção de acessórios em polietileno para linhas compactas, como espaçadores e isoladores. Para tal, utilizou-se amostras com as formulações propostas e desenvolvidas por Hobmeir (2020). A Tabela 11 mostra as diferentes formulações utilizadas.

Tabela 11 - Formulações de polietileno avaliadas

Amostra	Percentual em Massa na Composição				
	PEAD	Hidróxido de Magnésio (Mg(OH) ₂)	Antioxidante	Negro de Fumo	Dióxido de Titânio (TiO ₂)
PE_0%	97,97	0	0,5	0,03	1,5
PE_5%	92,97	5	0,5	0,03	1,5
PE_10%	87,97	10	0,5	0,03	1,5
PE_15%	82,97	15	0,5	0,03	1,5

Fonte: Adaptado de (HOBMEIR, 2020)

Conforme mencionado em Hobmeir (2020), o polietileno utilizado foi da marca *Continuum*, produzido pela fabricante *Dow Chemical*, cuja folha de dados pode ser encontrada em anexo a este trabalho. Já o antioxidante é do tipo *Irganox 1010* da fabricante *BASF*, um antioxidante fenólico utilizado em diversos polímeros, como polietileno, o polipropileno, o PVC e o poliestireno, entre outros (Ciba Polymers, 1998). O hidróxido de magnésio utilizado foi o da fabricante *Huber*.

Conforme mencionado anteriormente, as amostras foram confeccionadas por meio do processo de termoprensagem, conforme descrito em Hobmeir (2020). Tal processo consiste em moldar o material polimérico, já misturado com seus aditivos e cargas por meio de uma prensa a quente, com o intuito de fundi-lo e conformá-lo a um molde seguindo temperaturas e pressões constantes ou em rampas pré-definidas. Tais parâmetros podem interferir diretamente na estrutura final do material polimérico produzido, influenciando na sua cristalinidade e alterando suas características (Van Vlack, 1970). A Figura 59 mostra uma ilustração do processo.

Para as amostras utilizadas neste trabalho, a termoprensagem foi realizada em uma prensa automática da fabricante *Mastermac* à temperatura de cerca de 180 °C e uma pressão de até 30 kgf/cm² (HOBMEIR, 2020). O equipamento é mostrado na Figura 60.

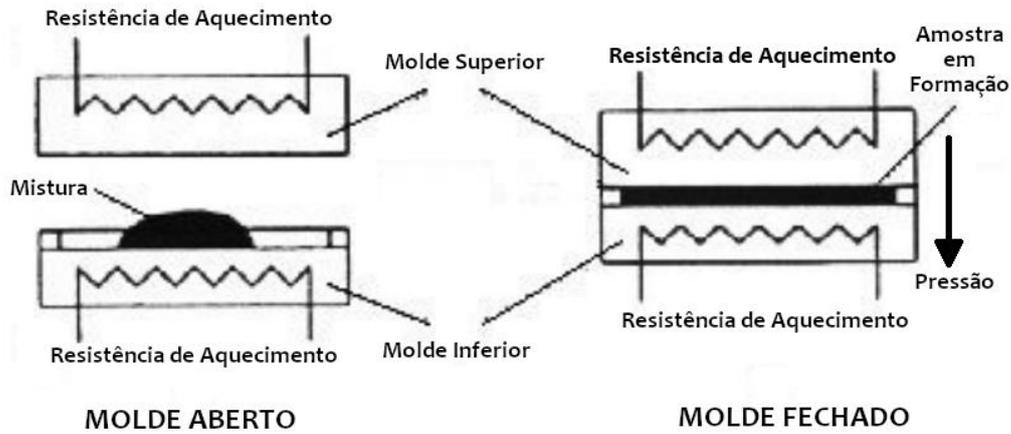


Figura 59 – Ilustração do processo de moldagem por termoprensagem
Fonte: Adaptado de Larotonda, 2002.



Figura 60 – Imagem da termoprensa utilizada na confecção de amostras
Fonte: O Autor, 2020.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos testes realizados, bem como as principais observações e informações relevantes obtidas. Os resultados e a classificação das amostras segundo a norma ABNT NBR 10296, bem como as imagens no espectro do visível, as imagens térmicas e o perfil de temperatura das diferentes formulações ensaiadas quanto à resistência ao trilhamento elétrico serão discutidos.

4.1. Resultados dos Ensaio

Os resultados obtidos para a formulação isenta de hidróxido de magnésio são apresentados na Tabela 12. O material falhou no patamar de 3,00 kV, atingindo portanto a classificação 2A 2,75. Tal classificação é condizente com formulações de PEAD sem aditivos anti-trilhamento, como o caso do hidróxido de magnésio, como mostraram Mathes e McGowan (1961). Já a Figura 61 mostra a superfície inferior do CP que falhou, alguns minutos antes do desligamento do sistema de proteção. Houve combustão do material polimérico e o trilhamento evoluiu de forma rápida, nos últimos 4 minutos do patamar de ensaio.

Tabela 12 – Resultados da Amostra PE_0%

Estado final: S – Suportou P – Atuou Proteção C – Combustão T - Trilhou										
Tensão kV	Corpos-de-prova Envelhecidos									
	1		2		3		4		5	
	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado
2,75	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,00	--	--	--	--	--	--	34 min.	TPC	--	--
3,25	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Obs.:										
- Resistividade da solução contaminante de 394,5 Ω.cm.										

Fonte: O Autor, 2020



Figura 61 – Sequência de imagens do processo de falha da Amostra PE_0%

Fonte: O Autor, 2019

Já no que tange à amostra com 5% em massa de hidróxido de magnésio, os resultados obtidos são mostrados na Tabela 13. Neste caso, a amostra suportou um patamar a mais que a formulação padrão, atingindo a classificação 2A 3,00, mas também entrou em combustão, o que mostra a influência do aditivo na resistência ao trilhamento elétrico, mas não em quantidade suficiente para impedir a falha.

Tabela 13 - Resultados da Amostra PE_5%

Estado final: S – Suportou P – Atuou Proteção C – Combustão T - Trilhou										
Tensão kV	Corpos-de-prova novos									
	1		2		3		4		5	
	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado
2,75	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,00	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,25	21 min.	TP	--	--	--	--	--	--	--	--
Obs.:										
- Resistividade da solução contaminante de 394,5 Ω.cm.										

Fonte: O Autor, 2020

A Figura 62, mostra o comportamento da amostra no momento da falha. Pode-se perceber que houve retardamento na evolução do trilhamento elétrico, que se deu neste caso em cerca de 8 minutos.



Figura 62 - Sequência de imagens do processo de falha da Amostra PE_5%

Fonte: O Autor, 2019

A seguir, os resultados obtidos para a formulação com 10% de $Mg(OH)_2$ são apresentados na Tabela 14. Neste caso, houve um acréscimo de 0,75 kV na resistência ao trilhamento do material, atingindo a classificação 2A 3,75. Em outras palavras, a formulação resistiu três patamares adicionais de tensão em relação à amostra contendo apenas 5% de aditivo. Além disso, a alteração na formulação foi suficiente para evitar a combustão no material sendo que a falha ocorreu apenas pela perda da função isolante.

Tabela 14 - Resultados da Amostra PE_10%

Estado final: S – Suportou P – Atuou Proteção C – Combustão T - Trilhou										
Tensão kV	Corpos-de-prova novos									
	1		2		3		4		5	
	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado
2,75	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,00	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,25	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,50	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,75	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
4,00	--	--	--	--	15 min.	TP	--	--	--	--

Obs.: - Resistividade da solução contaminante de 395,2 Ω .cm.

Fonte: O Autor, 2020

A Figura 63 mostra a evolução da degradação pelo trilhamento nessa formulação de PEAD, mostrando que não houve combustão do polímero. O tempo entre o início do trilhamento e a falha da amostra foi de cerca de 13 minutos.



Figura 63 – Sequência de imagens do processo de falha da Amostra PE_10%

Fonte: O Autor, 2019

Já a Tabela 15 mostra os resultados para a formulação contendo 15% de hidróxido de magnésio. A formulação resistiu a todos os patamares de tensão previstos pela norma ABNT NBR 10296, atingindo a classificação de 2A 6,00. A Figura 64, apresenta os últimos minutos de ensaio do CP mais deteriorado da amostra, mostrando que não houve trilhamento significativo no material de tal formulação de PEAD.

A Tabela 16 mostra o resumo dos resultados obtidos para as formulações testadas, bem como o modo principal de falha de cada uma delas. Ao analisar a tabela é possível perceber o efeito das diferentes concentrações do aditivo hidróxido de magnésio, isto é, quanto maior a sua concentração na composição da amostra (até 15% em massa), maior foi a resistência ao trilhamento elétrico.

Tabela 15 - Resultados da Amostra PE_15%

Estado final: S – Suportou P – Atuou Proteção C – Combustão T - Trilhou										
Tensão kV	Corpos-de-prova novos									
	1		2		3		4		5	
	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado	Tempo	Estado
2,75	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,00	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,25	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,50	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
3,75	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
4,00	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
4,25	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
4,50	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
4,75	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
5,00	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
5,25	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
5,50	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
5,75	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
6,00	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S

Obs.: - Resistividade da solução contaminante de 395,4 Ω .cm.

Fonte: O Autor, 2020



Figura 64 – Imagem dos minutos finais do ensaio da Amostra PE_15%
Fonte: O Autor, 2019

Tabela 16 - Resumo dos resultados obtidos

Amostra	Percentual em Massa na Composição		
	Percentual de $Mg(OH)_2$	Classificação	Modo de Falha
PE_0%	0	2A 2,75	Trilhamento e Combustão
PE_5%	5	2A 3,00	Trilhamento e Combustão
PE_10%	10	2A 3,75	Trilhamento
PE_15%	15	2A 6,00	Não houve

Fonte: O Autor, 2021

4.2. Registro Termográfico

A importância de analisar o comportamento térmico das diferentes formulações já foi comentada e explicada nesse trabalho. Assim, serão apresentados os resultados obtidos para o acompanhamento de temperatura e imagem térmica infravermelha de cada uma das composições de PEAD propostas.

Primeiramente, os resultados obtidos para a formulação sem adição de hidróxido de magnésio são mostrados na Figura 65. Constata-se que, nos últimos 20 minutos de ensaio, a temperatura média da superfície superior da amostra elevou-se consideravelmente, em cerca de 43 °C.

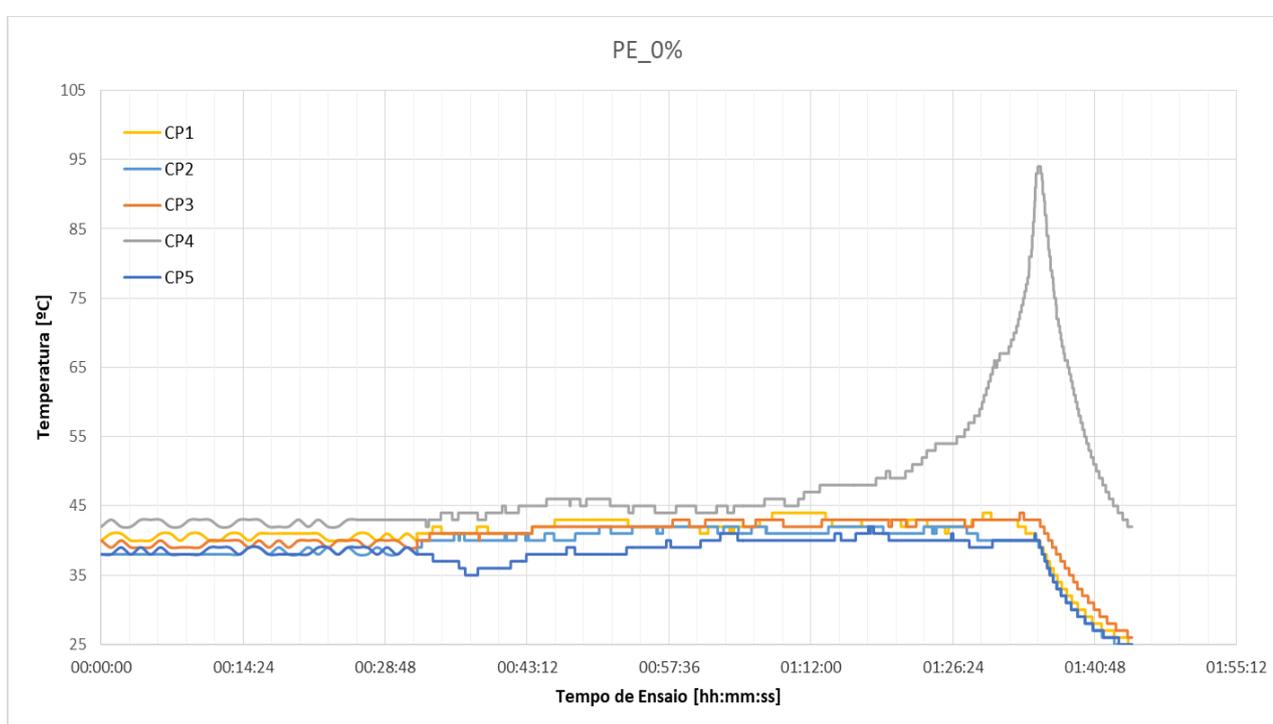


Figura 65 – Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_0% ao longo do ensaio - Todos os CPs

Fonte: O Autor, 2021

A fim de tornar mais fácil a visualização do comportamento deste composto polimérico, isolou-se apenas o corpo de prova (CP) mais crítico entre os cinco que compõem o ensaio (CP4). Tal gráfico é apresentado na Figura 66.

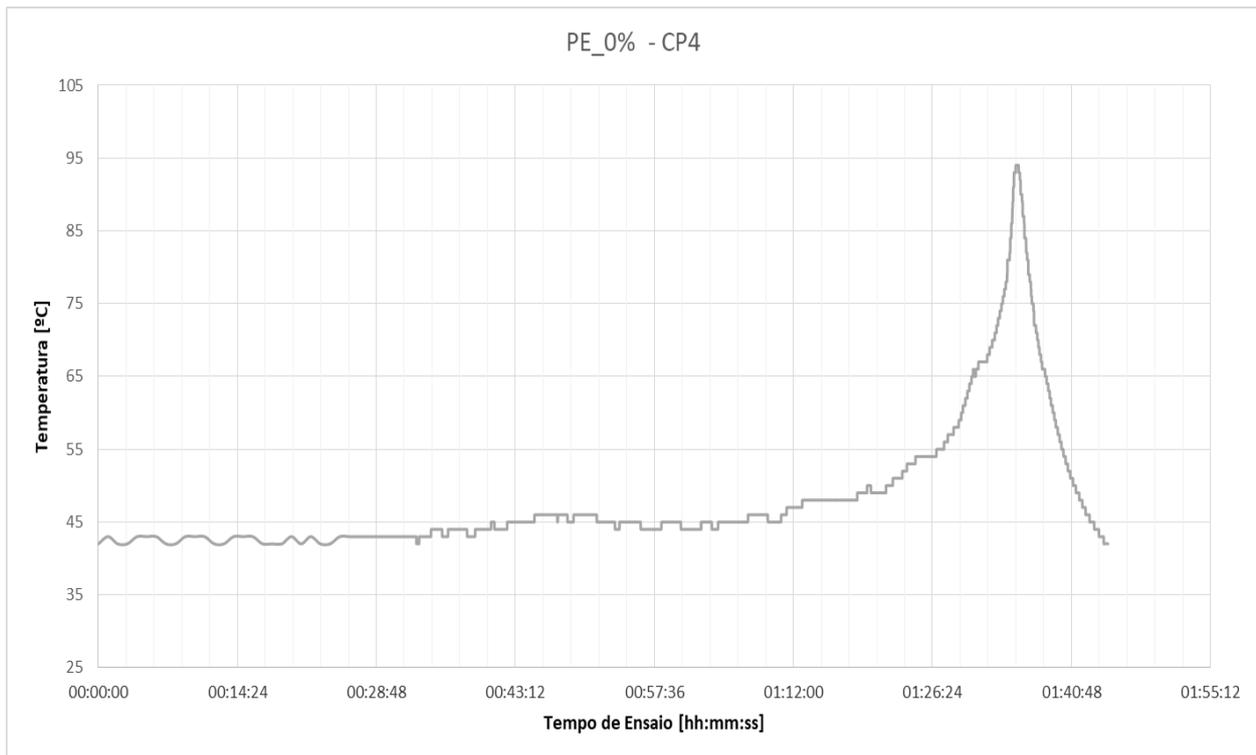


Figura 66 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_0% ao longo do ensaio - CP4

Fonte: O Autor, 2021

Percebe-se também que apenas o CP4 apresentou elevação na sua temperatura enquanto os demais CPs se mantiveram estáveis. Isto pode ser explicado devido à rápida evolução do trilhamento elétrico no CP, em cerca de 4 minutos conforme mostra a Figura 61. Como o início da degradação por trilhamento em cada corpo de prova pode se dar em momentos diferentes, o ensaio acabou sendo interrompido pela falha do CP4 antes que os demais CPs apresentassem o mesmo comportamento.

Já a Figura 67 mostra o comportamento de tal corpo de prova (CP4) em seu momento de trilhamento elétrico mais intenso. É possível perceber que a energia liberada pelos arcos de bandas secas e fornecida ao material se concentra apenas na região da cintilação.

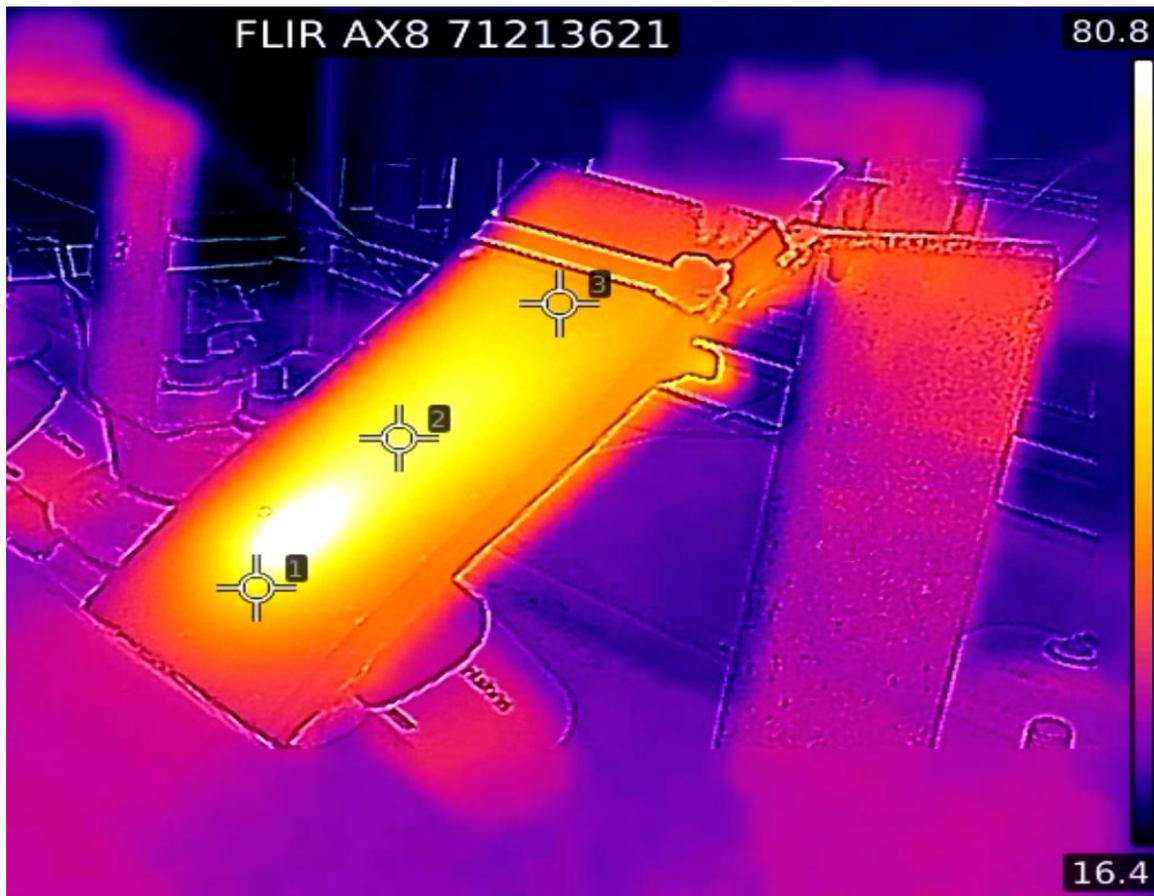


Figura 67 - Imagem térmica mostrando a distribuição de temperatura na amostra PE_0%
Fonte: O Autor, 2019

A formulação contendo 5% de aditivo baseado hidróxido de magnésio apresentou comportamento similar à formulação sem o aditivo, porém com menores temperaturas. A Figura 68 mostra o acompanhamento da temperatura média da face superior dos CPs da amostra, isto é, a face não sujeita aos efeitos diretos do trilhamento. O pequeno pico negativo de temperatura mostrado ligeiramente antes de o ensaio completar duas horas de duração podem ser efeito das pequenas pausas na aplicação de tensão que são feitas para manutenção no ensaio, isto é, reposição do líquido contaminante e troca dos resistores.

De maneira similar ao que foi feito para a formulação anterior, a Figura 69 mostra apenas o corpo de prova que falhou devido ao trilhamento elétrico, que neste caso, foi o corpo de prova de número 1 (CP1). Nota-se o comportamento que se assemelha ao PEAD sem $Mg(OH)_2$, com menores temperaturas atingidas, no entanto (cerca de 68 °C contra mais de 80°C da formulação anterior).

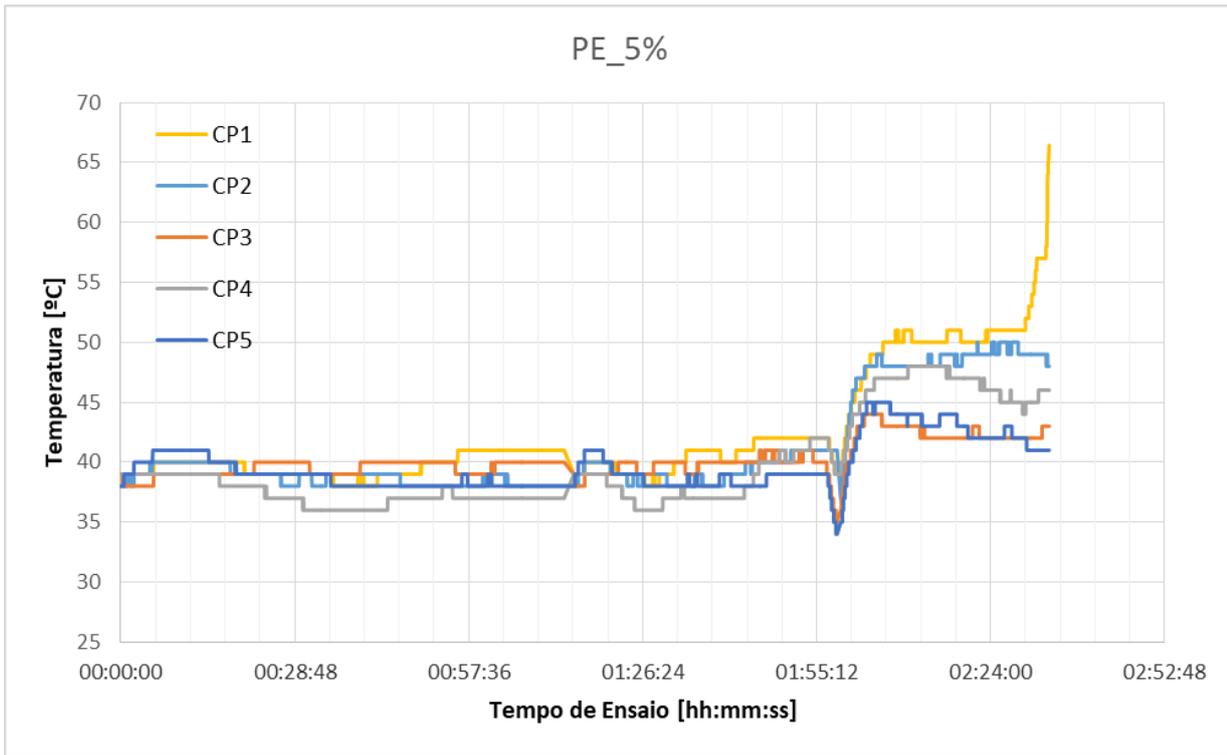


Figura 68 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_5% ao longo do ensaio - Todos os CPs
 Fonte: O Autor, 2021

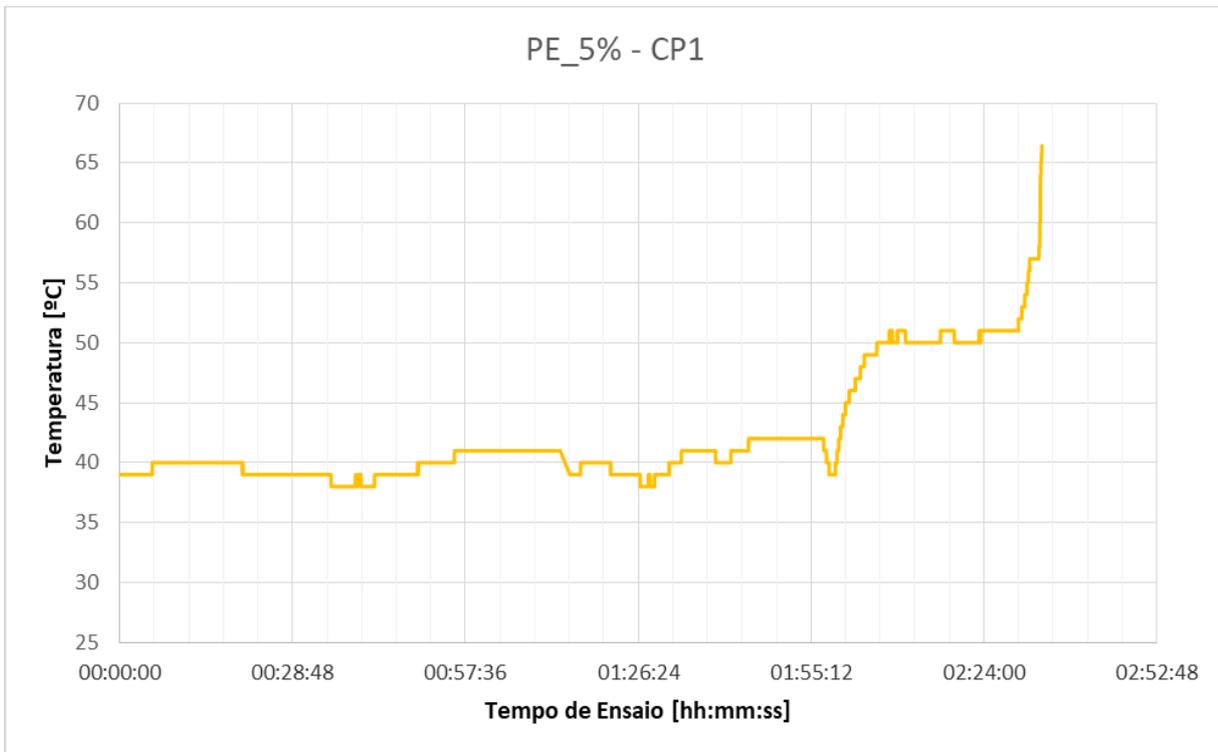


Figura 69 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_5% ao longo do ensaio - CP1
 Fonte: O Autor, 2021

Do mesmo modo, a Figura 70 mostra a distribuição de temperatura na superfície do corpo de prova cuja temperatura é mostrada na Figura 69. Pode-se perceber uma imagem semelhante à da formulação anterior, com a temperatura cerca de 25% menor. Além disso, constata-se uma distribuição mais uniforme do calor ao longo do material.

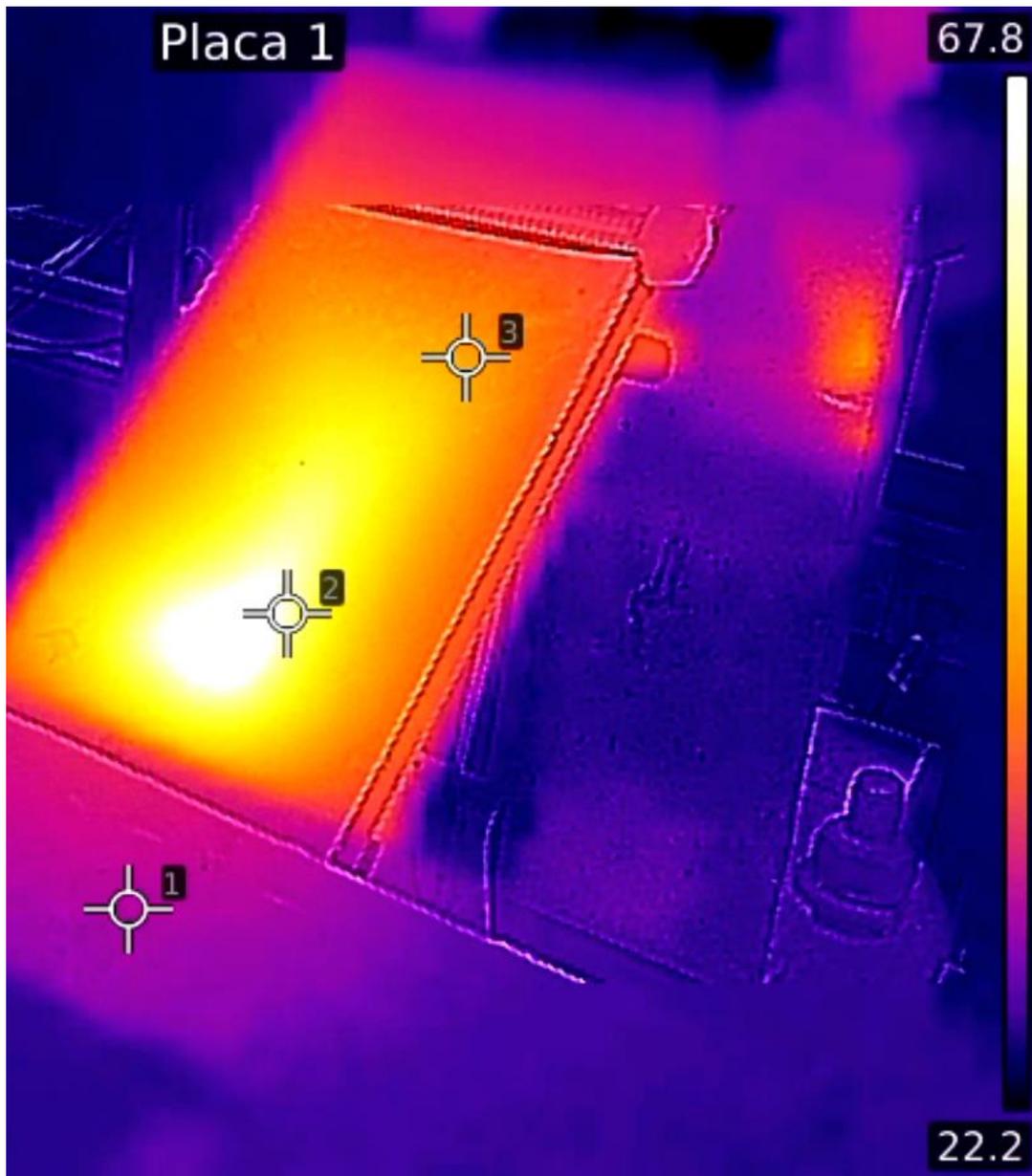


Figura 70 - Imagem térmica mostrando a distribuição de temperatura na Amostra PE_5%
Fonte: O Autor, 2019

Em seguida, a Figura 71 mostra o registro da temperatura superficial média para a amostra PE_10%. Neste caso, houve apenas um pico de temperatura nos últimos 20 minutos de ensaio, atingindo em torno de 52 °C e os materiais testados não chegaram a entrar em combustão.

Assim como nas formulações anteriores, a Figura 72 mostra o corpo de prova que falhou ao final do ensaio. Percebe-se uma maior estabilidade nas temperaturas observadas.

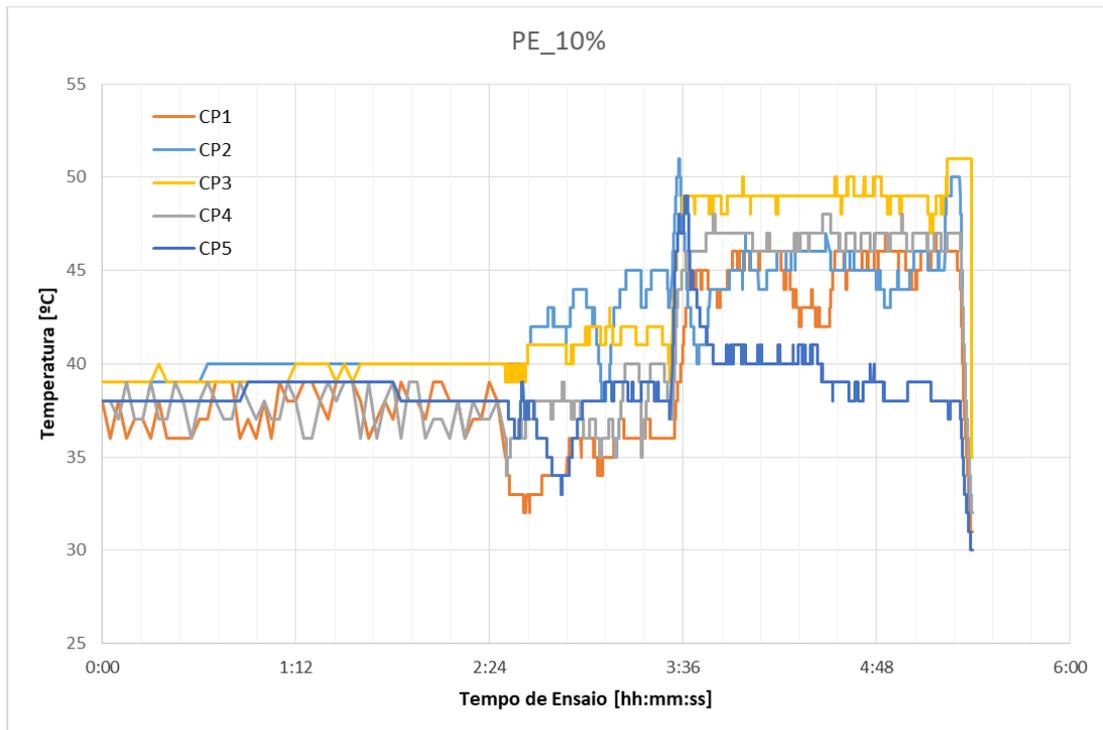


Figura 71- Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_10% ao longo do ensaio - Todos os CPs
Fonte: O Autor, 2021

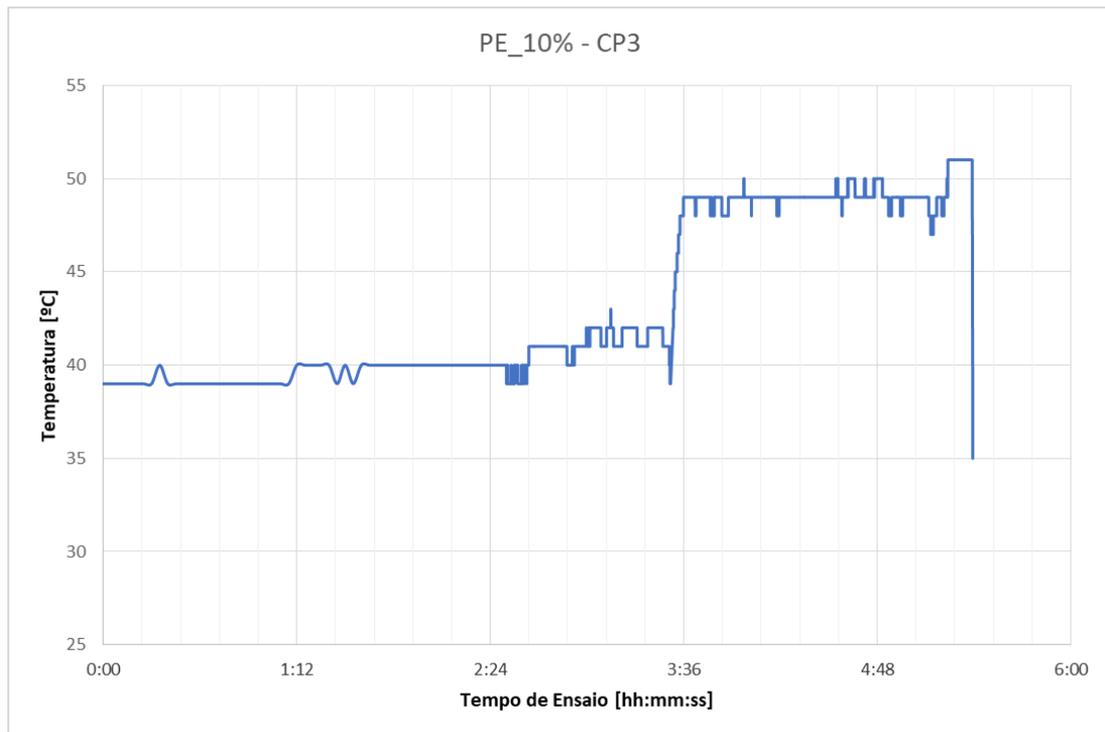


Figura 72 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_10% ao longo do ensaio - CP3
 Fonte: O Autor, 2021

Novamente, a mostra o perfil de temperatura da superfície superior do corpo de prova que mais apresentou trilhamento dentre os cinco pertinentes à amostra com 10% de hidróxido de magnésio. É possível verificar que a energia distribuiu-se mais uniformemente ao longo de todo o volume da amostra e que as temperaturas se mantiveram mais amenas, isto é, cerca de 10% inferiores às atingidas na amostra anterior (PE_5%).



Figura 73 - Imagem térmica mostrando a distribuição de temperatura na Amostra PE_10%

Fonte: O Autor, 2019

A Figura 74 mostra as temperaturas medidas para a amostra com formulação contendo 15% de aditivo misturado ao PEAD. Neste caso, não são observados picos de temperatura mas sim diferentes platôs, que correspondem aos vários patamares de tensão de ensaio, que são alterados de hora em hora. Os picos negativos observados são atribuídos às pausas para ajustes nos parâmetros de ensaio e reposição do suprimento de eletrólito, por exemplo. Ainda, no caso do corpo de prova de número 5 (CP 5) a queda na temperatura na região central do ensaio se deu devido ao entupimento de uma das mangueiras da bomba e não deve ser correlacionada com a formulação em si.

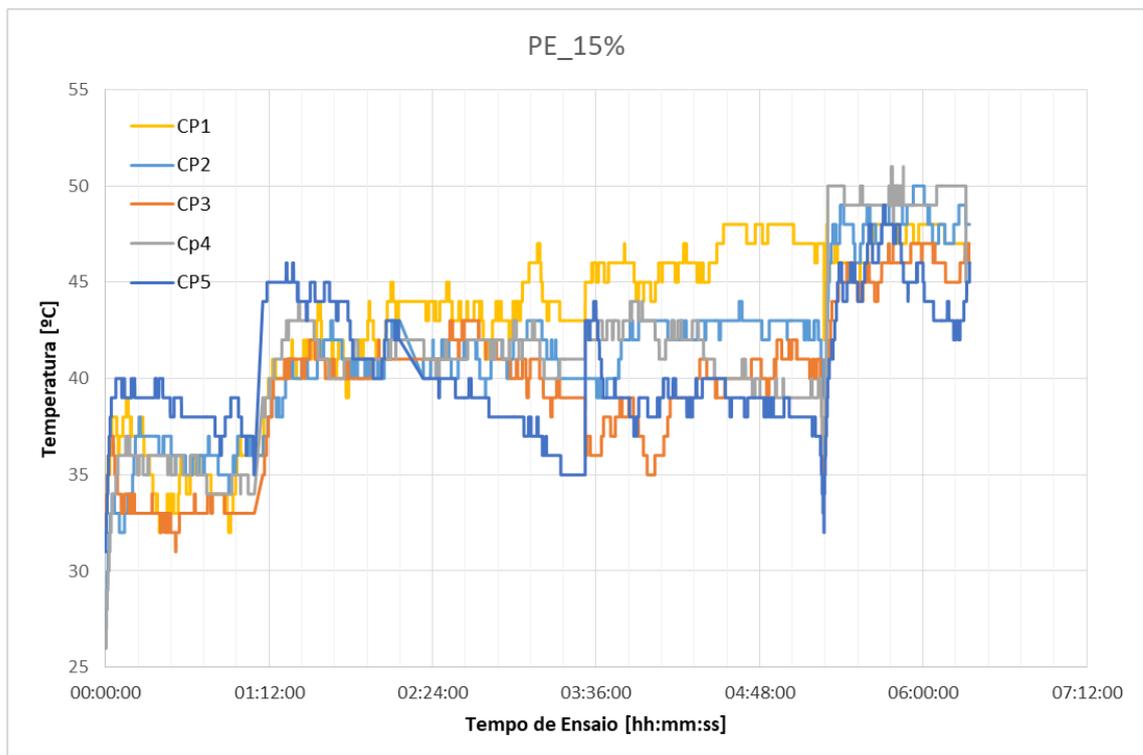


Figura 74 - Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_15% ao longo do ensaio - Todos os CPs

Fonte: O Autor, 2021

Mais uma vez, a Figura 75 mostra o corpo de prova com temperatura final mais elevada – uma vez que não houve falha – entre os cinco testados. Observa-se as rampas de temperatura que ocorrem quando se altera substancialmente o nível de tensão, sobretudo quando há a troca de resistores e do valor de fluxo da solução contaminante (Tabela 5). Ademais, percebe-se a estabilidade da temperatura no patamar final do ensaio (6,00 kV), com variações de temperatura inferiores a 5%.

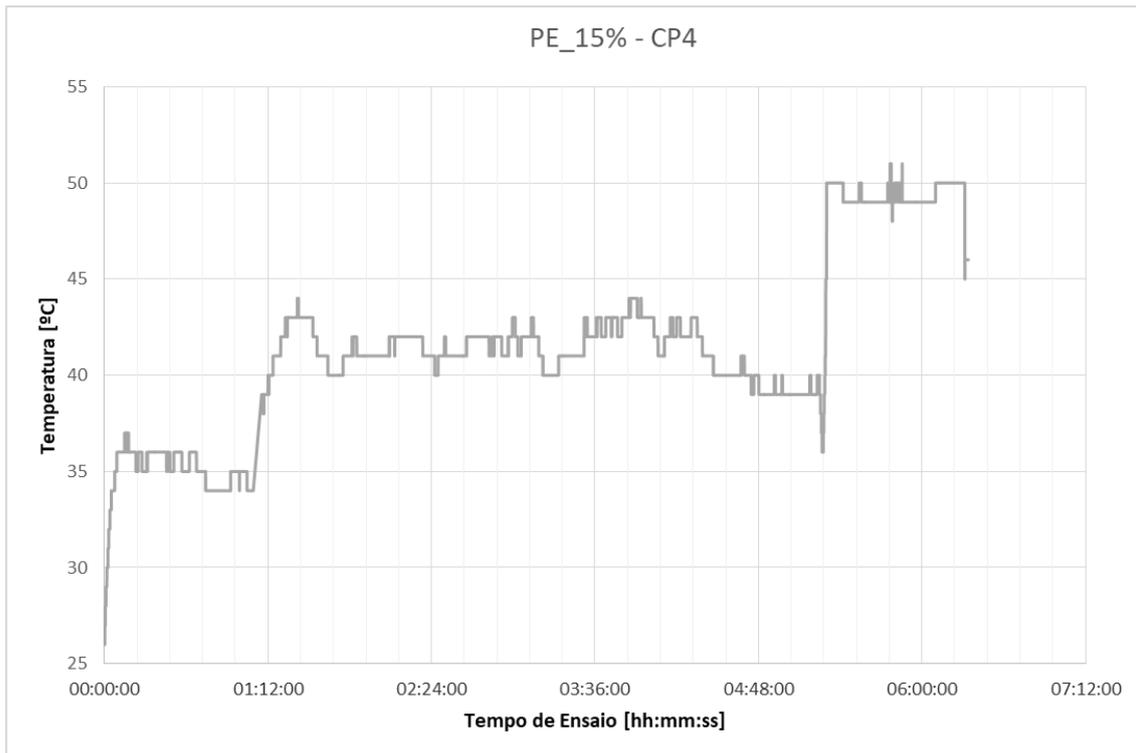


Figura 75 – Gráfico da temperatura superficial média da formulação PE_15% ao longo do ensaio - CP4

Fonte: O Autor, 2021

A imagem térmica apresentada na Figura 76 corrobora a tendência observada nos resultados anteriores de melhoria na resistência ao trilhamento elétrico com o aumento do percentual de aditivo presente. Percebe-se a temperatura ainda mais distribuída pela amostra quando comparada às formulações anteriores.



Figura 76 – Imagem térmica mostrando a distribuição de temperatura na Amostra PE_15%

Fonte: O Autor, 2019

4.3. Análise dos Resultados e Discussão

As imagens e os dados de temperatura apresentados nas seções anteriores permitem estabelecer algumas correlações e realizar algumas constatações importantes.

Conforme discutido na seção 2.6 deste trabalho, o fenômeno do trilhamento elétrico e a resistência dos materiais poliméricos à ele submetidos tem relação, teoricamente, com as entalpias de ligação e as características físico-químicas das estruturas que constituem os polímeros. Os trabalhos de Parr e Scarisbrick (1965) e posteriormente de Huang et. al. (2018) comprovam a tese de que dependendo da quantidade de energia fornecida e absorvida pelo material, suas ligações covalentes podem ser quebradas.

Adicionalmente, conforme mostrado por diversos autores na literatura, entre eles Ghunem e Chemey (2015), mostram que aditivos hidratados baseados em compostos orgânicos metálicos, entre eles a alumina tri-hidratada (ATH) e o hidróxido de magnésio, além de melhorarem a condutividade térmica do material, vide Tabela 3, ao sofrerem desidratação, acabam retirando a energia fornecida à amostra, seja ela advinda de uma combustão ou de um arco de bandas secas (DBA), absorvendo parte do calor e o transferindo ao ambiente.

Assim, visto que o trilhamento elétrico gera altas temperaturas e por conseguinte transfere energia ao material polimérico, espera-se que haja relação entre o desempenho de diferentes formulações de compostos poliméricos, seus desempenhos frente à degradação pelo trilhamento e a maneira com que estes absorvem energia.

Uma maneira de observar como essa absorção de energia se dá é verificando a temperatura que o material atinge ao longo de um ensaio normalizado que simule o processo natural do trilhamento elétrico. A constatação da relação entre o desempenho de diferentes amostras e a temperaturas alcançadas se torna evidente ao se observar a Figura 77. Em tal gráfico, são esboçadas as temperaturas médias das superfícies superiores dos corpos de prova, durante a última hora de ensaio, que falharam ou apresentaram as maiores temperaturas dentre os demais.

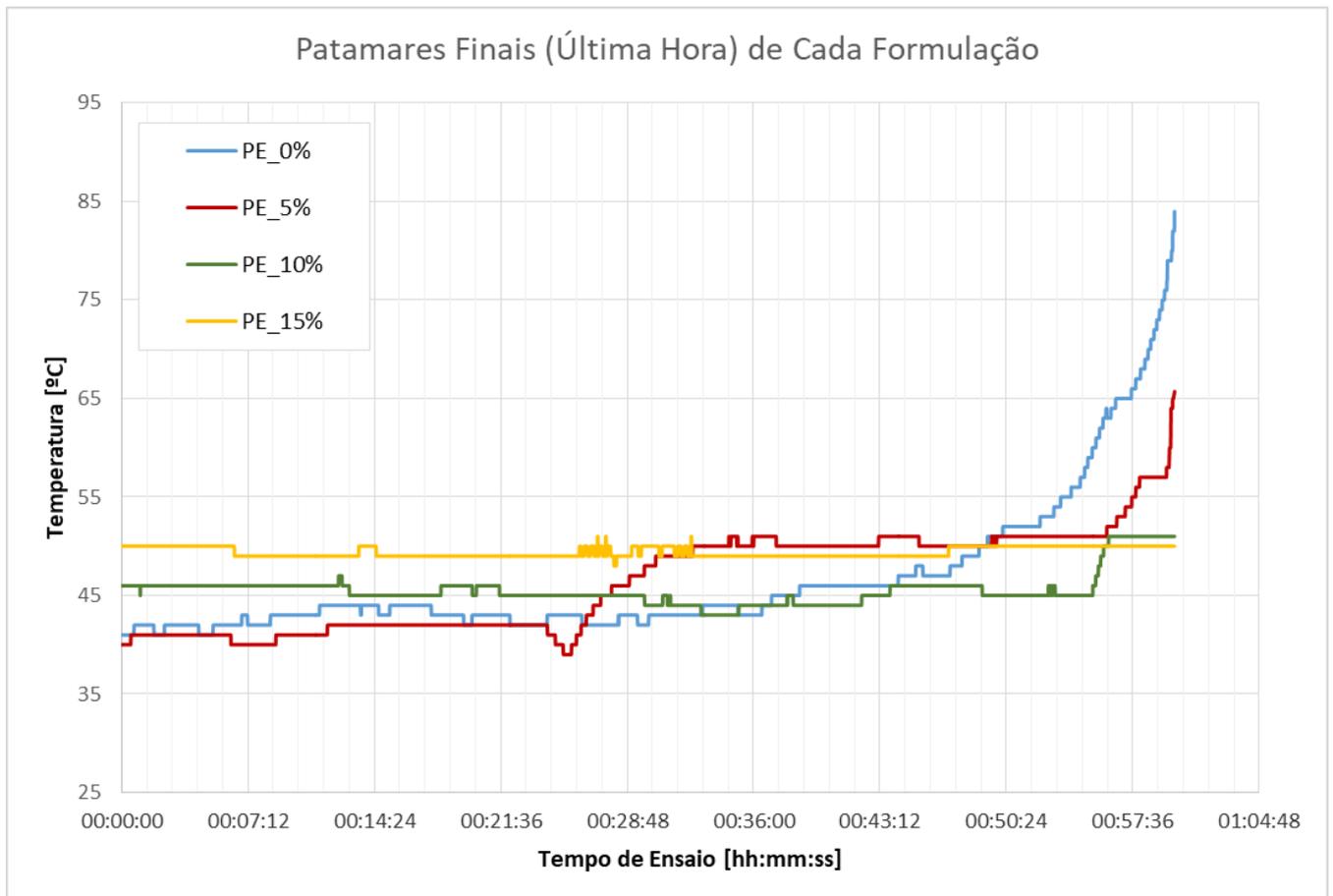


Figura 77 – Gráfico contendo a comparação entre as formulações quanto à temperatura nos patamares finais do ensaio

Fonte: O Autor, 2021

A temperatura apresentada pela amostra contendo a maior concentração do aditivo hidróxido de magnésio, apesar de ser maior em valores absolutos que de algumas das outras amostras, manteve-se estável, com variação inferior a 5%. Já nas outras formulações, tão menor foi o percentual de aditivo na composição, maior e mais rápida foi a elevação de temperatura observada. Por exemplo, na formulação sem hidróxido de magnésio, a temperatura dobrou, de cerca de 40 °C a mais de 80°C em cerca de 20 minutos.

Em outras palavras, a taxa de absorção de energia do material (em forma de calor), que reflete na sua elevação de temperatura, se altera consideravelmente antecedendo a falha catastrófica do material polimérico. As taxas de elevação de temperatura nos patamares finais de cada formulação são mostradas na Figura 78. Percebe-se que, quanto maior a variação de temperatura apresentada pelo material em um determinado patamar de tensão, maior a chance de tal material falhar.

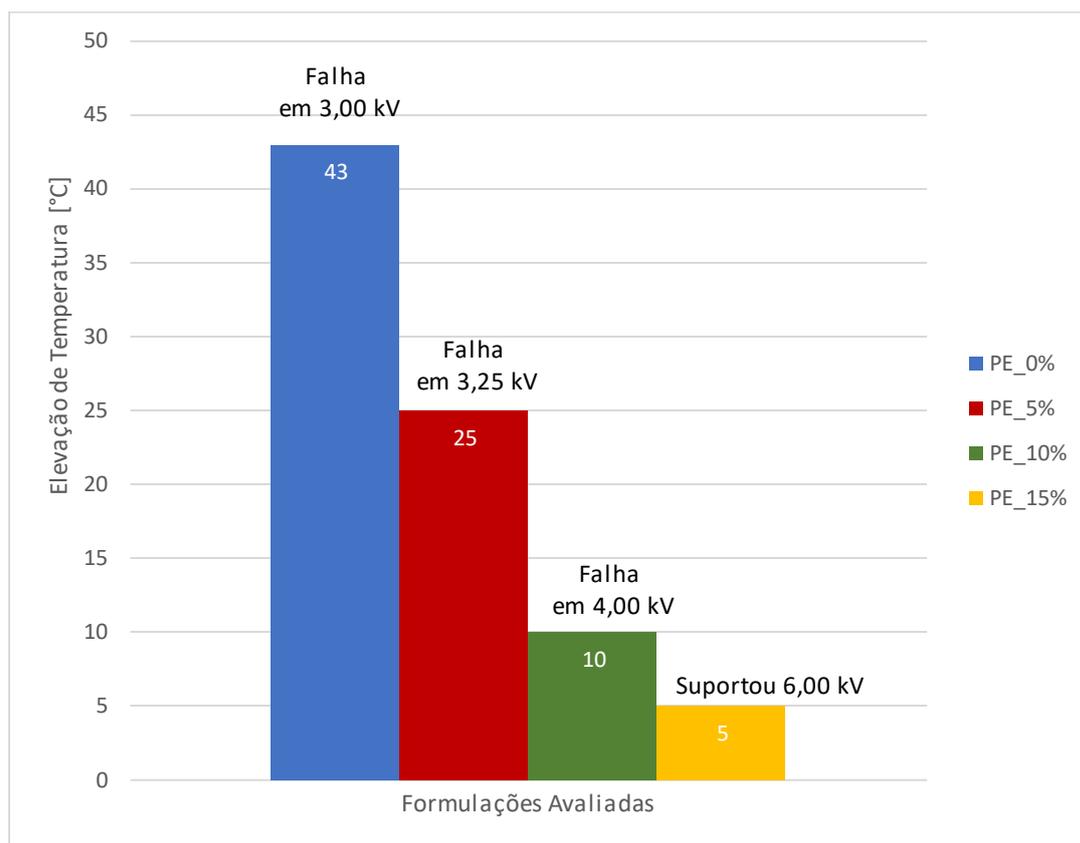


Figura 78 – Gráfico da taxa de elevação de temperatura no patamar de falha de cada formulação

Fonte: O Autor, 2021

Por exemplo, no caso da formulação sem aditivo (hidróxido de magnésio), a elevação de temperatura máxima obtida no maior patamar de tensão ao qual tal amostra foi submetida (3,00 kV) foi de 43 °C. Com a adição de 5% do aditivo, a amostra PE_5% apresentou taxa de elevação cerca de 40% menor, de 25 °C. Já a amostra com maior concentração do aditivo elevou-se em apenas 2 °C em seu patamar de tensão final. Dessa maneira, seria possível estimar que variações superiores a 10°C em um determinado patamar indicariam propensão da amostra a falhar em tal patamar de tensão.

Conforme resumido na Figura 79, as diferenças na distribuição de temperatura – e de energia - ao longo do volume dos corpos de prova poliméricos analisados permitem obter noções e indícios de quão bem o composto consegue dissipar a energia fornecida pelo trilhamento elétrico e seus arcos de bandas secas sem que essa energia interfira na sua estrutura e sua estabilidade.

Formulações que apresentaram temperaturas concentradas em menores áreas, isto é, cuja energia não se distribuiu, apresentaram elevação de temperatura maior e, portanto, degradaram em taxas maiores, favorecendo a evolução do trilhamento elétrico.

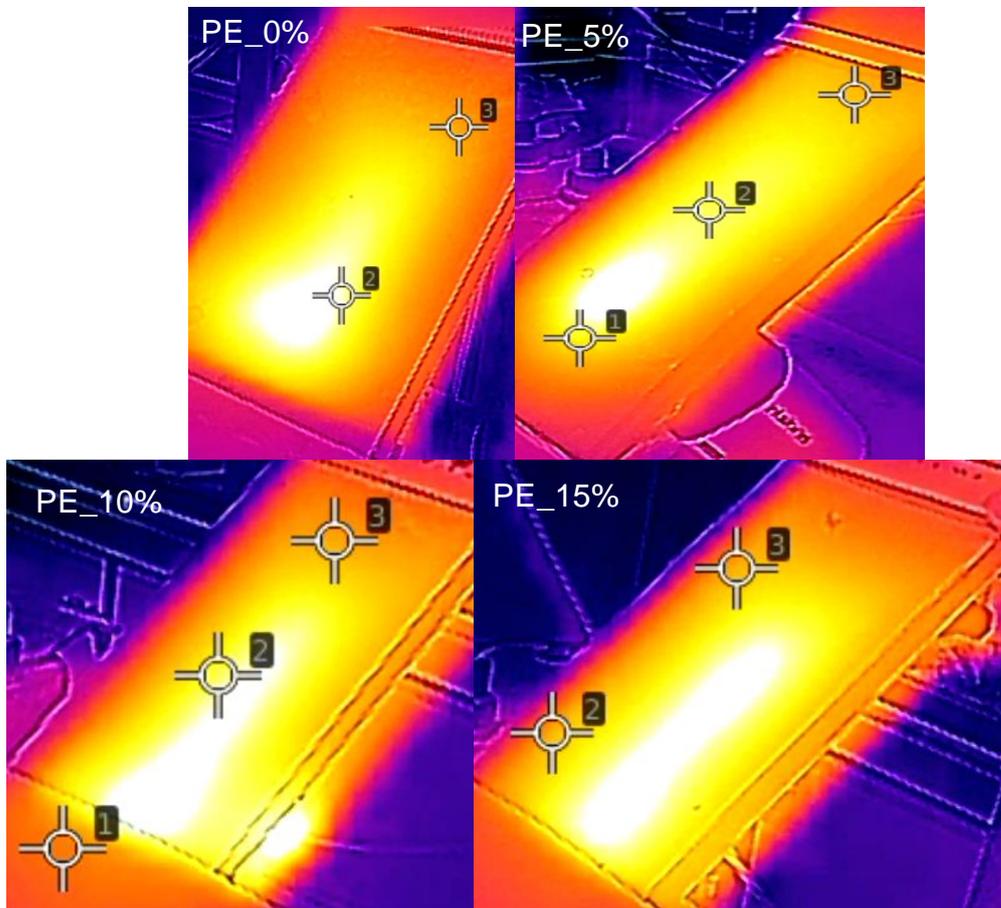


Figura 79 - Comparação das imagens térmicas mostrando a distribuição de energia nas diferentes formulações testadas

Fonte: O Autor, 2019

A relação entre a taxa de absorção de energia do PEAD e a proximidade de uma falha por trilhamento elétrico já havia sido demonstrada por Da Silva e Swinka Filho (2016). Porém, no caso desse trabalho, a constatação foi feita analisando-se a energia demandada da fonte de alimentação do ensaio. No caso do presente trabalho, observou-se tal fenômeno por meio da medição da temperatura e conseqüentemente da energia absorvida pelo material. O fato de tal constatação ter sido feita utilizando duas metodologias de análise completamente distintas é uma evidência a favor dessa tese.

Em suma, os resultados encontrados no trabalho aqui apresentado permitem concluir que a análise térmica das amostras submetidas ao ensaio de trilhamento elétrico em plano inclinado pode fornecer informações em relação ao desempenho das suas composições quanto a resistência à degradação por tal fenômeno elétrico.

5. CONCLUSÕES

O fenômeno do trilhamento elétrico pode ser descrito por meio da análise de como o material interage com a energia aplicada nele. Assim, analisar o comportamento térmico de amostras no ensaio de Resistência ao Trilhamento em Plano Inclinado pode oferecer informações importantes acerca do desempenho desses materiais em campo.

A análise sob a ótica da termodinâmica, conforme apresentada neste documento, é um meio de prever ou ao menos estimar o comportamento dos diversos materiais empregados no setor elétrico frente ao campo elétrico e as intempéries e fenômenos que os levam à degradação.

Por exemplo, a inspeção termográfica por meio de imagens no espectro infravermelho já é uma técnica utilizada no setor elétrico para realização de manutenções preditivas e preventivas em subestações, linhas de distribuição e painéis elétricos, indicando pontos quentes, que podem ser relacionados a correntes de fuga nas partes isolantes dos equipamentos (Sampaio et. al., 2015). Assim, o conceito de analisar um material isolante termicamente quando tal material é submetido a campos elétricos intensos já é empregado no setor. Dessa maneira, faz sentido analisar termicamente os corpos de prova submetidos ao ensaio de trilhamento elétrico em plano inclinado.

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que existe relação entre a taxa de elevação de temperatura apresentada por um material sujeito ao ensaio de resistência ao trilhamento elétrico em plano inclinado e seu desempenho em tal ensaio. Por exemplo, a amostra com formulação isenta de aditivos do tipo hidróxidos metálicos hidratados, hidróxido de magnésio no caso deste trabalho, apresentou elevação de temperatura de 43 °C no maior patamar de tensão a que foi submetida, enquanto a amostra com 15% em massa do aditivo teve elevação de apenas 2 °C e não apresentou trilhamento.

As imagens térmicas no espectro infravermelho, mostradas em resumo na Figura 79, mostram que as maiores elevações de temperatura são obtidas nos materiais nos quais a temperatura (e assim a energia absorvida pelo material) se encontra mais concentrada, em áreas menores do corpo de prova, propiciando assim as variações térmicas mostradas na Figura 78 e mencionadas anteriormente.

Em outras palavras, os resultados obtidos mostram que é possível estabelecer metodologias que permitam estimar a propensão de uma determinada amostra de material polimérico de suportar determinado patamar de tensão por meio do acompanhamento da sua temperatura média e de quanto ela se eleva em tal patamar. Essa possibilidade é especialmente importante no caso de ensaios com longa duração, como alguns ensaios de 6 horas ou de 15 horas previstos em normas internacionais, como a ASTM D2303 (ASTM, 2020).

Trata-se, portanto, de uma oportunidade de melhor caracterizar e comparar materiais a serem aplicados em diversos equipamentos elétricos sujeitos a estresses que possam causar o trilhamento elétrico de suas superfícies. Tal característica se torna cada vez mais importante à medida que novas tecnologias em engenharia de materiais permitem com que estes obtenham desempenhos cada vez melhores, testando os limites das normas e métodos atuais de resistência ao trilhamento elétrico. Obter uma metodologia válida e confiável de comparação de desempenho entre diferentes materiais é essencial nesse processo de desenvolvimento.

Evidentemente, é necessário que se faça algumas ressalvas e que se analise as limitações da metodologia proposta. Devido à disponibilidade de amostras e recursos, a metodologia utilizada neste trabalho consistiu na avaliação de um espaço amostral relativamente pequeno. Seria necessário portanto, um estudo com maior quantidade de materiais a fim de melhorar a confiabilidade dos resultados e garantir que eles são válidos para outros materiais poliméricos.

Outro fator limitante para uma possível adoção da metodologia proposta neste trabalho seriam de natureza econômica. Atualmente, os equipamentos utilizados para monitoramento da temperatura possuem custo relativamente elevado, o que pode dificultar a difusão deste método entre laboratórios de fabricantes de polímeros e equipamentos elétricos. Além disso, seria necessário desenvolver uma forma de calibração padronizada para o equipamento, assegurando a reprodutibilidade dos resultados.

Todavia, é possível em tese, apesar das limitações discutidas, estabelecer padrões de comportamento térmico que permitam classificar de maneira mais rápida e assertiva os diferentes materiais poliméricos constituintes dos equipamentos e acessórios utilizados nas redes de distribuição compactas em relação aos métodos

tradicionais vigentes nas normas nacionais e internacionais atualmente, conforme mostrado no presente trabalho.

6. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, pode-se propor a análise de uma gama maior de materiais diferentes e também de aditivos diferentes, a fim de estabelecer uma espécie de banco de dados de comportamentos térmicos de tais materiais, permitindo o estabelecimento de padrões que possam levar ao desenvolvimento e introdução de novos critérios de avaliação de desempenho nas normas relativas ao ensaio de resistência ao Trilhamento elétrico em plano inclinado.

Além disso, pode-se também estudar a influência de outros fatores que interfiram na maneira com a qual os arcos de bandas secas transferem energia aos materiais poliméricos ou compósitos testados no ensaio. Pode-se, por exemplo, estudar se a presença de harmônicos ou distorções nas formas de onda da tensão ou corrente pode interferir na taxa de elevação de temperatura e nos processos de degradação de cada material.

Por fim, pode-se ainda propor o estudo das imagens no espectro infravermelho utilizando metodologias de processamento digital de imagens a fim de identificar outros padrões além da elevação de temperatura que possam fornecer informações acerca do desempenho dos materiais frente ao trilhamento elétrico e estimar o quão próximo à falha estes materiais estão.

REFERÊNCIAS

ABOULKAS, A.; HARFI, K. El; BOUADILI, A. El. Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 51, n. 7, p.1363-1369, jul. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.017>.

ABRADEE (org.). **Setor Elétrico: visão geral do setor. VISÃO GERAL DO SETOR**. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor/>. Acesso em: 08 ago. 2021.

ALGHAMDI, A.s.g. et al. Reducing variability in inclined-plane tracking test results. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [s.l.], v. 3, n. 3, p.439-443, jun. 1996. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/94.506218>.

ANDRADE, Karen Stephanie de. **PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA RECOBRIMENTO DE CABOS CONDUTORES**. 2016. 140 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2016.

BEYLER, Craig L.; HIRSCHLER, Marcelo M. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering: CHAPTER 1-7 Thermal Decomposition of Polymers**. 3. ed. Quincy: National Fire Protection Association, 2002.

CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A. **MANUAL ESPECIAL E-313.0011: ISOLADORES DE PORCELANA**. Florianópolis: Celesc, 2009. 18 p.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. Rio: Ltc, 2013.

CORREIA, Evandro de Sousa; DANTAS, Jeânderson de Melo; ANDRADE, José Elisandro de. Considerações acerca dos conceitos de condutores, isolantes e semicondutores nos livros de Ensino Médio sob um olhar da teoria de bandas de energia. In: I WORKSHOP SOBRE PESQUISAS NA AMAZÔNIA E I ENCONTRO DO MNPEF DA UNIFESSPA, 2017, Marabá. **Scientia Plena**. [S.L.]: Associação Sergipana de Ciência, 2017. p. 1-7. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/3485/1630>. Acesso em: 14 set. 2021.

DE PAOLI, Marco-Aurélio; RABELLO, Marcelo. **ADITIVAÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**. São Paulo: Artliber, 2000.

DU, B. X. Discharge Energy and dc Tracking Resistance. of Organic Insulating Materials. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**. Niigata, p. 897-901. dez. 2001.

FEDERAÇÃO DAS COOPERATIVAS DE ENERGIA DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **FECO-D-11: Rede Compacta de Distribuição de Energia Elétrica: Estruturas**. Içara: Copercoval, 2010.

GALLO, J. B.; AGNELLI, J. A. M., Aspectos do Comportamento de Polímeros em Condições de Incêndio. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 1998.

GHUNEM, Refat Atef. Using the inclined-plane test to evaluate the resistance of outdoor polymer insulating materials to electrical tracking and erosion. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [s.l.], v. 31, n. 5, p.16-22, set. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mei.2015.7214441>.

GHUNEM, Refat Atef; JAYARAM, Shesha H.; CHERNEY, Edward A.. **Suppression of Silicone Rubber Erosion by Alumina Trihydrate and Silica Fillers from Dry-band Arcing Under DC**. IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation. Waterloo, fev. 2015. p. 14-20.

GORUR, R. et. al., CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 1997, Minneapolis. **A Rapid Test Method for Evaluating the Tracking and Erosion Resistance of Polymeric Outdoor Insulating Materials**. Minneapolis: IEEE, 1997.

GORUR, Ravi et al. **Outdoor Insulators**. Phoenix: Ravi S Gorur, 1999.

GRASMEDER, John. **Polymer Crystallinity – HPP Explained (part 3)**. 2017. Disponível em: <https://www.victrex.com/blog/2017/polymer-crystallinity-hpp-explained-part-3>. Acesso em: 14 set. 2021.

GRAVOGL, Georg *et al.* Cycle Stability and Hydration Behavior of Magnesium Oxide and Its Dependence on the Precursor-Related Particle Morphology. **Nanomaterials**. Basel, p. 1-14. out. 2018.

GRIFFITHS, David J. **Introduction to Electrodynamics**. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

HOBMEIR, Murilo Amaldo. **DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FORMULAÇÕES DE HDPE COM Mg(OH)₂ PARA APLICAÇÃO EM REDES PROTEGIDAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. 2020. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Materiais, Instituto de Tecnologia Para O Desenvolvimento - Lactec, Curitiba, 2020.

HUANG, J B et al. Theoretical studies on bond dissociation enthalpies for model compounds of typical plastic polymer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT SCIENCE AND ENGINEERING (ICESE 2018), 1. 2018, Barcelona. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Barcelona: IOP Science, 2018. v. 167, p. 12 - 29.

KHAN, H. *et al.* Investigation of electrical, tracking/erosion, and water absorption resistance properties of ATH-SiO₂-reinforced RTV-SiR composites for high-voltage insulations. **Journal Of Elastomers And Plastics**. Pakistan, p. 501-519. out. 2017.

KLÄMPFL, Tobias Gabriel. **Cold atmospheric plasma decontamination against nosocomial bacteria**. 2014. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Medicina, Technische Universität München, Munique, 2014.

Kowalski, E. L.; Robert, R.; Rúvolo Filho, A. **Estudo da Resposta Termicamente Estimulada do Compósito LDPE/CB por Meio da Técnica de Corrente de Despolimerização Termicamente Estimulada (TSDC)**, Quim. Nova, v. 32, n. 5, 1115-1118, 2009.

KUTZ, Myer. Handbook of Environmental Degradation of Materials. 3. ed. Cambridge: Elsevier, 2018.

LIMA, F. N. **Uma Contribuição à Estimativa de Indicadores de Desempenho do Estado Operacional de Cabos Isolados sob a Ação das Arborescências**. FEELT UFU, Uberlândia, 2008, 208 páginas.

LIU, Xialong et al (Ed.). Study of high density polyethylene (HDPE) pyrolysis with reactive molecular dynamics. **Polymer Degradation And Stability**. Aubiere, p. 62-70. jun. 2014.

LYU, Suping. **Does Crystallinity Affect Polymer Degradation Rates.** Scientific and Strategic Operation. Disponível em: <http://abstracts.biomaterials.org/data/papers/2011/334.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2021.

MCMICHAEL, Kirk. **Organic Chemistry: A "Carbonyl Early" Approach.** Pullmann: Washington State University, 2019. Disponível em: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Book%3A_Organic_Chemistry_-_A_%22Carbonyl_Early%22_Approach_\(McMichael\)](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Book%3A_Organic_Chemistry_-_A_%22Carbonyl_Early%22_Approach_(McMichael))>. Acesso em: 01 ago. 2019

MURPHY, John. **THE ADDITIVES FOR PLASTICS HANDBOOK.** Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1996. ISBN 185617 281 3.

NAIDU; KAMARAJU. **High voltage engineering.** New York: McGraw-Hill, 1995.

NEOENERGIA. **NOR.DISTRIBU-ENGE-0057:** Projeto de Rede de Distribuição Aérea Compacta com Espaçador. Rio de Janeiro: Neoenergia, 2018.

NÓBREGA, A. M. **Estudo das redes aéreas compactas por meio de ensaios e modelagem utilizando o método dos elementos finitos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2011

OLIVEIRA, Rodrigo José de. **Materiais híbridos de polifosfatos: fotoquímica, caracterização (di)elétrica e sua utilização em capacitores eletroquímicos.** 2008. 121 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Química, Departamento de Química Fundamental, UFPE, Recife, 2008.

PARR, D. J.; SCARISBRICK, R. M... **Performance of synthetic insulating materials under polluted conditions.** In: CONFERENCE ON DIELECTRIC AND INSULATING MATERIALS, 1, 1964, Surrey. Proceedings.... Surrey: IEEE, 1965. p. 1625 - 1632.

PIAH, M.a.m.; DARUS, A.; HASSAN, A. Electrical tracking performance of LLDPE natural rubber blends by employing combination of leakage current level and rate of carbon track propagation. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [s.l.], p.1259-1265, dez. 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tdei.2005.1561806>

RAJU, Gorur Govinda. Dielectric Loss and Relaxation—I. In: RAJU, Gorur Govinda. **Dielectrics in Electric Fields**. 2. ed. Oxfordshire: Routledge, 2016. Cap. 3. p. 83-136. Disponível em: <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/b20223-4>. Acesso em: 12 ago. 2021.

RIBEIRO JÚNIOR, Sebastião. **ANÁLISE DA RUPTURA DIELÉTRICA EM MATERIAIS ISOLANTES ELÉTRICOS DE CABOS ISOLADOS XLPE E EPR POR TOMOGRAFIA 2D E 3**. 2008. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e Informática Industrial, UFPR, Curitiba, 2008.

ROWLAND, S M et al. Use of image analysis in DC inclined plane tracking tests of nano and micro composites. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.365-374, abr. 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tdei.2011.5739439>

SAMPAIO, Daniel *et al.* MANUTENÇÃO PREDITIVA COM INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA INTELIGENTE. **O Setor Elétrico**, [s. l.], v. 115, n. 1, p. 103-111, set. 2015. Mensal.

SARATHI, Raj et al. Analysis of surface degradation of high density polyethylene (HDPE) insulation material due to tracking. *Bulletin Of Materials Science*. India, p. 251-262. jun. 2003.

SCHMIDT, Walfredo. **Materiais Elétricos: Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

SCHMIDT, Walfredo. **Materiais Elétricos: Isolantes e Magnéticos**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

SEGATTO. **ESTUDO E PROJETO DE REDE ELÉTRICA COMPACTA PROTEGIDA**. 2008. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, UFES, Vitória, 2008.

SILVA, Francyele Inês de Carvalho. **DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FORMULAÇÕES DE POLIETILENO PARA APLICAÇÃO EM EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM REGIÕES DE ELEVADA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Ufpr, Curitiba, 2015.

SILVA, G. C., **Descargas parciais estimuladas por raios X contínuo e pulsado em materiais dielétricos: similaridades e diferenças**. Tese de Doutorado UFPR/2005.

SILVA, Ricardo Fernandes da; SWINKA FILHO, Vitoldo. Analysis of electrical tracking by energy absorption during surface discharge in polymeric materials. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.501-506, fev. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tdei.2015.005002>

TOMCZAK, Fabio. **Correlação entre Ensaios de Trilhamento Elétrico**. 2000. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Pipe, Ufpr, Curitiba, 2000.

VAN VLACK, Laurence H. **Princípios de Ciência dos Materiais**. São Paulo: Blucher, 1970.

VENKATESULU, B.; THOMAS, M. J. Tracking and erosion resistance of nano-filled silicone rubber for use in high voltage outdoor insulators. [S.l.]. 2010.

WANG, Haiyang; ZENG, Zhengzhong. Electric Breakdown Model for Super-Thin Polyester Foil. In: SALEH, Hosam. **Polyester**. Londres: Intechopen Limited, 2012. p. 359-376. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/39408>. Acesso em: 14 set. 2021.

WANG, Haiyang; ZENG, Zhengzhong. Electric Breakdown Model for Super Thin Polyester Foil. **Polyester**, 6 set. 2012. In Tech. <http://dx.doi.org/10.5772/48478>.

WOOD, Laura. **Global Carbon Black Market Growth, Trends & Forecast (2020-2025)**. 2020. BUSINESS WIRE. Disponível em: <https://www.businesswire.com/news/home/20200326005520/en/Global-Carbon-Black-Market-Growth-Trends-Forecast-2020-2025---ResearchAndMarkets.com>. Acesso em: 14 set. 2021.

YOSHIMURA, N.; KUMAGAI, S.; DU, B. Research in Japan on the tracking phenomenon of electrical insulating materials. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [s.l.], v. 13, n. 5, p.8-19, set. 1997. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/57.620513>.