

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO FERNANDES DA SILVA

**TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE MATERIAIS POLIMÉRICOS PELA
ANÁLISE DA ENERGIA ABSORVIDA DEVIDO AS DESCARGAS
ELÉTRICAS SUPERFICIAIS**

**Curitiba
2014**

RICARDO FERNANDES DA SILVA

**TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE MATERIAIS POLIMÉRICOS PELA
ANÁLISE DA ENERGIA ABSORVIDA DEVIDO AS DESCARGAS
ELÉTRICAS SUPERFICIAIS**

**Tese apresentada como requisito parcial à
obtenção de grau de Doutor. 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
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Marilda Munaro**

**Curitiba
2014**

-
- S586t Silva, Ricardo Fernandes da
Trilhamento elétrico sobre materiais poliméricos pela análise da energia absorvida devido as descargas elétricas superficiais / Ricardo Fernandes da Silva. – Curitiba, 2014.
125f. : il., [algumas color.].
- Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE.
- Orientador: Vitoldo Swinka Filho, Coorientadora: Marilda Munaro.
Bibliografia: p. 119-125.
1. Resistência de materiais. 2. Dielétricos. 3. Compositos poliméricos.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Swinka Filho, Vitoldo. III. Munaro, Marilda. IV. Título.

CDD: 620.195



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais
Setor de Tecnologia

RELATÓRIO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

Aos vinte e seis dias do mês de fevereiro de 2014, no Auditório do CEHPAR - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.^a Dr.^a Ana Sofia Clímaco Monteiro de Oliveira, coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a sexagésima defesa de tese de doutorado na área de concentração: Engenharia de Materiais. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Vitoldo Swinka Filho (UFPR), Marcelo Gonçalves Hönnicke (UNILA), Sérgio Henrique Pezzin (UDESC), Andreia Gerniski Macedo (UFPR), Edemir Luis Kowalski (UFPR). Às 13:30 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **RICARDO FERNANDES DA SILVA** a fazer a apresentação da tese de doutorado intitulada “**TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE MATERIAIS POLIMÉRICOS PELA ANÁLISE DA ENERGIA ABSORVIDA DEVIDO AS DESCARGAS ELÉTRICAS SUPERFICIAIS.**” Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a tese e a arguição, a banca decidiu pela Aprovado do candidato. (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 26 de fevereiro de 2014.

Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho
Orientador

Prof. Dr. Edemir Luis Kowalski
Examinador

Prof.ª Dr.ª Andreia Gerniski Macedo
Examinador

Prof. Dr. Sérgio Henrique Pezzin
Examinador

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke
Examinador

Prof.ª Dr.ª Ana Sofia Clímaco Monteiro d'Oliveira
Coordenadora do PIPE

Dedico este trabalho a minha família pelo apoio e compreensão, em especial a minha esposa Rosângela pelo carinho e atenção e meus filhos João Victor e Bruno que enchem a casa de alegria.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus pela saúde, disposição e tranquilidade para driblar os desafios que surgiram ao longo dessa caminhada do doutorado;

Aos meus orientadores, Dr. Vitoldo Swinka Filho e Dra. Marilda Munaro pela ajuda, orientação, apoio e por estarem sempre prontos e com disposição a ajudar;

Aos professores, Dr. Edemir Luiz Kowalski e Dra. Andreia Gerniski Macedo, por terem, gentilmente, aceitado o convite para participação na banca do exame de qualificação e terem contribuído brilhantemente para melhoria da Tese;

Aos professores, Dr. Sérgio Henrique Pezzin, Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke, Dr. Edemir Luiz Kowalski e Dr^a. Andreia Gerniski Macedo por terem, gentilmente, aceitado o convite para participação na banca de defesa de Tese;

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), pela disponibilização da infraestrutura necessária para elaboração desse trabalho;

A Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE) pela oportunidade;

A todos os colegas e amigos do Lactec que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão deste trabalho.

“God made the bulk; surfaces were invented by the devil”

Wolfgang Pauli

RESUMO

O presente trabalho tem como ponto de partida um aprofundamento no estudo do fenômeno de trilhamento elétrico em materiais poliméricos. A falha do isolamento por trilhamento elétrico causa vários problemas de suportabilidade em componentes utilizados em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, pois este é um fenômeno importante na degradação dos materiais utilizados como isolantes e seu entendimento não está totalmente compreendido. Para se obter o entendimento mais aprofundado do fenômeno de trilhamento elétrico fez-se necessário o desenvolvimento de uma instrumentação eletrônica de proteção e aquisição de dados bem como a construção de um arranjo experimental. Com essa construção foi possível acompanhar a evolução da degradação superficial por trilhamento elétrico dos materiais poliméricos em estudo, esse acompanhamento foi realizado com o monitoramento do consumo de energia durante as descargas superficiais. Esse monitoramento foi realizado registrando e tratando os dados de tensão e corrente sobre a amostra por um período de tempo suficiente para que o fenômeno de trilhamento elétrico atingisse seu estágio final. Esse tratamento tem como objetivo a separação das fases de interesse que compõem a degradação da superfície dos materiais. Com essa separação de dados pode-se calcular a energia absorvida pela amostra, por meio da integração da potência dissipada sobre a amostra. No presente trabalho são apresentados os resultados de absorção de energia ao longo do ensaio de trilhamento elétrico baseado na norma IEC 60112, com algumas modificações, como o tempo de gotejamento, tempo do ensaio e tensão aplicada. Para verificação da aplicação dessa nova técnica experimental fez-se o acompanhamento da evolução do consumo de energia de algumas amostras poliméricas a base de polietileno, em destaque o polietileno linear de baixa densidade (LLDPE) e alguns compósitos com argilomineral montmorilonita. Estes compósitos tinham como matriz polimérica o LLDPE. Finalmente com a técnica desenvolvida realizou-se outros ensaios em polietileno de alta densidade (HDPE) e borracha de silicone. O objetivo geral deste trabalho foi buscar o correlacionamento da energia absorvida por materiais poliméricos durante o trilhamento elétrico com as fases do processo de degradação de sua superfície e utilizar esta correlação como parâmetro de avaliação do momento da falha desses materiais. Com a evolução desta técnica acredita-se, que no futuro, será possível o acompanhamento em tempo real do momento de falha do material isolante.

Palavras-chave: trilhamento elétrico, suportabilidade elétrica, energia absorvida, isolante, degradação superficial.

ABSTRACT

The present work has as its starting point a deeper study of the phenomenon of electrical tracking in polymeric materials. The fault isolation for electrical tracking causes several problems in supportability components used in generation, transmission and distribution of electric energy systems, as this is an important phenomenon in the degradation of the materials used as insulators and their insight is not fully understood. Obtaining a improved understanding of the phenomenon of electrical tracking was necessary to develop a protective electronic instrumentation and data acquisition as well as the construction of an experimental arrangement. With this construction was possible to follow the evolution of the surface electrical tracking degradation of polymeric materials under study, this monitoring was performed with monitoring of energy consumption during surface discharges. This monitoring was performed by registering and treating the data of voltage and current on the sample for a period of time sufficient for the phenomenon of electrical tracking reached its final stage time. This treatment aims to phase separation of interests that make up the surface degradation of materials. With such data separation can calculate the energy absorbed by the sample by integrating the power dissipated on the sample. The results of energy absorption during the test of electrical tracking based on IEC 60112 with modifications, like the dripping time, test time and applied voltage are presented in this work. To verify the application of this new experimental technique became monitoring the evolution of the energy consumption of some polymer samples to polyethylene base, highlighted in the linear low density polyethylene (LLDPE) and some composites with montmorillonite clay mineral. These composites were as LLDPE polymer matrix. Finally technique developed by other assays held in high density polyethylene (HDPE) and silicone rubber. The general objective of this work was to seek correlating the energy absorbed by polymeric materials during electrical tracking with the phases of the degradation of the surface process and use this correlation as a parameter for evaluating the time of failure of these materials. With the evolution of this technique is believed that in the future it will become possible to monitor in real time the moment of failure of the insulating material.

Keywords: electrical tracking, electric supportability, absorbed energy, insulation, surface degradation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO PELO SCOPUS. BUSCA REALIZADA EM 05/02/2014, COM OS TERMOS <i>DIELECTRICS</i> E <i>PROPERTIES</i> NO TÍTULO DAS PUBLICAÇÕES, E <i>POLYMERS</i> NO TÍTULO, RESUMO E PALAVRAS CHAVES. TOTAL ENCONTRADO: 1662 PUBLICAÇÕES.....	27
FIGURA 2 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO PELO SCOPUS. BUSCA REALIZADA EM 05/02/2014. (A) COM O TERMO “ <i>TRACKING RESISTANCE</i> ” NO TÍTULO, RESUMO E PALAVRAS CHAVES. TOTAL ENCONTRADO 183 PUBLICAÇÕES (B) COM O TERMO “ <i>ELECTRICAL TRACKING</i> ” NO TÍTULO, RESUMO E PALAVRAS CHAVES. TOTAL ENCONTRADO 37 PUBLICAÇÕES	29
FIGURA 3 - VISÃO GERAL DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	30
FIGURA 4 - UNIDADE DA MOLÉCULA BÁSICA DO ETILENO (OU ETENO)	34
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE COMPONENTES UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	37
FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DA ARGILA MONTMORILLONITA 2:1	39
FIGURA 7 - ETAPAS DA GERAÇÃO DO POLIDIMETILOXANO	40
FIGURA 8 - VISTA EM CORTE DE UM ISOLADOR DE BORRACHA DE SILICONE.....	41
FIGURA 9 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO. A) CONTAMINAÇÃO E UMEDECIMENTO DA SUPERFÍCIE DO MATERIAL, FORMANDO UMA CAMADA CONDUTORA COM BAIXA RESISTIVIDADE SUPERFICIAL; B) PASSAGEM DE UMA CORRENTE SUPERFICIAL ATRAVÉS DA SOLUÇÃO ÚMIDA CONTAMINANTE, COM ALTA DISSIPAÇÃO	

DE CALOR, CAUSANDO PERDA DE MASSA DO FLUIDO CONTAMINANTE, FAVORECENDO A FORMAÇÃO DE BANDAS SECAS; C) INTERRUPTÃO DA CORRENTE SUPERFICIAL DEVIDO À PRESENÇA DE BANDAS SECAS, CAUSANDO UM AUMENTO NO CAMPO ELÉTRICO LOCAL ENTRE AS BANDAS ÚMIDAS E INICIANDO AS DESCARGAS SUPERFICIAIS; D) DEVIDO AS DESCARGAS SUPERFICIAIS A SUPERFÍCIE DO ISOLANTE ALCANÇA ELEVADAS TEMPERATURAS, CAUSANDO A FORMAÇÃO DE RESÍDUOS À BASE DE CARBONO LEVANDO O MATERIAL A UMA GRADUAL DEGRADAÇÃO; E) PROPAGAÇÃO E AUMENTO DO RESÍDUO CARBONÁCEO CONDUTOR; F) RUPTURA COMPLETA DA SUPERFÍCIE DO MATERIAL ISOLANTE, FAZENDO QUE O MATERIAL SE COMPORTE COMO UM CONDUTOR DE ELETRICIDADE. MODELO PROPOSTO POR MALIK.. 43

FIGURA 10 - ESQUEMA DOS ELETRODOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE ÍNDICE DE TRILHAMENTO..... 46

FIGURA 11 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA O ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 60112 47

FIGURA 12 - MONTAGEM DO CORPO DE PROVA NO ENSAIO PLANO INCLINADO, EM 1 ENTRADA DA SOLUÇÃO CONTAMINANTE, 2 PAPEL UNIFORMIZADOR DO FLUXO DA SOLUÇÃO CONTAMINANTE, 3 ELETRODO DE ALTA TENSÃO, 4 AMOSTRA E 5 ELETRODO DE BAIXA TENSÃO..... 48

FIGURA 13 - DIAGRAMA DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA O ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 60587 49

FIGURA 14 - DISPOSIÇÃO DOS ELETRODOS SOBRE A AMOSTRA 51

FIGURA 15 - CÂMARA DE NÉVOA SALINA - RECOMENDAÇÕES MÍNIMAS DE DIMENSÕES..... 51

FIGURA 16 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA RODA DE TRILHAMENTO ELÉTRICO 53

FIGURA 17 – (A) SÉRIE TÍPICA DE CORRENTE DURANTE AS DESCARGA SUPERFICIAL (B) MAPA RECONSTRUIDO DA SÉRIE DE DADOS EM (A)..	54
FIGURA 18 - PADRÃO DE TRILHAMENTO TÍPICO, COM DIFERENTES PERCENTUAIS DE SÍLICA NANOMÉTRICA	55
FIGURA 19 - FLUXOGRAMA DE PREPARAÇÃO DAS PLACAS DE POLIETILENO (LLDPE OU HDPE).....	57
FIGURA 20 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PRIMEIRO ESTÁGIO.....	58
FIGURA 21 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO SEGUNDO ESTÁGIO	59
FIGURA 22 - CINTILAÇÃO SOBRE A AMOSTRA DURANTE A SECAGEM DE UMA GOTA. (A) AMOSTRA (B) DESCARGA SUPERFICIAL (C) ELETRODOS	60
FIGURA 23 - SISTEMA DE PROTEÇÃO SOBRECORRENTE	61
FIGURA 24 – ESQUEMA DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA EMISSORA DO SINAL ÓPTICO.....	63
FIGURA 25 - FOTOGRAFIA DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA EMISSORA DO SINAL ÓPTICO.....	64
FIGURA 26 - RESPOSTA DA CORRENTE NO LED EM FUNÇÃO DA TENSÃO. O CÍRCULO EM VERMELHO INDICA A REGIÃO DE FUNCIONAMENTO, APROXIMADAMENTE LINEAR	64
FIGURA 27 – ESQUEMA DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA RECEPTORA DO SINAL ÓPTICO.....	65
FIGURA 28 - FOTOGRAFIA DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA RECEPTORA DO SINAL ÓPTICO.....	65
FIGURA 29 - RESPOSTA TÍPICA DA FOTOCORRENTE NO FOTODIODO RECEPTOR	66

FIGURA 30 - PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA NATIONAL INSTRUMENTS - USB-6259.....	67
FIGURA 31 - CONFIGURAÇÕES DO REGISTRO DO DAQ	67
FIGURA 32 - SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM LABVIEW ^(R)	68
FIGURA 33 - (A) TENSÃO (B) CORRENTE (C) POTÊNCIA SOBRE A AMOSTRA DURANTE A EVAPORAÇÃO DO ELETRÓLITO.....	68
FIGURA 34 - (A) TENSÃO (B) CORRENTE (C) POTÊNCIA SOBRE A AMOSTRA DURANTE AS DESCARGAS SUPERFICIAIS	69
FIGURA 35 - (A) TENSÃO (B) CORRENTE (C) POTÊNCIA SOBRE A AMOSTRA DURANTE A FASE SECA	70
FIGURA 36 - SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA DE TENSÃO SOBRE A INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA EM UM INSTANTE DE DESCARGA SUPERFICIAL.....	74
FIGURA 37 - SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA DE CORRENTE SOBRE A INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA EM UM INSTANTE DE DESCARGA SUPERFICIAL.....	75
FIGURA 38 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO E TRANSDUÇÃO ELETRO/ÓPTICO	76
FIGURA 39 - SINAL DE CORRENTE NA ENTRADA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO ELETRO/ÓPTICO	77
FIGURA 40 - TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT) SOBRE O SINAL DE CORRENTE NA ENTRADA DO SISTEMA ELETRO/ÓPTICO.....	77
FIGURA 41 - PASSOS LÓGICOS DO SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA SEPARAÇÃO DOS DADOS DURANTE O ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO	79
FIGURA 42 - FATOR DE FORMA PARA ALGUMAS FORMAS DE ONDA DURANTE O ENSAIO.....	81

FIGURA 43 - INICIO DO ENSAIO, TENSÃO MÁXIMA, SEM DEFORMAÇÃO NA FORMA DE ONDA – FATOR DE FORMA DE 1,11013	82
FIGURA 44 - QUEDA DO CONTAMINANTE, TENSÃO SOFRE UMA QUEDA, POUCA DEFORMAÇÃO NA FORMA DE ONDA - FATOR DE FORMA DE 1,11889	83
FIGURA 45 - FORMAÇÃO DAS BANDAS SECAS E ÚMIDAS, GRANDE DEFORMAÇÃO NA FORMA DE ONDA - FATOR DE FORMA DE 1,18884... 83	
FIGURA 46 - SECAGEM TOTAL DA GOTA, POUCA DEFORMAÇÃO NA FORMA DE ONDA - FATOR DE FORMA DE 1,11196	84
FIGURA 47 – SINAL DE TENSÃO NORMALIZADA PARA UMA AMOSTRA DE LLDPE COM PERCENTUAL ALEATÓRIO DE MONTMORILONITA	85
FIGURA 48 - SINAL DE CORRENTE NORMALIZADA PARA UMA AMOSTRA DE LLDPE COM POLIETILENO COM PERCENTUAL ALEATÓRIO DE MONTMORILONITA	85
FIGURA 49 - CURVAS DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DURANTE O TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE DUAS AMOSTRAS (A) E (B) DE UMA MESMA PLACA DE LLDPE	87
FIGURA 50 - CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DURANTE O TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE A AMOSTRA (A) DE LLDPE, COM INDICAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA NOS TRECHOS COM INCLINAÇÕES DISTINTAS	88
FIGURA 51 - ACOMPANHAMENTO POR FOTOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA POLIMÉRICA (A) DE LLDPE – (A) - 5 MIN. DE ENSAIO, A SUPERFÍCIE DA AMOSTRA ENCONTRA-SE INALTERADA - (B) 45 MIN. DE ENSAIO A AMOSTRA APRESENTOU TRILHAMENTO ELÉTRICO - (C) PERFIL DE TRILHAMENTO CAUSADO PELA DEGRADAÇÃO DA SUPERFÍCIE NO FINAL DOS 80 MIN. DE ENSAIO.....	89

FIGURA 52 - CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DURANTE O TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE A AMOSTRA (B) DE LLDPE, COM INDICAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA NOS TRECHOS COM INCLINAÇÕES DISTINTAS.....	90
FIGURA 53 - ACOMPANHAMENTO POR FOTOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA POLIMÉRICA (B) DE LLDPE - (A) - 5 MIN. DE ENSAIO, A SUPERFÍCIE DA AMOSTRA ENCONTRA-SE INALTERADA - (B) 45 MIN. DE ENSAIO A AMOSTRA APRESENTOU TRILHAMENTO ELÉTRICO - (C) PERFIL DE TRILHAMENTO CAUSADO PELA DEGRADAÇÃO DA SUPERFÍCIE NO FINAL DOS 80 MIN. DE ENSAIO.....	91
FIGURA 54 - TÍPICO TERMOGRAMA DSC PARA HDPE	94
FIGURA 55 - TÍPICO TERMOGRAMA DSC PARA LLDPE (WONG E LAM, 2002)	94
FIGURA 56 – TERMOGRAFIAS EM DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO (A) 750 V (B) 1000V (C) 1250 V (D) 1500 V (E) 1750 V (F) 2000 V (G) 2000 V NO MOMENTO DA CINTILAÇÃO.	95
FIGURA 57 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE.....	97
FIGURA 58 - UMA AMOSTRA DO SINAL DA CORRENTE NA REGIÃO ONDE $\alpha_1=13,5$ W, RETIRADA DO GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE	98
FIGURA 59 - UMA AMOSTRA DO SINAL DA CORRENTE ONDE $\alpha_2 = 33,5$ W, RETIRADA DO GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE	98
FIGURA 60 - DETALHE DE UMA AMOSTRA DO SINAL DA CORRENTE NA REGIÃO ONDE $\alpha_1=13,5$ W, RETIRADA DO GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE.....	99

FIGURA 61 - DETALHE DE UMA AMOSTRA DO SINAL DA CORRENTE NA REGIÃO ONDE $\alpha_2 = 33,5$ W, RETIRADA DO GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE.....	99
FIGURA 62 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA POR TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE UMA AMOSTRA PURA DE LLDPE	101
FIGURA 63 - ACOMPANHAMENTO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA DE LLDPE NOS INSTANTES (A) 0 MIN. (B) 35 MIN. (C) 45 MIN. (D) 50 MIN. (E) 55 MIN. (F) 60 MIN. E (G) 65 MIN.....	102
FIGURA 64 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA POR TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE UMA AMOSTRA DE COMPÓSITO DE LLDPE/ARGILA MONTMORILONITA - 0,5%.....	103
FIGURA 65 - ACOMPANHAMENTO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA DO COMPÓSITO LLDPE/MONTMORILONITA 0,5% EM MASSA NOS INSTANTES (A) 0 MIN. (B) 15 MIN. (C) 30 MIN. (D) 45 MIN. (E) 60 MIN. (F) 75 MIN. E (G) 90 MIN.....	104
FIGURA 66 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA POR TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE UMA AMOSTRA DE COMPÓSITO DE LLDPE/ARGILA MONTMORILONITA - 1,0%.....	105
FIGURA 67 - ACOMPANHAMENTO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA DO COMPÓSITO LLDPE/MONTMORILONITA 1,0% EM MASSA NOS INSTANTES (A) 0 MIN. (B) 15 MIN. (C) 30 MIN. (D) 45 MIN. (E) 60 MIN. E (F) 65 MIN.....	106
FIGURA 68 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA POR TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE UMA AMOSTRA DE COMPÓSITO DE LLDPE/ARGILA MONTMORILONITA - 1,5%.....	107
FIGURA 69 - ACOMPANHAMENTO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA DO COMPÓSITO LLDPE/MONTMORILONITA 1,5% EM MASSA NOS INSTANTES (A) 0 MIN. (B) 15 MIN. (C) 30 MIN. (D) 35 MIN. E (E) 40 MIN. .	108

FIGURA 70 - ABSORÇÃO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE COMPÓSITO POLIMÉRICO DE LLDPE COM 1,0% EM MASSA DE ARGILA MONTMORILONITA NOVACLAY™	110
FIGURA 71 - SINAIS DA POTÊNCIA EM CADA NIVEL DE DEGRADAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MATERIAL POLIMÉRICO (A) 60 MIN. DE ENSAIO (B) 100 MIN. DE ENSAIO (C) 160 MIN. DE ENSAIO	111
FIGURA 72 - CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA PARA POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (HDPE)	113
FIGURA 73 - CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA PARA BORRACHA DE SILICONE.....	114
FIGURA 74 – CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA PARA POLIETILENO COM PERCENTUAL DESCONHECIDO DE ARGILA MONTMORILONITA..	115

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TIPOS DE ISOLADORES UTILIZADOS, VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	33
TABELA 2- ALGUMAS PROPRIEDADES DE LLDPE E HDPE	36
TABELA 3 – ALGUMAS PROPRIEDADES DA BORRACHA DE SILICONE ...	40

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

IEC – Internacional Electrotechnical Commission
ASTM – American Society for Testing and Materials
HDPE – Polietileno de Alta Densidade
XLPE – Polietileno Reticulado
LDPE – Polietileno de Baixa Densidade
PVC – Policloreto de Polivinila
LLDPE - Polietileno Linear de Baixa Densidade
UHMWPE – Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
kV – Quilovolts
mm – Milímetros
 Ω .cm – Ohm centímetros
MHz – Megahertz
g – gramas
 cm^3 – centímetros cúbicos
kg – Quilogramas
 cm^2 – Centímetros Quadrados
 $^{\circ}\text{C}$ – Graus Celcius
cm – centímetros
s – segundos
N – Newton
V – Volt
CEC – Coeficiente de Escoamento Comparativo
h – horas
mA – Miliampéres
A – Ampéres
Hz – Hertz
RP – Recurrence Plot
RPM – Rotações por Minuto
DAQ – Data Acquisition
kVAC – Quilovolts alternado
 Δt – Intervalo de Tempo

MS/s – Mega Samples por Segundo

LED - Light Emission Diode

DC – Tensão Contínua

k Ω – QuiloOhms

nF – Nanofaraday

VCC – Tensão de Corrente Contínua

K – Fator de Forma

K_{sen} – Fator de Forma Senoidal

K_{dis} – Fator de Forma Discretizado

V_p – Tensão de Pico

V_{rms} – Tensão eficaz

V_{med, π} – Tensão Média de Meio Ciclo

V_{med, 2π} – Tensão Média de um Ciclo Completo

V_i – Tensão Instantânea Discreta

FFT – Fast Fourier Transformer

.txt – Formato de Arquivo de Texto

W – Wats

R² – Coeficiente de Correlação Linear

min – Minutos

α – Coeficiente Angular

x,y % - Qualquer Percentual de Argila Montmorilonita Entre 0,0% e 1,5%

MHz - Megahertz

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1 OBJETIVOS	23
1.2 JUSTIFICATIVA	24
1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 SISTEMAS ISOLANTES.....	31
2.2 POLÍMERO - POLIETILENO.....	33
2.3 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	36
2.4 ARGILAS ORGANOFÍLICAS	38
2.5 BORRACHA DE SILICONE	39
2.6 TRILHAMENTO ELÉTRICO.....	41
2.6.1 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO	41
2.6.2 ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 60112	45
2.6.3 ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 60587	47
2.6.4 ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA ASTM D 2132 – 98.....	50
2.6.5 ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 62217 - RODA DE TRILHAMENTO.....	52
2.6.6 TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DO TRILHAMENTO ELÉTRICO	53
3. MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1 MATERIAIS.....	56
3.2 ARRANJO EXPERIMENTAL	57
3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE TRILHAMENTO	59
3.4 SISTEMA DE PROTEÇÃO SOBRECORRENTE.....	60
3.5 SISTEMA DE PROTEÇÃO DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ).....	61
3.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO.....	66

3.7	TRATAMENTO DOS DADOS	72
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1	VALIDAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRO/ÓPTICA DE PROTEÇÃO E TRANSDUÇÃO.....	74
4.2	SEPARAÇÃO DAS FASES DO TRILHAMENTO ELÉTRICO	78
4.3	AJUSTE DOS PARÂMETROS EXPERIMENTAIS.....	86
4.4	DETERMINAÇÃO DO LIMITE SUPERIOR DA TENSÃO DE ENSAIO.....	92
4.5	SINAIS DE CORRENTE	96
4.6	EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ACOMPANHADO POR FOTOGRAFIA.....	100
4.7	RESULTADO COMPARATIVO COM O MODELO DE MALIK.....	108
4.8	RESULTADO SOBRE UMA AMOSTRA DE HDPE	112
4.9	RESULTADO SOBRE UMA AMOSTRA DE BORRACHA DE SILICONE COMERCIAL	113
4.10	RESULTADO SOBRE UMA AMOSTRA ALEATÓRIA DE COMPÓSITO POLIMÉRICO	114
5.	CONCLUSÕES.....	116
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
7.	BIBLIOGRAFIA.....	119

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno de trilhamento elétrico é um mecanismo de degradação superficial dos materiais dielétricos que produz trilhas visíveis, como resultado da ação de descargas elétricas próximas, ou na superfície do material isolante. O trilhamento elétrico pode causar a erosão do material isolante, que é a perda localizada e gradual de massa que ocorre pela ação de descargas superficiais. O alto valor de resistividade superficial dos polímeros isolantes normalmente empregados em redes protegidas limita a circulação de correntes superficiais responsáveis pelo fenômeno de trilhamento. Em alguns casos, estes materiais quando em operação resistem menos que o esperado.

Fatores ambientais tais como, contaminação via poluentes industriais, automotivos, residenciais ou mesmo do ecossistema podem reduzir drasticamente a resistência superficial da isolação. Contaminantes como, maresia, fuligem, fumaça, poeira, sais e outros depósitos, na presença de umidade, formam um eletrólito e criam condições para fluir correntes entre pontos de diferentes potenciais elétricos na superfície do material. Estas correntes superficiais circulando continuamente através de um filme condutor, gerado pela umidade e poluição, podem causar evaporação não-uniforme, formando as chamadas bandas secas e úmidas. Conseqüentemente, o campo elétrico torna-se não-homogêneo, podendo provocar a ocorrência de descargas superficiais que carbonizam o material e iniciam a formação de trilhas elétricas.

Com a carbonização, aumenta-se a não-homogeneidade do campo elétrico tangente à superfície, isso contribui para a aceleração do fenômeno de trilhamento elétrico. A ocorrência desse fenômeno sobre uma área limitada do polímero pode preceder a erosão e falha do isolamento.

Neste trabalho serão descritas algumas normas como a IEC 60112 (IEC - International Electrotechnical Commission), conhecida com índice de trilhamento, IEC 60587, normalmente chamada de plano inclinado, ASTM 2132-98 (ASTM - American Society for Testing and Materials), usualmente conhecida como névoa salina e finalmente a norma IEC 62217, conhecida como roda de trilhamento. Essas normas permitem selecionar os materiais utilizados como isolantes que suportem melhor ao trilhamento elétrico e que

resistam adequadamente aos ambientes em que serão aplicados. Cada ensaio tem como objetivo simular as condições ambientais, elétricas e mecânica nas quais o sistema de isolamento irá atuar, em geral as normas classificam o material como aprovado ou reprovado para aplicação em determinada condição ambiental e de suportabilidade elétrica.

Os materiais poliméricos isolantes mais utilizados nas aplicações em sistemas de isolamento elétrico são o polietileno de alta densidade (HDPE), o polietileno reticulado (XLPE), o polietileno de baixa densidade (LDPE), a borracha de silicone e o policloreto de polivinila (PVC). Estes materiais são as matérias-primas para confecção de diversos componentes aplicados em sistemas de isolamento elétrico, como isoladores do tipo pino, espaçadores, fixadores de silicone, braço suporte, braço antibalanço, cobertura de cabos isolados, luvas de proteção entre outros.

1.1 OBJETIVOS

Desenvolver uma técnica na qual seja possível obter informações referentes a tensão, corrente, potência dissipada e energia absorvida pela superfície da amostra durante o ensaio de trilhamento elétrico com base na norma IEC 60112;

Correlacionar a resistência ao trilhamento elétrico de materiais poliméricos e sua energia absorvida, calculada pela integração da potência instantânea;

Com a técnica desenvolvida, realizar ensaios sobre materiais poliméricos e ser capaz de identificar o momento em que o material falha por trilhamento elétrico.

1.2 JUSTIFICATIVA

As técnicas utilizadas para avaliação da resistência ao trilhamento elétrico de materiais dielétricos poliméricos, utilizadas atualmente não fornecem informações sobre o material e sim sobre sua resposta aos contaminantes superficiais, sua corrente de fuga, erosão e inflamabilidade. As normas geralmente utilizadas para avaliação da resistência ao trilhamento elétrico e à erosão de materiais poliméricos são:

- IEC 60112, conhecida com índice de trilhamento;
- IEC 60587, normalmente chamada de plano inclinado;
- ASTM 2132-98, usualmente conhecida como névoa salina e
- IEC 62217, conhecida como roda de trilhamento.

Esta multiplicidade de ensaios, deve-se a dificuldade da aplicação de testes que simulem as condições de aplicação em campo, então é comum existirem inúmeros testes normalizados que tentam simular os vários eventos envolvidos no processo de formação do trilhamento elétrico. Em geral os ensaios de resistência ao trilhamento elétrico são utilizados para comparação entre materiais e não para determinação de propriedades.

Mesmo existindo uma pluralidade de técnicas com o intuito de determinar a resistência ao trilhamento elétrico de materiais sólidos isolantes o fenômeno de trilhamento elétrico ainda é pouco entendido e pouco explorado, não existindo uma correlação da resistência ao trilhamento elétrico a outras propriedades do material.

Diante do exposto acima, optou-se por desenvolver uma técnica na qual fosse possível obter informações referentes a tensão, corrente, potência dissipada e absorção de energia pelos materiais dielétricos poliméricos, durante o ensaio de trilhamento elétrico, baseado na norma IEC 60112 com algumas modificações. Com estas informações será possível entender melhor o fenômeno de trilhamento elétrico, bem como correlacionar a resistência ao trilhamento elétrico de materiais poliméricos e sua energia absorvida.

1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Neste trabalho são apresentados os conceitos básicos do fenômeno de trilhamento elétrico sobre materiais dielétricos poliméricos, bem como o desenvolvimento e aplicação de uma nova técnica de caracterização destes materiais por absorção de energia durante o processo de trilhamento elétrico e uma tentativa de estabelecer uma correlação entre a resistência ao trilhamento elétrico e a energia absorvida pela amostra durante as descargas superficiais.

No capítulo 2, intitulado “Revisão Bibliográfica”, são descritos o funcionamento de um sistema isolante, também é realizada uma breve apresentação sobre o polietileno, compósitos poliméricos e borracha de silicone e por fim apresenta-se o fenômeno de trilhamento elétrico, juntamente com algumas normas para determinação da resistência ao trilhamento elétrico para alguns materiais sólidos.

No capítulo 3, são descritos os materiais, a forma de preparação das amostras, os sistemas de proteção, aquisição e tratamento de dados são exibidos.

No capítulo 4, são apresentados os resultados e discussões quanto a separação das fases durante o ensaio de trilhamento elétrico, os resultados da realização dos ajustes nos parâmetros experimentais, e a determinação do limite superior de tensão para as amostras, ainda mostra-se a análise da forma de onda da corrente elétrica sobre a amostra durante as descargas superficiais. Observa-se a evolução da absorção de energia em diferentes condições, mostra-se que as curvas experimentais de absorção de energia estão de acordo com a degradação visual da superfície por meio do acompanhamento por fotografias, também realiza-se o acompanhamento da absorção de energia sobre diferentes percentuais de argila em compósitos poliméricos com matriz de LLDPE, também sobre HDPE e sobre borracha de silicone comercial e por fim faz-se a correlação de resultados com o modelo de degradação da superfície polimérica por trilhamento elétrico proposto por (MALIK, 1998).

No capítulo 5 as conclusões finais são discutidas. No sexto e último capítulo as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As concessionárias de energia elétrica sempre tiveram uma especial atenção à verificação da suportabilidade dos materiais isolantes devido ao multi-estressamento ao qual estão sujeitos em suas aplicações em campo (HARTMANN, LINERO, *et al.*, 2008).

A evolução da indústria de materiais poliméricos, tem resultado no emprego cada vez maior destes materiais nas seguintes indústrias (COUTINHO, MELLO e MARIA, 2003):

- Mineração: revestimentos, misturadores, raspadores, mancais e tubos.
- Química: tubos, bombas, válvulas, filtros, gaxetas, misturadores, revestimentos de tanques metálicos e de concreto.
- Alimentícia e Bebidas: guias para linhas de embalagem, transportadores, roletes, bicos de enchimento, bombas e cepos de corte.
- Papel e Celulose: tampas de caixa de sucção, réguas e perfis.
- Têxtil: tacos, guias, mancais e redutores de ruído.
- Médica: ortopédicos e cirúrgicos.
- Automobilística: painéis, suportes, para-lamas.
- Elétrica e eletrônica: isoladores, terminais, revestimento de cabos.

Materiais poliméricos apresentam um comportamento distinto, quando comparados a materiais cerâmicos ou vidro isolante. Logo se faz necessário o conhecimento específico dos processos de ruptura em dielétricos sólidos com base polimérica (SHAH, 1997). Uma grande quantidade de trabalhos experimentais tem sido realizadas por (EL-HAG *et al.* 2010; AMIN *et al.* 2007; YUXING e DAVUD 2008; OTHMAN *et al.* 2011; BEN AMOR 2014; REED, 2013 e NIMMAGADDA *et al.* 2014) para melhor caracterizar o comportamento físico dos dielétricos poliméricos submetidos às mais diversas solicitações mecânicas, elétricas e ambientais, investigando também a degradação dos materiais poliméricos por meio dos processos de envelhecimento natural, determinantes de suas limitações em uso.

Pode-se observar o crescimento desses estudos pelo resultado de uma busca no serviço de informações estatísticas de publicações, Scopus, realizado no dia 05/02/2014 (FIGURA 1). Usando as palavras chaves *dielectrics* e *properties* no título, para restringir as buscas por trabalhos que tratam principalmente sobre as propriedades dielétricas de materiais, e complementando a busca com a palavra chave *polymers*, podendo esta ser encontrada tanto no título quanto no resumo ou nas palavras chaves, de forma que a expressão exata da busca foi, (TITLE(dielectrics) AND TITLE(properties) AND TITLE-ABS-KEY(polymers)), encontraram 1662 trabalhos, um número pequeno, porém observa-se um crescente interesse pela comunidade científica por estes temas.

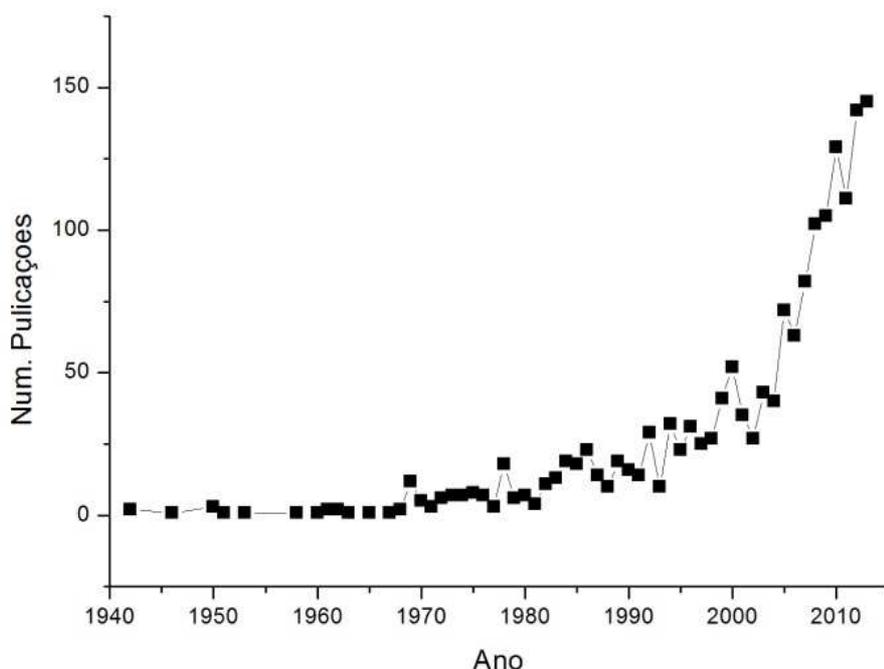


FIGURA 1 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO PELO SCOPUS. BUSCA REALIZADA EM 05/02/2014, COM OS TERMOS *DIELECTRICS* E *PROPERTIES* NO TÍTULO DAS PUBLICAÇÕES, E *POLYMERS* NO TÍTULO, RESUMO E PALAVRAS CHAVES. TOTAL ENCONTRADO: 1662 PUBLICAÇÕES
 FONTE: O autor (2014)

Por outro lado a engenharia para sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica ainda está carente de literatura e de informações técnicas que explorem o fenômeno de trilhamento elétrico e

também sobre a ruptura e falha por trilhamento elétrico (OTHMAN M. B. H., 2011). Essa dificuldade pode ser observada em outras duas buscas no serviço de informações estatísticas de publicações, Scopus, realizadas no dia 05/02/2014. A primeira busca [FIGURA 2 (a)], com a palavra chave “*tracking resistance*” no título, no resumo e nas palavras chaves para ampliar a busca por trabalhos que tratem sobre a característica de resistência ao trilhamento elétrico de materiais isolantes, e a segunda busca [FIGURA 2 (b)] com a palavra chave “*electrical tracking*” também no título, no resumo e nas palavras chaves para ampliar a busca por trabalhos que tratam sobre o fenômeno de trilhamento elétrico em materiais isolantes. As expressões exatas das buscas foram, (TITLE-ABS-KEY(“*tracking resistance*”)) para a primeira busca encontrando 183 trabalhos e (TITLE-ABS-KEY(“*electrical tracking*”)) para a segunda busca, encontrando apenas 37 trabalhos. Esses números mostram uma lacuna na exploração do fenômeno de trilhamento elétrico. Esse reduzido número de estudos sobre o tema deve-se provavelmente a alguns pontos:

- Complexidade em estabelecer um parâmetro geral para avaliação dos materiais quando estes apresentam ruptura por trilhamento elétrico;
- Dificuldade em acompanhar em tempo real a evolução da degradação superficial da amostra;
- Existência de diversas normas técnicas para avaliação da resistência ao trilhamento elétrico para materiais sólidos isolantes levando muitos pesquisadores a crer que o tema está esgotado.

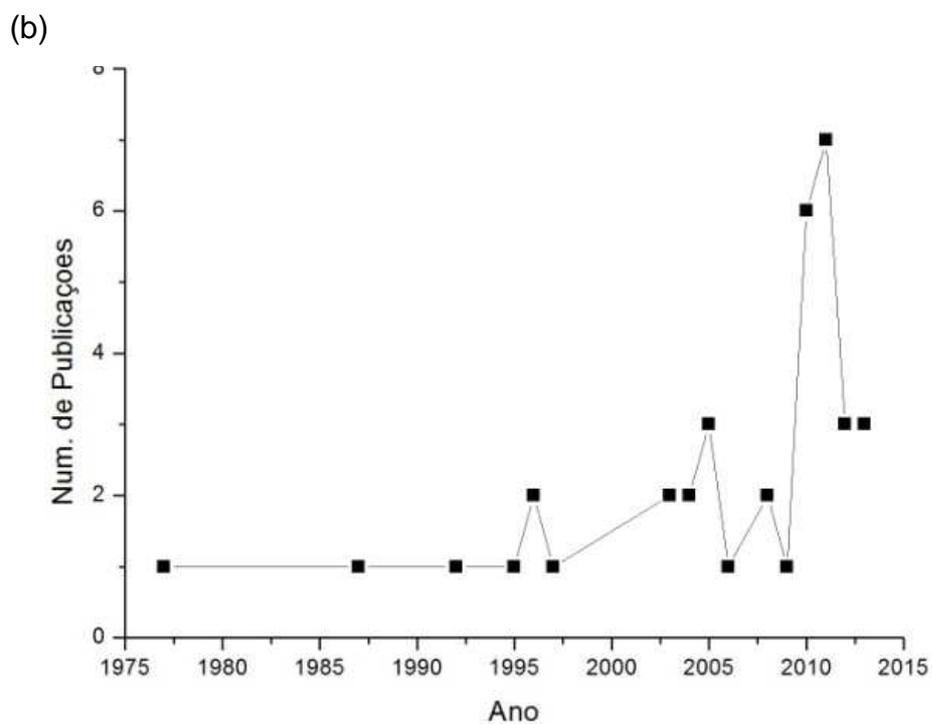
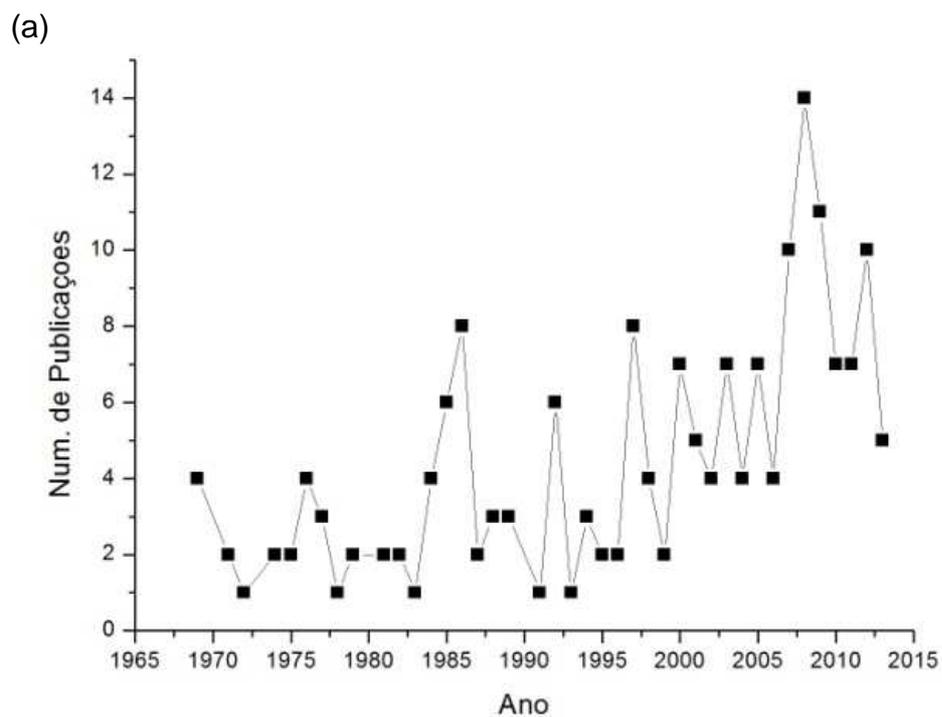


FIGURA 2 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO PELO SCOPUS. BUSCA REALIZADA EM 05/02/2014. (a) COM O TERMO “*TRACKING RESISTANCE*” NO TÍTULO, RESUMO E PALAVRAS CHAVES. TOTAL ENCONTRADO 183 PUBLICAÇÕES (b) COM O TERMO “*ELECTRICAL TRACKING*” NO TÍTULO, RESUMO E PALAVRAS CHAVES. TOTAL ENCONTRADO 37 PUBLICAÇÕES
 FONTE: O autor (2014)

É imprescindível que os materiais a serem empregados nos pontos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica sejam resistentes às ações da radiação solar, umidade, poluição bem como ao trilhamento e à erosão elétrica (SHORT, 2003). Na FIGURA 3 tem-se uma visão geral e simplificada de um sistema completo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (BLUME, 2007), onde em qualquer ponto desse sistema pode ocorrer algum tipo de falha nos dispositivos de isolamento, normalmente as falhas ocorrem principalmente por trilhamento elétrico.

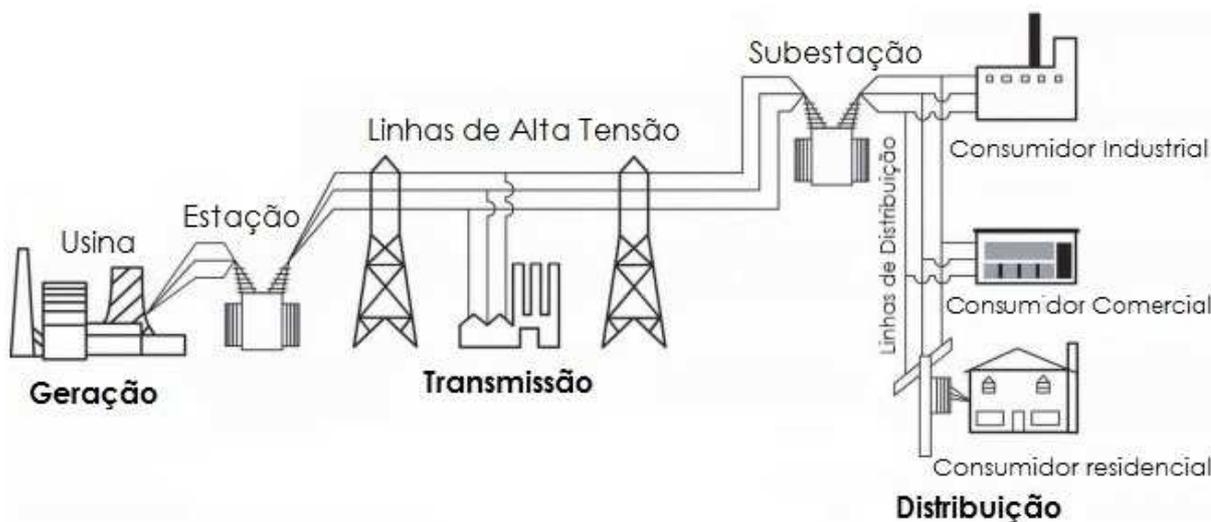


FIGURA 3 - VISÃO GERAL DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
 FONTE: BLUME (2007)

Os processos naturais de umidificação, oxidação e contaminação das superfícies dos isolantes elétricos, empregados em usos externos, produzem um aumento na condução da corrente elétrica, e uma diminuição da resistividade superficial do material dielétrico, facilitando desta forma o fenômeno de trilhamento elétrico e podendo gerar trilhas permanentes na superfície dos isoladores. A trilha gerada por trilhamento elétrico é formada por um caminho condutor permanente sobre a superfície do isolante (TOMCZAK, 2000).

A circulação de corrente em superfícies com a condutividade aumentada, como por exemplo, pela umidade, leva a um aquecimento do local, que causa a evaporação da água e, conseqüentemente, diminuindo a

condutividade e criando regiões secas com valores elevados de temperatura (MALIK, 1998).

Durante a repetição do processo de umidificação e secagem da superfície, pequenos arcos ocorrem entre pontos mais condutores, produzindo a carbonização do material isolante (trilhamento) ou a perda de material (erosão). Esse fenômeno é, portanto, caracterizado pela formação de resíduos a base de carbono (grafite, carbono amorfo, negro de fumo – materiais condutores) acompanhado por cintilações luminosas e leva à deterioração do material isolante com a formação de trilhas (MALIK, 1998).

Materiais isolantes para uso externo, principalmente quando sujeitos a campos elétricos não uniformes, devem ser avaliados quanto à capacidade de resistir ao trilhamento elétrico. Para tanto, diversos ensaios são previstos em normas pertinentes, que permitem selecionar os isolantes que suportem melhor o fenômeno e que sejam mais adequados aos ambientes em que serão aplicados (TOMCZAK, 2000).

2.1 SISTEMAS ISOLANTES

As demandas e o nível de isolamento exigidos em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica estão em constante evolução. Os isoladores têm como principal atribuição fazer a isolação das principais estruturas e equipamentos elétricos de qualquer instalação, muitas vezes também ficam sujeitos a cargas mecânicas contínuas. Devem ser capazes de suportar continuamente os campos elétricos aos quais estão expostos, suportar os distúrbios meteorológicos, como chuvas, raios, vendavais, granizo, ataques por contaminantes, sal, maresia, poluição, eventuais fungos nas regiões de alta umidade, e ainda estão expostos a vandalismo (MALIK, 1998).

As especificações dos níveis de isolamento nos sistemas, devem levar em consideração requisitos como: tensão de operação, níveis de tensão para descarga no ar e de manobra, resistência mecânica, nível de poluição, pluviometria, dimensões dos equipamentos onde seriam instalados, frequência da incidência de raios, resistividade superficial e volumétrica bem como a

resistência ao trilhamento elétrico. Estas especificações devem ser cuidadosamente estudadas para evitar que algum ponto do sistema apresente descargas ou falhas (DENSLEY, BARTNIKAS e BERNSTEIN, 1993).

As concessionárias de energia passaram a exigir certificados de ensaio dos isoladores aos fabricantes destes equipamentos, com o objetivo de evitar a compra de isoladores com materiais de baixa qualidade de isolamento.

Os materiais utilizados em isoladores possuem como características desejáveis (MARAN, 2010):

- Alta rigidez dielétrica;
- Alta resistividade superficial e volumétrica,
- Alta resistência ao trilhamento elétrico e
- Baixos fatores de perdas

Alguns materiais sólidos, poliméricos e cerâmicos como polietileno, borracha de silicone, vidro e porcelana são comumente utilizados em isoladores, pois possuem as características citadas acima. A Tabela 1 mostra uma comparação entre os tipos de isoladores utilizados, suas vantagens e desvantagens (MARAN, 2010).

TABELA 1 - TIPOS DE ISOLADORES UTILIZADOS, VANTAGENS E DESVANTAGENS

Material	Vantagens	Limitações
Porcelana	Longo histórico de uso; Performance conhecida; Fácil intercambiabilidade; Redução com as desapropriações em isoladores pilares;	Peso; Defeitos ocultos; Susceptível ao vandalismo; Técnicas de detecção de falhas nas linhas ainda não são 100% confiáveis.
Vidro	Longo histórico de uso; Desempenho conhecido; Fácil Intercambiabilidade; Defeitos facilmente visualizáveis.	Percepção negativa quanto à fragilidade; Peso; Atrativo para o vandalismo.
Polimérico	Redução com as desapropriações em isoladores pilares; Bom desempenho sob contaminação; Leveza; Facilidade de instalação; Pouco atrativo ao vandalismo.	Fratura frágil do núcleo; Efeito das intempéries no processo de envelhecimento; Menor intercambiabilidade; Defeitos ocultos; Técnicas de detecção de falhas em linhas energizadas ainda não totalmente desenvolvidas.

FONTE: MARAN (2010)

2.2 POLÍMERO - POLIETILENO

O polietileno, ou polieteno – denominação oficial da IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) - é uma poliolefina semicristalina, flexível, de grande utilização. Ele é encontrado em muitos produtos de diversos setores da indústria, por ser produzido em grande escala mundial, apresentar baixo custo, excelentes características físicas, químicas e elétricas (MARK, 1999; PEACOCK, 2000). É obtido por meio da polimerização do monômero de etileno (apenas átomos de carbono e hidrogênio – Figura 4), podendo ser polimerizado em baixas ou altas pressões, dependendo do tipo de iniciador catalítico (AKCELRUD 2007; WIEBECK e HARADA 2005; COUTINHO *et al.* 2003; FELDMAN e A. BARBALATA 1996).

Dependendo do tipo de catalisadores e do sistema das condições reacionais utilizados na polimerização, podem ser produzidos diferentes tipos de polietileno:

- Polietileno de baixa densidade (LDPE);
- Polietileno de alta densidade (HDPE);
- Polietileno de baixa densidade linear (LLDPE);
- Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE);

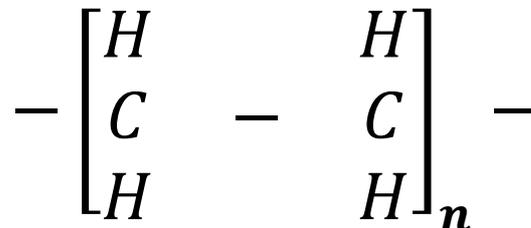


FIGURA 4 - UNIDADE DA MOLÉCULA BÁSICA DO ETILENO (OU ETENO)
 FONTE: Modificado pelo autor (2014)

- Polietileno de baixa densidade (LDPE)

O LDPE pode ser aplicado para confecção de filmes para embalagens industriais e agrícolas, filmes destinados a embalagens de alimentos líquidos e sólidos, filmes laminados e plastificados para alimentos, embalagens para produtos farmacêuticos e hospitalares, brinquedos e utilidades domésticas, revestimento de fios e cabos, tubos e mangueiras.

- Polietileno de alta densidade (HDPE)

O polietileno de alta densidade (HDPE) possui estrutura linear com baixo teor de ramificações, o que o torna um polímero com valores de cristalinidade que variam em torno de 75 a 85 %. A linearidade das cadeias torna a orientação e o empacotamento das lamelas cristalinas mais eficientes (FELDMAN e A. BARBALATA, 1996). Devido às características de elevada rigidez, resistência ao impacto, fluência e abrasão e resistência química, o HDPE encontra-se aplicado em diversos segmentos da indústria de transformação de termoplásticos, abrangendo processos de moldagem por sopro, extrusão e injeção. O processo de sopro é amplamente utilizado na transformação de diversos tipos de frascos, tanques de combustível, tambores e bombonas para armazenamento de produtos químicos. Por meio do processo de extrusão, destacam-se as utilizações para recobrimento e isolamento de fios e cabos, produção de geomembranas, sacos e sacolas para lixo e

supermercado, respectivamente. O processo de injeção termoplástica é utilizado para a fabricação de artefatos domésticos, brinquedos, tampas para garrafas, potes e, também em acessórios para utilização em redes elétricas, como espaçadores, isoladores, entre outros (COUTINHO *et al.* 2003).

O HDPE e o LDPE têm muitas aplicações em comum, mas em geral, o HDPE é mais duro e resistente e o LDPE é mais flexível e transparente.

- Polietileno linear de baixa densidade (LLDPE)

Este polietileno (LLDPE) é um copolímero, e pode ser obtido pelos processos de polimerização em fase gasosa, suspensão ou solução, e ainda, dependendo do tipo de catalisador empregado, que pode ser do tipo Ziegler-Natta homogêneo ou heterogêneo ou ainda, do tipo metallocênico, sendo este homogêneo (BECKER, 2002). A escolha do iniciador catalítico influencia a distribuição das ramificações alfa-olefínicas, como 1-buteno, 1-penteno, 1-hexeno ou 1-octeno, sendo que as quantidades dessas ramificações (comonômeros) podem estar compreendidas entre 8 a 10% na cadeia do polietileno. Devido à presença das ramificações alfa-olefínicas na estrutura do LLDPE, o produto final apresenta características diferenciadas quando comparado ao polietileno de baixa densidade, o que garante melhor processabilidade e possibilidade de formação de filmes finos com essa resina (MUNARO e AKCELRUD, 2008).

O LLDPE pode ser aplicado para a confecção de filmes para uso industrial, fraldas descartáveis e absorventes, lonas em geral, brinquedos, artigos farmacêuticos e hospitalares, revestimento de fios e cabos, embalagem de aves e de pão.

- Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE)

O UHMWPE pode ser aplicado em misturadores, raspadores, mancais, tubos, bombas, válvulas, filtros, gaxetas, revestimentos de tanques metálicos e de concreto, transportadores, roletes, bicos de enchimento, cepos de corte, galvanoplastia, transportadores industriais, artigos esportivos, ortopédicos e cirúrgicos (COUTINHO *et al.* 2003).

De uma forma geral os materiais poliméricos como o polietileno, possuem uma elevada resistência ao trilhamento elétrico, porém o polietileno não detém o avanço da formação de trilhas sobre a superfície do material utilizado como isolante, devido às intempéries as quais o material está sujeito

durante a operação em campo, como umidade, poluição, poeira, sal entre outros (TOMCZAK, 2000). Na TABELA 2 pode-se observar algumas propriedades do LLDPE e HDPE (COUTINHO *et al.* 2003).

TABELA 2- ALGUMAS PROPRIEDADES DE LLDPE E HDPE

Propriedades	LLDPE	HDPE
Rigidez dielétrica (kV/mm)	75	10
Resistividade volumétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$5 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{17}$
Fator de dissipação (1 MHz)	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
Densidade (g/cm^3)	0,92	0,95

FONTE: COUTINHO *et al.* (2003).

2.3 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os materiais compósitos de uma maneira geral são materiais reforçados, heterogêneos, também chamados de materiais conjugados, que são constituídos por duas ou mais fases distintas, uma chamada de matriz ou fase contínua e as outras de reforço ou fase dispersa (WIEBECK e HARADA, 2005), (FELDMAN e A. BARBALATA, 1996). Uma representação esquemática dos materiais utilizados em um compósito pode ser visualizada na FIGURA 5 (RABELLO, 2000).

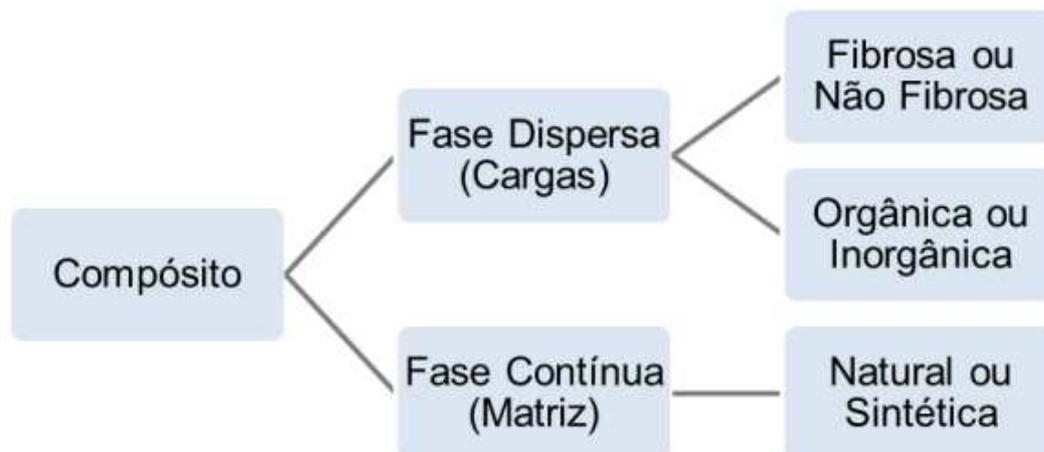


FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE COMPONENTES UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS
 FONTE: RABELLO (2000)

Não é possível estimar a data da primeira utilização de materiais particulados como reforço em materiais, para formação de compósitos, mas na história há relatos do emprego de materiais reforçados nas antigas construções do Egito, que eram feitas de barro reforçado com fibras vegetais e também, na América pré-colonizada, onde eram confeccionados vários utensílios domésticos de uma mistura de argila e fibras naturais (MARINHO, 2005).

Metais, cerâmicas e polímeros são utilizados como matriz em materiais compósitos. A matriz é o componente principal dos compósitos, mantendo protegendo e transferindo as solicitações recebidas ao material particulado em seu interior, chamado de reforço. A interação entre a matriz e o material particulado pode contribuir com o aumento ou redução de propriedades como ductilidade, isolamento elétrico, dureza, resistividade superficial e volumétrica bem como a resistência ao trilhamento elétrico (CALLISTER, 2002).

Reações indesejáveis na interface entre ambos componentes do compósito são diminuídas quando são estabelecidas ligações químicas ou mecânicas entre reforço e matriz, portanto, deve haver compatibilidade química no sistema heterogêneo (ESTEVES *et al.* 2004).

A crescente necessidade em melhorar as condições de suportabilidade em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica tem estimulado o desenvolvimento de materiais compósitos poliméricos que buscam, de uma maneira geral, maior facilidade de processamento, leveza,

resistividade superficial e volumétrica, resistência mecânica, elevada hidrofobicidade, alta rigidez dielétrica, baixo fator de perdas dielétricas e maior resistência ao trilhamento elétrico. Muitas pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de desenvolver materiais compósitos poliméricos com propriedades dielétricas diferenciadas (PETER et al. 2009 e LAI *et al.* 2014), por meio de uma melhor compreensão dos fenômenos físicos e químicos que afetam as propriedades dielétricas dos materiais e de interface.

2.4 ARGILAS ORGANOFÍLICAS

Argilas são matérias-primas formadas pela alteração de silicatos componentes de rochas, constituídas por aluminossilicatos hidratados (argilominerais), com resquícios de feldspato e quartzo (SANTOS, 1989). Na natureza, encontram-se argilas com distintas propriedades físico-químicas, capacidade de troca catiônica, cátions trocáveis, área superficial específica, proporcionando diversas aplicações.

Bentonita é uma rocha com argilominerais do grupo da esmectita, onde o principal argilomineral é o montmorilonita (SANTOS, 1989), composta de lamelas individuais ligadas por forças de van der Waals e eletrostáticas, devido a substituições isomórficas nas folhas. Para satisfazer a eletroneutralidade, cátions de metais alcalinos e alcalinos terrosos estão entre elas, hidratados em água ou em moléculas polares, penetrando no espaço interlamelar (MINISINI e TSOBNANG, 2005).

A montmorilonita é um filossilicato, a palavra filossilicato deriva do grego *phylon*, que significa folha, uma vez que todos os membros desse grupo possuem um perfil achatado ou em escama. A clivagem basal ocorre perfeitamente no plano $\{d_{001}\}$ e as lamelas de clivagem (placas) são flexíveis e raramente quebradiças, esse argilomineral apresenta camadas 2:1, com Al^{+3} ou Mg^{+2} entre as lamelas tetraédricas, unidos entre si por oxigênios comuns às camadas (Figura 6) (XI, DING, *et al.* 2004; KOZAK e DOMKA 2004; (GIANNELIS, KRISHNAMOORTI e MANIAS 1999).

A intercalação de surfactantes entre lamelas dos argilominerais modifica as propriedades da superfície de hidrofílica para hidrofóbica, expandindo e formando gel tixotrópico em meio orgânico, aumentando o espaço entre as lamelas (XI, DING, *et al.* 2004 e PLUART, DUCHET, *et al.*, 2004) desta forma facilitando que a matriz polimérica permeie o espaço interlamelar, podendo formar nanocompósitos intercalados ou esfoliados. A argila organofílica tem energia superficial menor, compatível com líquidos orgânicos ou polímeros, podendo ser agente reforçante na síntese de nanocompósitos polímero/argilomineral (LEE e KIM, 2002).

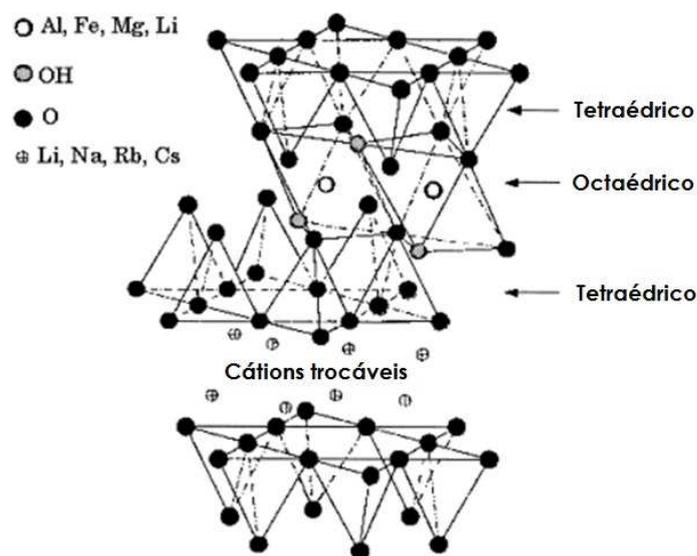


FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DA ARGILA MONTMORILLONITA 2:1
 FONTE: GIANNELIS, KRISHNAMOORTI e MANIAS (1999)

2.5 BORRACHA DE SILICONE

A borracha de silicone é classificada como um elastômero orgânico-inorgânico obtido através da polimerização de siloxanos orgânicos. As borrachas de silicone foram primeiramente desenvolvidas em 1943 (MODERN PLASTICS MAGAZINE, 1994) e são empregadas em dispositivos que necessitem de uma boa estabilidade térmica. As etapas da geração da estrutura básica do polidimetiloxano que será o precursor da borracha de silicone é mostrada na Figura 7.

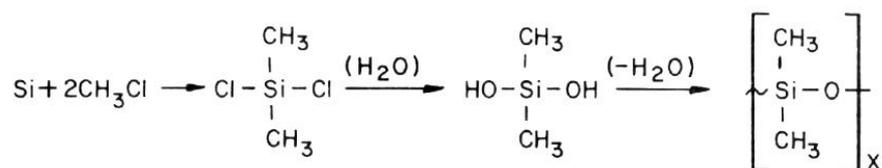


Figura 7 - ETAPAS DA GERAÇÃO DO POLIDIMETILOXANO
 FONTE: MODERN PLASTICS MAGAZINE (1994)

A borracha de silicone apresenta uma particularidade única quando comparada com outras borrachas, pois na sua cadeia principal não apresentam o carbono, mais sim o silício ligado ao oxigênio. A energia da ligação do silício com o oxigênio é muito maior do que as ligações carbono-carbono e carbono-oxigênio, o que lhe permite propriedades térmicas superiores.

As borrachas de silicone são resistentes ao ozônio, radiação ultravioleta, solventes e óleos. A característica hidrofóbica garante correntes de fuga de pouca intensidade o que resulta em excelente comportamento em meios poluídos e alta resistência ao trilhamento elétrico.

Algumas propriedades da borracha de silicone são dadas na Tabela 3 a seguir:

TABELA 3 – ALGUMAS PROPRIEDADES DA BORRACHA DE SILICONE

Propriedades	Valores
Resistividade Volumétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$)	2 - $10 \cdot 10^{14}$
Rigidez Dielétrica (kV/mm)	20
Resistência à Tração (Kg/cm^2)	77 – 95
Alongamento (%)	275 – 780
Temperatura de trabalho ($^{\circ}\text{C}$)	-60 +250

FONTE: DÁVI (2008)

Recentemente, alguns dispositivos elétricos passaram a ser confeccionados a base de compósitos, constituídos em alguns casos de um tubo central de plástico reforçado com fibras e um revestimento externo resistente às interpéries feito de borracha de silicone. Isoladores compósitos são mais baratos, leves e têm excelente capacidade hidrofóbica. Estas combinações os tornam ideais para serviço em áreas poluídas (THOMAZINI,

2009). Contudo, estes materiais ainda não possuem uma vida útil tão longa quanto os vidros e porcelanas, pois sofrem uma maior degradação pelas condições climáticas e de operação. A Figura 8 ilustra o aspecto construtivo de um isolador de borracha de silicone.

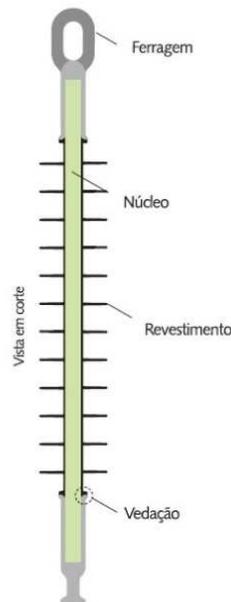


FIGURA 8 - VISTA EM CORTE DE UM ISOLADOR DE BORRACHA DE SILICONE
FONTE: THOMAZINI (2009)

2.6 TRILHAMENTO ELÉTRICO

2.6.1 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO

O trilhamento pode ser definido como a formação de um caminho condutor permanente, formado normalmente por compostos de carbono, através da superfície do isolante, resultado da degradação devido à ação das descargas superficiais. Quando este fenômeno ocorre numa região localizada, ocorre a erosão. O valor da resistividade superficial do polietileno pode ser significativamente reduzida na presença de contaminantes (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2000) aumentando consideravelmente a degradação da superfície do material devido às

descargas superficiais. Esta contaminação surge a partir da atmosfera, na forma de poluição, e uma camada úmida promove um filme contínuo, com baixa resistividade superficial, criando condições para fluir correntes entre pontos com diferentes potenciais. Esta baixa resistividade superficial implica em uma alta corrente superficial e alta dissipação de calor, causando a evaporação do filme contínuo de água e poluição. Como esta evaporação da solução não é uniforme, ocorre a formação de bandas secas, que interrompem a corrente superficial. Ocorre um aumento de tensão elétrica nestas regiões, suficiente para iniciar a ocorrência de descargas na superfície do material, na região entre as bandas secas, que alcançam elevadas temperaturas, causando a formação de erosão e trilhas de material orgânico condutor, como carbono amorfo, grafite e negro de fumo. A ruptura completa da superfície do material ocorre quando uma trilha desses materiais orgânicos propagam-se por toda extensão do material.

Este processo de umidificação, evaporação e posterior degradação da superfície do material, até a formação de trilhas condutoras foi proposto por Malik (MALIK, 1998) apresentando as seguintes fases:

- a) Contaminação e umedecimento da superfície do material, formando uma camada condutora com baixa resistividade superficial;
- b) Passagem de uma corrente superficial através da solução úmida contaminante, com alta dissipação de calor, causando perda de massa do fluido contaminante, favorecendo a formação de bandas secas;
- c) Interrupção da corrente superficial devido à presença de bandas secas, causando um aumento no campo elétrico local entre as bandas úmidas e iniciando as descargas superficiais;
- d) Devido as descargas superficiais a superfície do isolante alcança elevadas temperaturas, causando a formação de resíduos à base de carbono levando o material a uma gradual degradação;
- e) Propagação e aumento do resíduo carbonáceo condutor;
- f) Ruptura completa da superfície do material isolante, fazendo que o material se comporte como um condutor de eletricidade.

Na Figura 9 pode-se observar uma ilustração destes processos identificados de a-f.

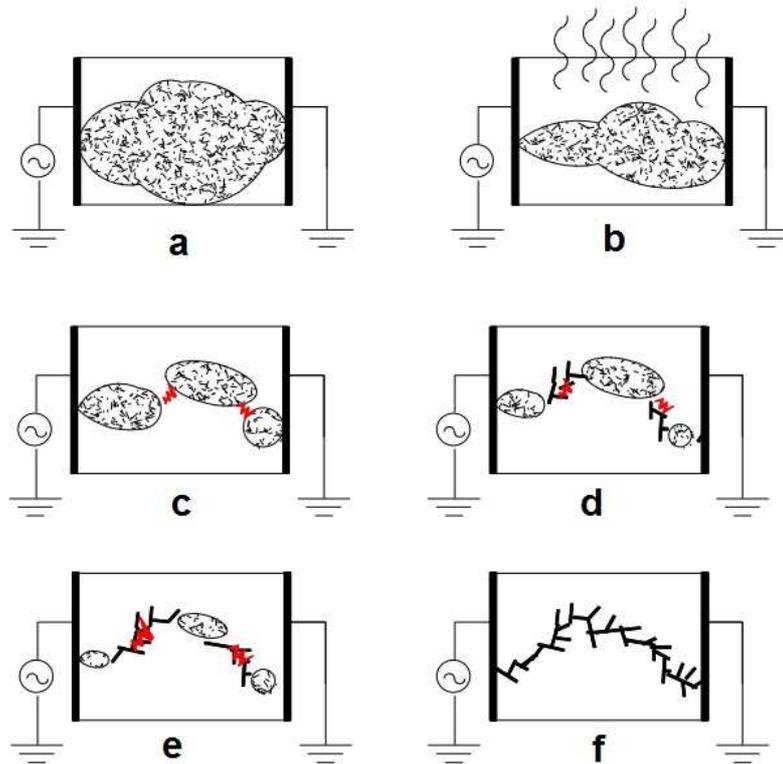


FIGURA 9 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO. A) CONTAMINAÇÃO E UMEDECIMENTO DA SUPERFÍCIE DO MATERIAL, FORMANDO UMA CAMADA CONDUTORA COM BAIXA RESISTIVIDADE SUPERFICIAL; B) PASSAGEM DE UMA CORRENTE SUPERFICIAL ATRAVÉS DA SOLUÇÃO ÚMIDA CONTAMINANTE, COM ALTA DISSIPACÃO DE CALOR, CAUSANDO PERDA DE MASSA DO FLUIDO CONTAMINANTE, FAVORECENDO A FORMAÇÃO DE BANDAS SECAS; C) INTERRUÇÃO DA CORRENTE SUPERFICIAL DEVIDO À PRESENÇA DE BANDAS SECAS, CAUSANDO UM AUMENTO NO CAMPO ELÉTRICO LOCAL ENTRE AS BANDAS ÚMIDAS E INICIANDO AS DESCARGAS SUPERFICIAIS; D) DEVIDO AS DESCARGAS SUPERFICIAIS A SUPERFÍCIE DO ISOLANTE ALCANÇA ELEVADAS TEMPERATURAS, CAUSANDO A FORMAÇÃO DE RESÍDUOS À BASE DE CARBONO LEVANDO O MATERIAL A UMA GRADUAL DEGRADAÇÃO; E) PROPAGAÇÃO E AUMENTO DO RESÍDUO CARBONÁCEO CONDUTOR; F) RUPTURA COMPLETA DA SUPERFÍCIE DO MATERIAL ISOLANTE, FAZENDO QUE O MATERIAL SE COMPORTE COMO UM CONDUTOR DE ELETRICIDADE. MODELO PROPOSTO POR MALIK
 FONTE: MALIK (1998)

Com a crescente utilização dos materiais poliméricos como isolante elétrico criou-se a necessidade de se definir um teste que permita avaliar a resistência destes materiais, sobretudo em atmosferas poluídas, e que possam classificá-los quanto à sua resistência às descargas superficiais.

Existem vários métodos de ensaios de verificação da resistência ao trilhamento elétrico e à erosão propostos. Nenhum deles conta com aceitação geral de fabricantes ou de usuários. Esta multiplicidade de métodos, deve-se ao fato da dificuldade da aplicação de testes que simulem as condições de campo. Então, é comum existirem inúmeros testes normalizados que tentam

simular os vários eventos envolvidos no processo de formação do trilhamento elétrico. Em geral, os ensaios de resistência ao trilhamento elétrico são utilizados para comparação entre materiais. Os primeiros ensaios que utilizavam o gotejamento de eletrólitos para contaminação da superfície datam de 1930 (na Suíça) e 1935 (nos Estados Unidos da América) (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2000). A marinha britânica utilizava o teste “Admiralty”, que foi modificado pelo físico Yarsley (1950), que consistia em gotejar o eletrólito contaminante numa frequência determinada, sobre a superfície horizontal do corpo de prova, onde se fixavam os eletrodos sob uma tensão constante e media-se o tempo até a ruptura da material.

No ano de 1959, o norueguês Poppe introduziu como critério de avaliação de término do ensaio, a tensão atingida no momento da ruptura após a queda de 50 gotas de uma solução de cloreto de amônio a 0,1% em massa, em intervalos de 30 segundos. Este ensaio seria mais tarde normalizado como a Norma IEC 60112 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003).

Em 1956, Albright e Starr, baseando-se em observações de um material exposto ao ar livre, concluíram que a umidade e a poeira acumulada formam uma película superficial com baixa resistividade elétrica. Este ensaio foi definido como “*Dust-and-Fog-Test*”, que foi modificado por Sommerman em 1960 para constituir o método recomendado pela ASTM 2132-98 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2001). O teste consiste em aplicar uma tensão alternada entre os eletrodos, com a amostra localizada dentro de uma câmara com injeção contínua de água pulverizada e a superfície coberta com um pó contaminante.

Mathes e Mc Gowan desenvolveram em 1961 um método de ensaio no qual colocava-se a amostra inclinada em relação à horizontal e escorria-se o líquido contaminante na superfície inferior, a partir do eletrodo superior. Esta metodologia serviu de base para o ensaio atualmente padronizado segundo a norma IEC 60587 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007).

2.6.2 ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 60112

Este método de ensaio determina a resistência ao trilhamento elétrico de materiais isolantes elétricos sólidos para tensões elétricas variando de 100 a 600 V, quando o material está exposto a gotejamento de água com adição de contaminantes. Este ensaio é comumente conhecido como ensaio de índice de trilhamento (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003).

Para realização deste ensaio, as amostras são preparadas em placas planas, com dimensões aproximadas de 2,5 cm x 1,5 cm x 0,2 cm, são lixadas longitudinalmente com lixa 400 por 60 s com água destilada e limpas com álcool isopropílico, para livrar a superfície da amostra de impurezas.

Uma solução contaminante é empregada no ensaio, contendo $(0,100 \pm 0,002)$ % em massa de cloreto de amônio, com a finalidade de atribuir condutividade elétrica a solução e $(0,020 \pm 0,002)$ % em massa de isooctil fenoxipolietoxietanol, com o objetivo de aumentar a molhabilidade da solução. Os dois componentes devem ser diluídos em água destilada e a solução resultante deve apresentar uma resistividade elétrica de $(370 \pm 5) \Omega \cdot \text{cm}$ a 23°C .

Este ensaio é realizado à temperatura ambiente, com a amostra posicionada horizontalmente entre os eletrodos de platina. Os eletrodos devem possuir 5 mm de largura por 2 mm de espessura e comprimento de 20 mm e distantes entre si em 4 mm na superfície da amostra e com uma angulação de 60° como na Figura 10. Cada eletrodo deve exercer uma força de aproximadamente 1 N sobre a amostra, a fim de garantir o contato entre os eletrodos e superfície da amostra.

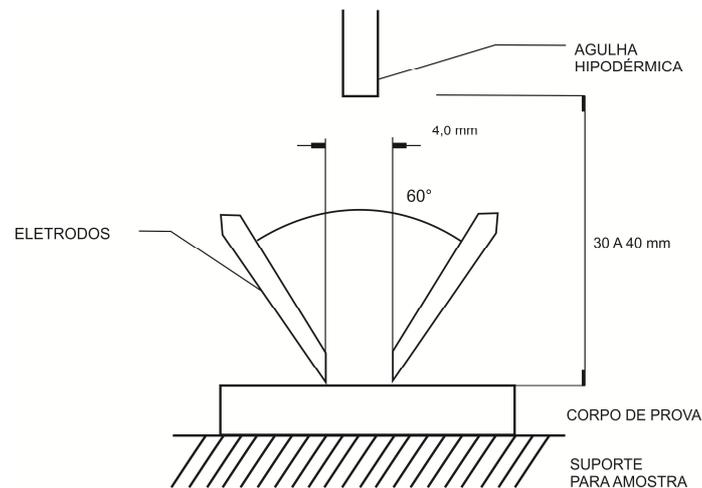


FIGURA 10 - ESQUEMA DOS ELETRODOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE ÍNDICE DE TRILHAMENTO
 FONTE: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (2003)

O ensaio é realizado com tensões aplicadas no intervalo de 100 a 600 V, sempre em múltiplo de 25 V. O gotejamento da solução contaminante deve ter um intervalo de 30 s entre cada gota, com um volume de $0,020 \text{ cm}^3$ e deve cair sobre a superfície a ser ensaiada, no ponto médio entre os eletrodos. Este procedimento é repetido até um total de 50 gotas ou até o momento em que a corrente de fuga sobre o material ultrapasse o limite de 500 mA durante 2 s.

A classificação do material é realizada pelo coeficiente de escoamento comparativo (CEC), que representa o valor numérico da tensão elétrica máxima, em volts, com a condição de que não ocorra ruptura abaixo de 50 gotas. A ruptura é obtida quando uma corrente igual ou superior a 500 mA persistir no circuito por mais de 2 segundos, ou quando a amostra inflama.

Pode-se observar um diagrama do arranjo experimental para o ensaio de trilhamento elétrico segundo a norma IEC 60112 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003) na Figura 11.

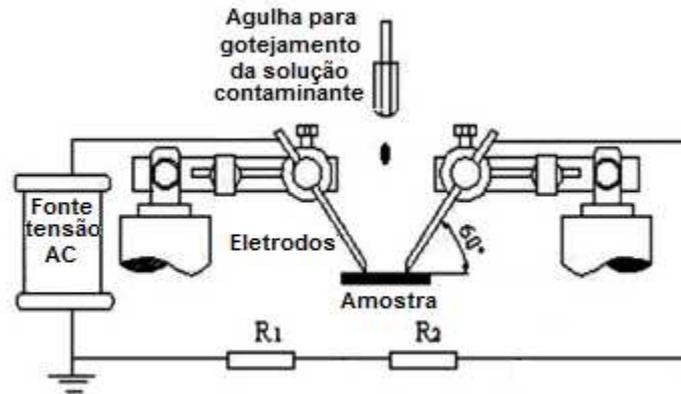


FIGURA 11 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA O ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 60112
 FONTE: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (2003)

2.6.3 ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 60587

Este método de ensaio avalia o material isolante elétrico para utilização sob severas condições ambientais através de medidas de resistência ao trilhamento elétrico e erosão, em tensões elétricas variando de 1000 a 6000 V, em corrente alternada, quando o material está exposto ao escoamento de solução contaminante na superfície do material (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007). Este ensaio é comumente chamado como Ensaio de Plano Inclinado, conforme pode ser observado na Figura 12.



FIGURA 12 - MONTAGEM DO CORPO DE PROVA NO ENSAIO PLANO INCLINADO, EM 1 ENTRADA DA SOLUÇÃO CONTAMINANTE, 2 PAPEL UNIFORMIZADOR DO FLUXO DA SOLUÇÃO CONTAMINANTE, 3 ELETRODO DE ALTA TENSÃO, 4 AMOSTRA E 5 ELETRODO DE BAIXA TENSÃO.

FONTE: O autor (2014)

Para realização deste ensaio, as amostras são cortadas nas dimensões (7 ± 1) cm e $(11,8\pm 0,2)$ cm e perfuradas nas extremidades com broca 5 mm, para fixação da amostra no porta amostra e devem apresentar espessura de $(5,00\pm 0,05)$ mm. A superfície da amostra também é lixada longitudinalmente com lixa 400, para livrar a superfície de impurezas, durante 60 s com água destilada. Em seguida são limpas com álcool isopropílico e acondicionadas em dissecador com sílica gel por 24 h antes da realização do ensaio.

Uma solução contaminante é empregada no ensaio, sendo bombeada em direção a amostra por uma bomba peristáltica, contendo $(0,100\pm 0,002)$ % em massa de cloreto de amônio, com a finalidade de atribuir condutividade elétrica a solução e $(0,020 \pm 0,002)$ % em massa de isooctil fenoxipolietoxietanol, com o objetivo de aumentar a molhabilidade da solução. Os dois componentes devem ser diluídos em água destilada e a solução resultante deve apresentar uma resistividade elétrica de (357 ± 5) $\Omega\cdot\text{cm}$ a 23°C .

Este ensaio é realizado à temperatura ambiente em um conjunto de 5 (cinco) amostras simultaneamente. Os corpos de prova são montados com a superfície tratada voltada para baixo e inclinada em 45° em relação a horizontal, com os eletrodos separados por uma distância de $(50 \pm 0,5)$ mm.

O material é classificado pela tensão de trilhamento em degraus, cada degrau com 250 V. A tensão de trilhamento em degraus é a tensão mais

elevada, suportada pelos 5 corpos de prova, sem ocorrência de falha, durante uma hora. O ponto final do ensaio, ou a ruptura do material, ocorre quando o valor da corrente no circuito através do corpo de prova, exceder 60 mA e persistir por mais de 2 s.

O material é então classificado como Classe 2Ax, onde x é a tensão mais elevada, em kV, suportada pelo material sob ensaio, sem ocorrer ruptura (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007).

Pode-se observar um diagrama do arranjo experimental para o ensaio de trilhamento elétrico segundo a norma IEC 60587 na Figura 13.

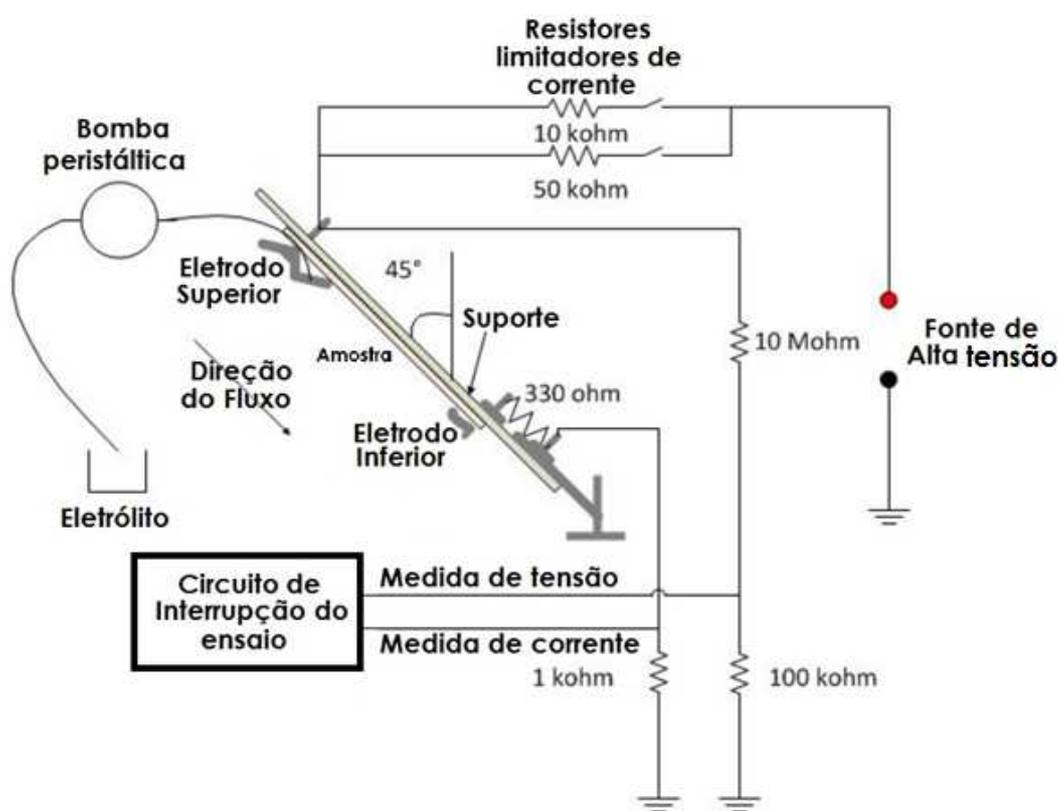


FIGURA 13 - DIAGRAMA DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA O ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 60587
 FONTE: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (2007)

2.6.4 ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA ASTM D 2132 – 98

O isolamento elétrico em campo pode falhar como resultado do trilhamento, da erosão, ou uma combinação de ambos, quando expostos em ambientes com elevada humidade e contaminantes.

Isto é particularmente verdadeiro para isoladores orgânicos em aplicações exteriores, onde a superfície do isolamento fica contaminada por depósitos de humidade e sujeira, como pó de carvão, poeira ou sal. Este ensaio simula uma contaminação exterior extremamente agressiva.

Com os eletrodos montados como na Figura 14, as amostras com um revestimento de pó sintético ficam no interior de uma câmara, como na Figura 15. Direciona-se um spray de água no corpo de prova. Depois de a superfície ter sido molhada, aplica-se uma tensão de até 1 500 V com frequência de 60 Hz, entre os eletrodos. A formação de arco ocorre em áreas localizadas com elevada resistência elétrica, produzidas pela evaporação não uniforme da água com contaminante. Estes arcos produzem temperaturas elevadas no isolamento com carbonização resultante dos materiais orgânicos. Esta carbonização concentra o campo elétrico. Em tais casos, uma trilha de carbono é formada entre os eletrodos e acaba por produzir uma falha. Em alguns casos, a erosão progride a partir de algum dos eletrodos superiores, para o eletrodo de guarda. Os materiais que resistem ao ensaio não podem trilhar nem erodir sob a ação do arco.

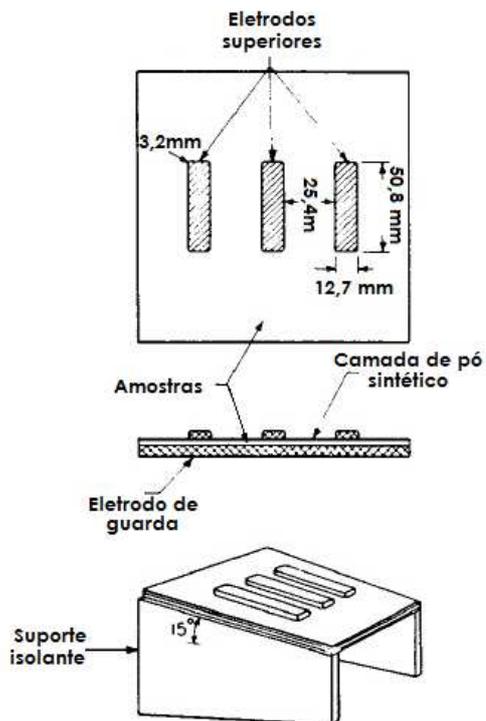


FIGURA 14 - DISPOSIÇÃO DOS ELETRODOS SOBRE A AMOSTRA
 FONTE: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2001)

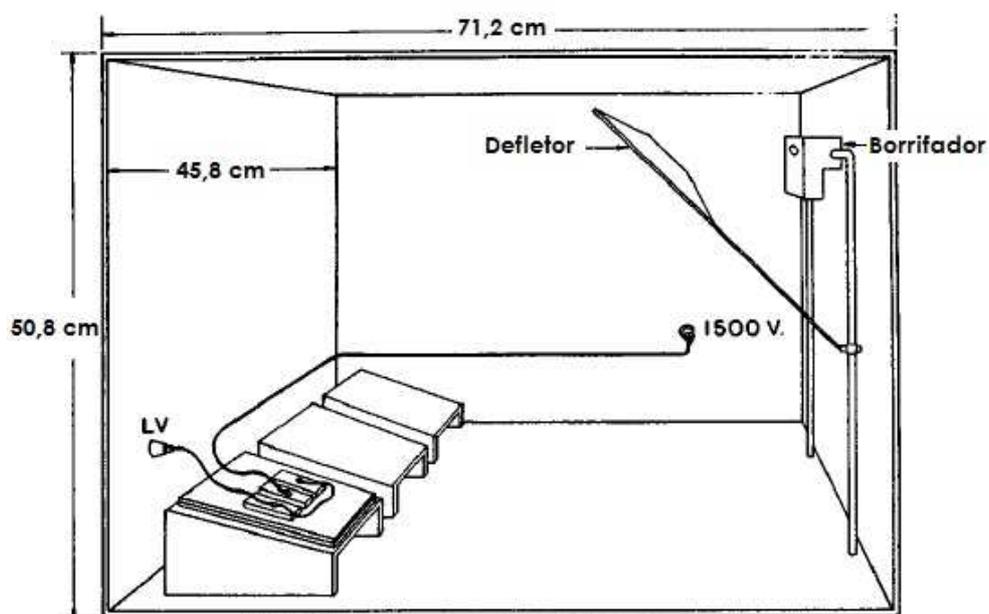


FIGURA 15 - CÂMARA DE NÉVOA SALINA - RECOMENDAÇÕES MÍNIMAS DE DIMENSÕES
 FONTE: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2001)

2.6.5 ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO SEGUNDO A NORMA IEC 62217 - RODA DE TRILHAMENTO

O ensaio segundo a norma IEC 62217 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2005), chamado de Roda de trilhamento elétrico realiza o ensaio sobre dois ou quatro isoladores. Antes de iniciar o ensaio os isoladores devem ser limpos com água deionizada. Em seguida, as amostras são posicionadas como na Figura 16. Cada amostra leva aproximadamente 40 s para percorrer um ciclo completo e o ensaio completo pode levar até 5 000 h.

Na primeira parte do ciclo, a amostra é imersa em uma solução salina. O próximo ciclo deve permitir que a amostra perca o excesso de solução contaminante salina e assegure uma fina camada de humidade na superfície que irá provocar descargas através das bandas úmidas e secas que serão formadas durante o terceiro ciclo.

Durante a terceira parte do ciclo, a amostra é energizada com tensão alternada com uma frequência de 60 Hz.

Na última parte do ciclo a amostra é arrefecida a temperatura ambiente, esta fase do ciclo permite que a superfície aquecida pelas descargas superficiais seque e esfrie antes do início do ciclo seguinte.

A solução salina deve ser substituída semanalmente durante as interrupções semanais do ensaio para a inspeção, esse tempo de inspeção não deve ser superior a 1 h. Os períodos de interrupção não são computados na duração do ensaio.

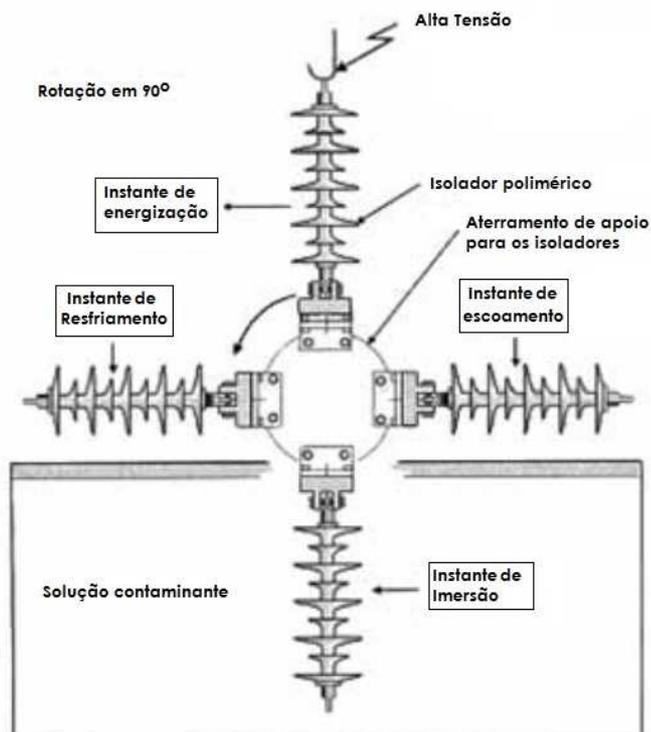


FIGURA 16 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA RODA DE TRILHAMENTO ELÉTRICO
 FONTE: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (2005)

2.6.6 TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DO TRILHAMENTO ELÉTRICO

Estudos sobre o fenômeno de trilhamento elétrico estão sendo desenvolvidos por diversos centros de pesquisa ao redor do mundo, com maior destaque para os estudos realizados no Japão por (DU e LIU, 2009), onde o fenômeno do trilhamento elétrico em materiais poliméricos é explorado por meio de técnicas de métodos não lineares, como análise de recorrência (Recurrence Plot - RP), análise da formação de caminhos a base de carbono por meio da dimensão fractal e também por transformada Wavelet (DU e KOBAYASHI 1998; DU, DONG e ZHENG 2007; DU, ZHANG, *et al.*, 2010).

Em geral, os ensaios que utilizam como ferramenta de análise o método RP baseiam-se na norma IEC 60112. O método RP é uma ferramenta de análise não-linear avançada e oferece uma opção gráfica útil para extrair informações da corrente de fuga durante a descarga na superfície da amostra.

O método baseia-se nas características não-lineares da corrente de descarga (ECKMANN, KAMPHORST e RUELLE, 1987). Ao utilizar o método de RP, as características não-lineares de sistemas dinâmicos podem ser ilustradas em um mapa, como é o caso da descarga na superfície de um material durante o ensaio de trilhamento elétrico. Pode-se observar um exemplo do método RP na Figura 17.

Densidade de pontos e espaços em branco estão relacionados as características do sinal (KAREN, 1999). Maior densidade de pontos indica que os vetores de incorporação, são muito semelhantes aos dos vetores vizinhos no espaço de fase. Os vetores de incorporação são vetores reconstruídos com base na dimensão de incorporação, essa dimensão é ajustável de acordo com o tamanho da vizinhança. Uma menor densidade de pontos representa um processo de dispersão. Os espaços em branco são devidos à alta taxa transiente. Quanto maior a área em branco, mais rápida é a mudança na amplitude do sinal gerador do mapa RP.

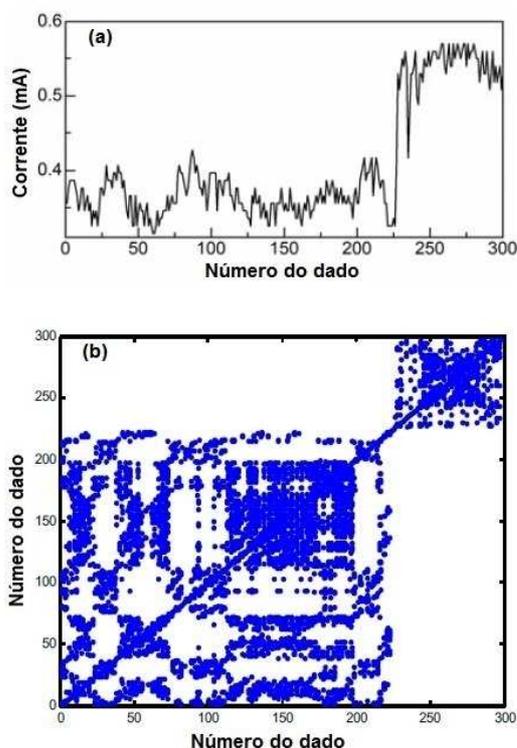


FIGURA 17 – (A) SÉRIE TÍPICA DE CORRENTE DURANTE AS DESCARGA SUPERFICIAL (B) MAPA RECONSTRUIDO DA SÉRIE DE DADOS EM (A)
FONTE: DU E LIU (2009)

As análises da formação de caminhos à base de carbono por meio da dimensão fractal é realizada por meio das imagens da superfície de trilhamento, com base em um padrão fractal bidimensional, que pode extrair e identificar as características da imagem. Com base na técnica de imagem-padrão de identificação, a imagem do trilhamento é convertida em uma imagem binária que consiste de uma série de pixels. Um software especial deve ser desenvolvido para realizar a contagem de pixels escuros e claros da imagem binária e extrair a dimensão fractal da superfície carbonizada após os ensaios. Esta técnica utiliza-se de recursos computacionais para mensurar o tamanho da trilha formada durante um ensaio de trilhamento elétrico. A Figura 18 mostra alguns padrões de trilhamento elétrico típicos, com diferentes percentuais de sílica nanométrica. Pode-se observar visualmente ou por meio da análise de dimensão fractal que o tamanho da superfície carbonizada é influenciada pelo percentual de sílica nanométrica (DU, ZHANG, *et al.*, 2010).

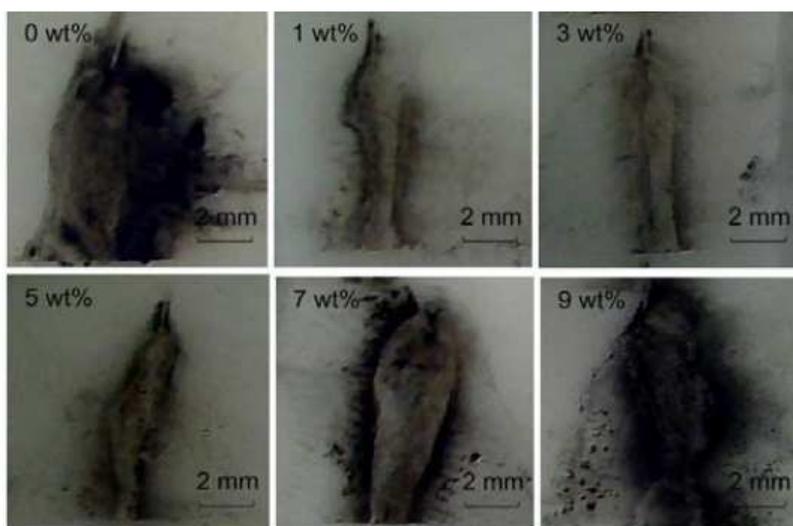


FIGURA 18 - PADRÃO DE TRILHAMENTO TÍPICO, COM DIFERENTES PERCENTUAIS DE SÍLICA NANOMÉTRICA
FONTE: DU, ZHANG, *et al.* (2010)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para este trabalho utilizou-se, polietileno linear de baixa densidade (LLDPE), polietileno de alta densidade (HDPE), fornecidos pela Dow Química e borracha de silicone, bem como compósitos poliméricos, com matriz de LLDPE nas proporções 0,0; 0,5; 1,0 e 1,5 % em massa de argila montmorilonita NovaClay™.

As amostras de LLDPE e HDPE foram preparadas em um homogeneizador de laboratório, tipo Draiz MH 100, fabricado pela MH Equipamentos, com 3600 RPM. As misturas foram obtidas e submetidas a termoprensagem, a 165 °C, em moldes de alumínio protegidos por folhas de acetato, com posterior resfriamento lento ao ar, até a temperatura ambiente. As cargas de pressão utilizadas foram de 2 toneladas, aplicada inicialmente por 2 minutos, depois aumentada para 4 toneladas por 2 minutos, permanecendo mais 3 minutos com 6 toneladas. Este processo pode ser melhor visualizado no fluxograma da FIGURA 19.

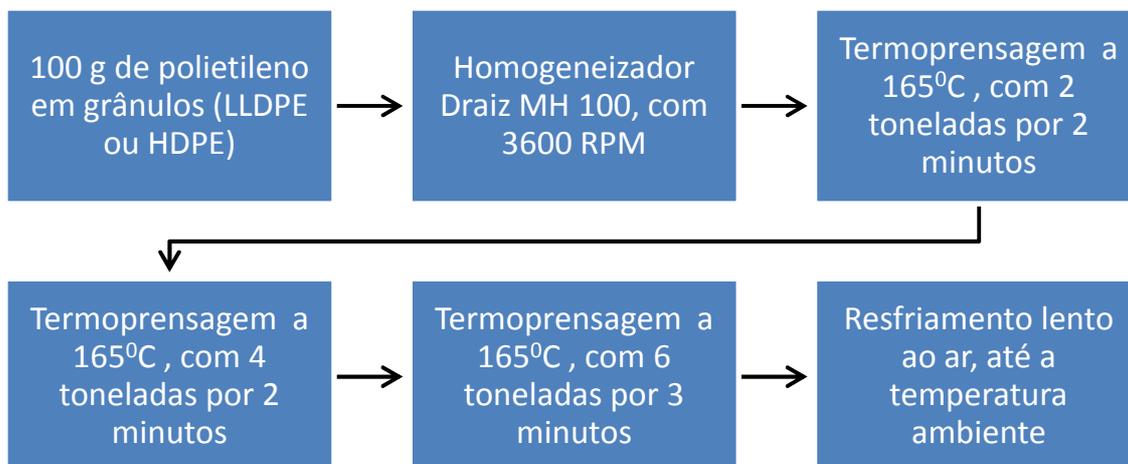


FIGURA 19 - FLUXOGRAMA DE PREPARAÇÃO DAS PLACAS DE POLIETILENO (LLDPE OU HDPE)
 FONTE: O autor (2014)

As amostras de compósitos com matriz polimérica de LLDPE foram também preparadas no homogeneizador de laboratório, tipo Draiz MH 100, fabricado pela MH Equipamentos, com 3600 RPM. As misturas com 0,5; 1,0% e 1,5% em massa de argila montmorilonita foram obtidas da mesma forma que a matriz de LLDPE.

A borracha de silicone utilizada, foi retirada de um isolador de ancoragem da Balestro, que são fabricados a partir de um bastão de fibra de vidro, o qual é fixado nas ferragens de conexão. Posteriormente é aplicado sobre este conjunto o revestimento isolante em borracha de silicone, obtendo-se um isolador compacto, leve, de grande resistência mecânica e de elevada resistência às intempéries. Este isolador, do qual amostras de borracha de silicone foram retiradas, já havia sido utilizado em campo.

3.2 ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental desenvolvido para realização dos estudos de trilhamento elétrico está apresentado na figura 20 e 21. Este arranjo utilizou

como base o arranjo experimental da norma IEC 60112. Ele é constituído de um transformador elevador; um par de eletrodos de platina (de dimensões 5 mm de largura, 2 mm de espessura e 20 mm de comprimento); um suporte de acrílico (desenvolvido de forma a possibilitar o controle da altura de acordo com o corpo-de-prova utilizado afim de permitir a variação do distanciamento de 4 mm até 6 mm entre os eletrodos) e; um sistema de gotejamento que fica a uma altura de (30 ± 5) mm do corpo-de-prova. A solução contaminante utilizada no sistema de gotejamento foi preparada com, $(0,100 \pm 0,002)$ % em massa de cloreto de amônio e $(0,020 \pm 0,002)$ % em massa de isooctil fenoxipolietoxietanol em água destilada, com uma resistividade de (395 ± 5) $\Omega \cdot \text{cm}$ (a $23 \pm 1^\circ\text{C}$). Foram também desenvolvidos dois circuitos, um deles eletrônico, ajustado para atuar para correntes iguais ou superiores a 200 mA para proteção de todo o sistema (circuito que chamaremos de sistema de proteção sobrecorrente) e outro opto-eletrônico, sendo que este circuito fica localizado entre o sistema de coleta de dado e o arranjo experimental, tornando-os desta forma isolados eletricamente, ajustado para limitar as tensões na entrada do sistema de aquisição de dados e responder sem defasagem (sistema de proteção DAQ).

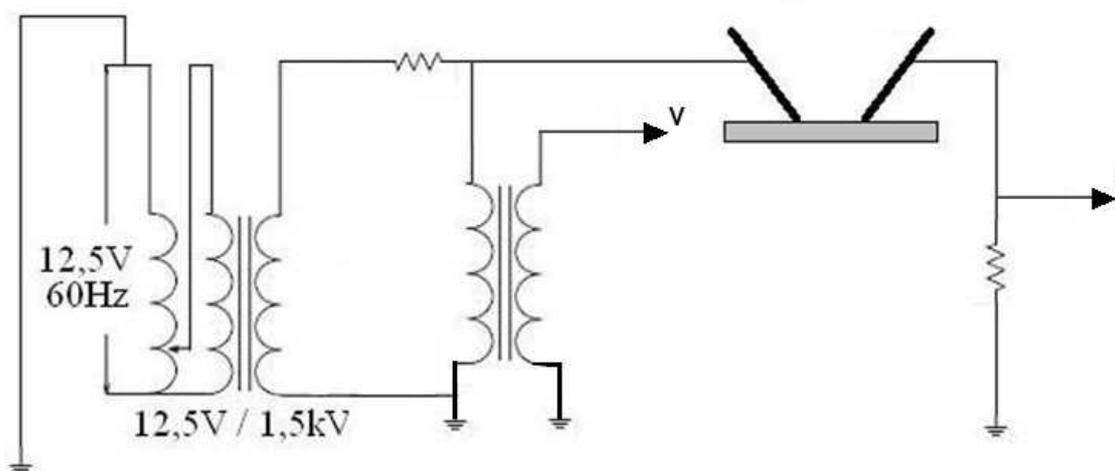


FIGURA 20 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PRIMEIRO ESTÁGIO
 FONTE: O autor (2014)

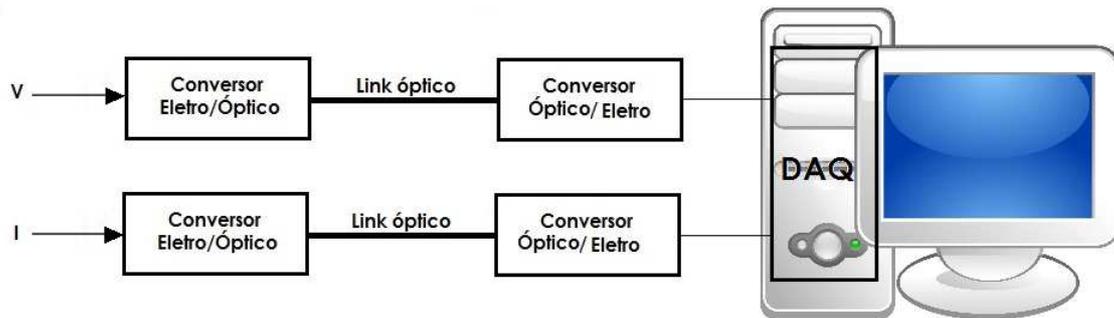


Figura 21 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO SEGUNDO ESTÁGIO
 FONTE: O autor (2014)

3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE TRILHAMENTO

As amostras foram preparadas em lâminas de 2,5 cm x 1,5 cm x 0,2 cm aproximadamente, lixadas por um minuto e limpas com álcool isopropílico para livrar a superfície de impurezas. Após esse procedimento, a amostra foi colocada no arranjo experimental com a superfície em sentido horizontal sobre o suporte. A distância entre os eletrodos foi ajustada em 4 mm, 5 mm ou 6 mm. Foram aplicadas tensões elétricas variando entre 1,0 kVAC e 2,0 kVAC, para seleção da tensão que melhor apresente as diferentes fases do fenômeno de trilhamento elétrico, com uma frequência de 60 Hz entre os eletrodos. Simultaneamente à aplicação de tensão a solução contaminante ficou gotejando de uma altura de (30 ± 5) mm a uma taxa que variou de 6 gotas/min até 20 gotas/min, sobre o corpo-de-prova. As gotas do contaminante devem cair sobre a superfície a ser ensaiada no ponto médio entre os eletrodos. Pode-se observar na Figura 22, um instantâneo ($\Delta t \approx 0,2$ s) da descarga superficial sobre a amostra durante a secagem de uma gota durante o ensaio de trilhamento elétrico.

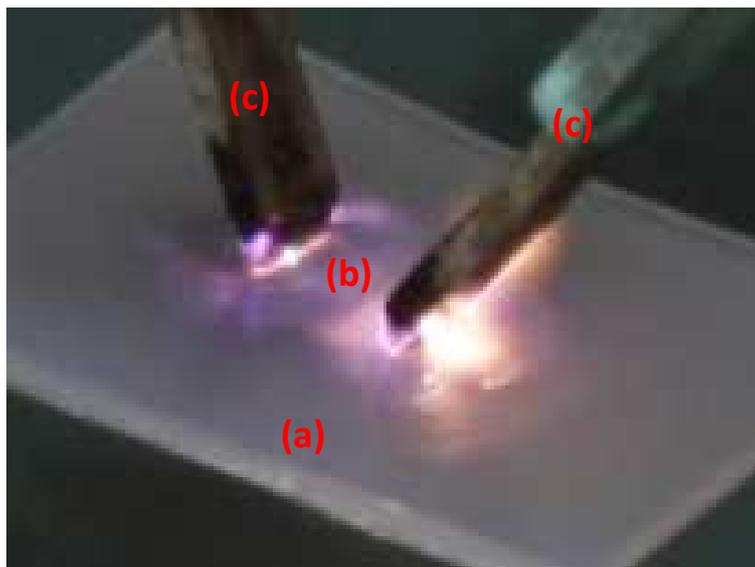


FIGURA 22 - CINTILAÇÃO SOBRE A AMOSTRA DURANTE A SECAGEM DE UMA GOTA. (a) AMOSTRA (b) DESCARGA SUPERFICIAL (c) ELETRODOS
FONTE: O autor (2014)

3.4 SISTEMA DE PROTEÇÃO SOBRECORRENTE

O sistema eletrônico de proteção sobrecorrente utilizado neste estudo constitui de um relé de sobrecorrente que realiza o monitoramento da corrente elétrica que flui através do circuito de ensaio, através de um resistor de 90Ω em série nesse circuito. O circuito lê o sinal da corrente que atravessa a amostra e compara com um valor de corrente pré-estabelecido. O relé de sobrecorrente atua quando este valor limite é alcançado, desligando o sistema. Pode-se observar o circuito eletrônico de proteção sobrecorrente na Figura 23. A corrente ficou limitada em aproximadamente 200 mA durante 2 segundos.

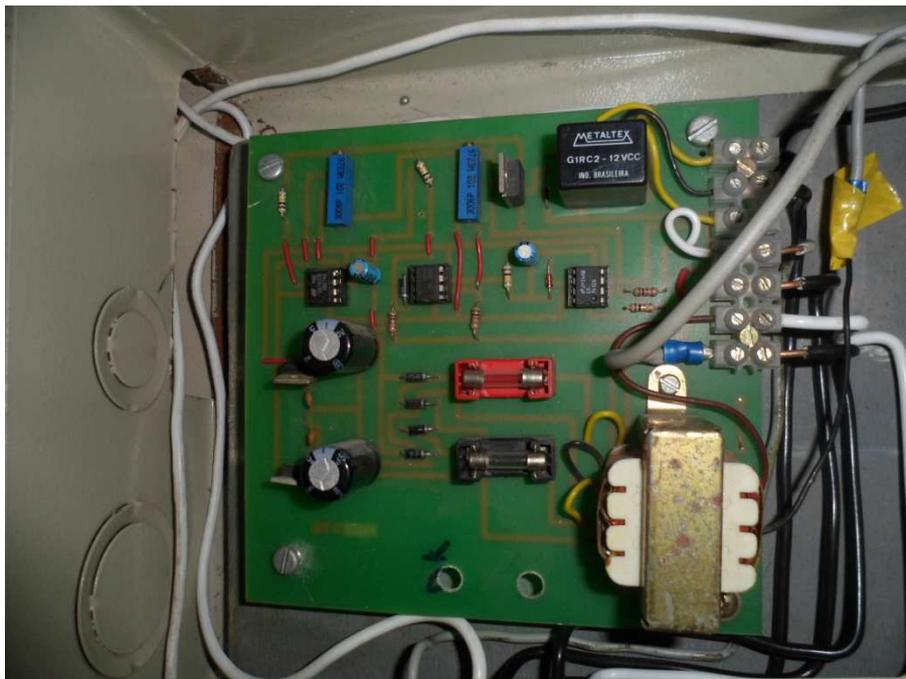


FIGURA 23 - SISTEMA DE PROTEÇÃO SOBRECORRENTE
 FONTE: O autor (2014)

3.5 SISTEMA DE PROTEÇÃO DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ)

Para proteção do sistema de aquisição, foi desenvolvida uma proteção eletrônica com acoplamento óptico, para que o sistema de aquisição esteja eletricamente separado do sistema experimental e protegido de qualquer surto de corrente ou tensão sobre a amostra. A instrumentação eletrônica é composta de dois sistemas eletrônicos. O primeiro circuito eletrônico (chamado de emissor) recebe o sinal analógico do experimento, transforma em sinal óptico e envia por fibra óptica para o circuito receptor. O segundo circuito eletrônico (chamado de receptor) recebe o sinal óptico e transforma novamente em sinal analógico e envia para a placa de aquisição da National Instruments USB-6259 com 16 entradas de 16 bits cada, com uma velocidade de 1,25 MS/s. Todo esse sistema deve atender aos seguintes requisitos de operação:

- Limites de amplitudes de sinal de entrada em ± 20 V;
- Frequência de operação mínima 60 Hz (frequência fundamental da rede de distribuição elétrica);

- Pontos de calibração, para compensar a atenuação do sinal da fibra óptica;
- Frequência de operação máxima 5 kHz (frequência suficiente para dar resolução aos transientes dos momentos das descargas superficiais);
- Limites de amplitudes de sinal de saída em ± 10 V (valores limites para entrada na placa de aquisição da National Instruments USB-6259).

Na Figura 24 pode-se observar o esquema da placa emissora do sinal luminoso, bem como a placa montada na fotografia da Figura 25. Os diodos D_1 e D_2 são diodos rápidos de proteção contra sobretensão na entrada do operacional LM 324; o primeiro estágio do operacional é um amplificador inversor com ganho $\frac{1}{2}$, com o objetivo de não saturar a entrada do segundo estágio de amplificação;

O segundo estágio do operacional é um amplificador inversor e somador, com ganho variável até 10. O objetivo desse estágio é de inserir um nível de tensão DC capaz de manter o LED na sua região linear de operação.

O terceiro estágio do operacional, juntamente com transistor BJT, é uma fonte de corrente para atender as elevadas intensidades de corrente exigidas pelo LED (SFH 756V), da ordem de 50 mA. Este valor de corrente está na região central de seu regime de funcionamento com resposta linear, região marcada com vermelho na Figura 26.

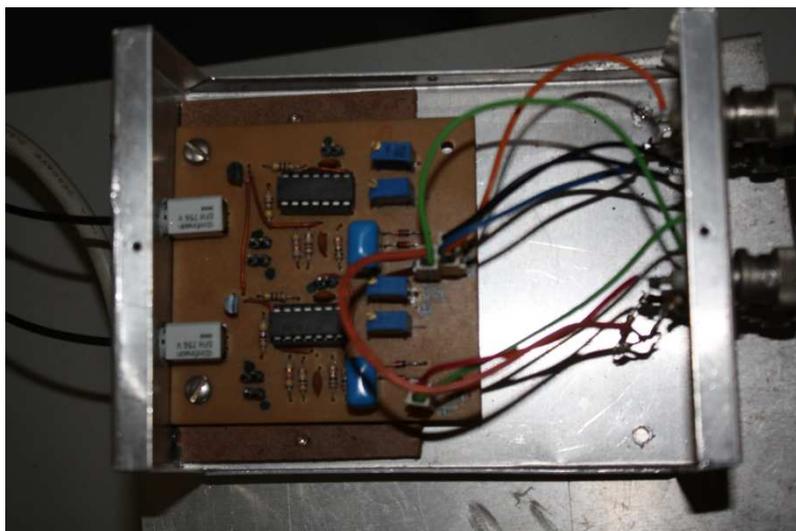


FIGURA 25 - FOTOGRAFIA DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA EMISSORA DO SINAL ÓPTICO

FONTE: O autor (2014)

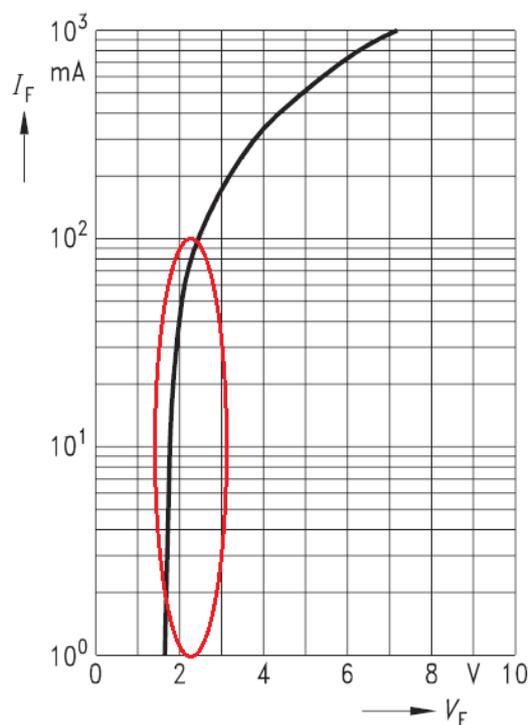


FIGURA 26 - RESPOSTA DA CORRENTE NO LED EM FUNÇÃO DA TENSÃO. O CÍRCULO EM VERMELHO INDICA A REGIÃO DE FUNCIONAMENTO, APROXIMADAMENTE LINEAR
FONTE: Data Sheet SFH 756V (2004)

Na Figura 27 pode-se observar o esquema da placa receptora do sinal óptico, e também a placa montada na fotografia da Figura 28. No esquemático, o fotodiodo (SFH 250V) recebe o sinal óptico pela fibra óptica e transforma em

signal elétrico. Ele trabalha como fonte de corrente que entra no primeiro estágio do operacional com ganho definido pela resistência R_1 de modo a não saturar o sinal para entrada no segundo estágio do operacional. O capacitor C_1 é um capacitor de desacoplamento, responsável por retirar o nível DC e o segundo estágio do operacional que ajusta o ganho do sinal para limitar a saída em ± 10 V, sem defasagem em relação ao sinal elétrico de entrada na primeira placa.

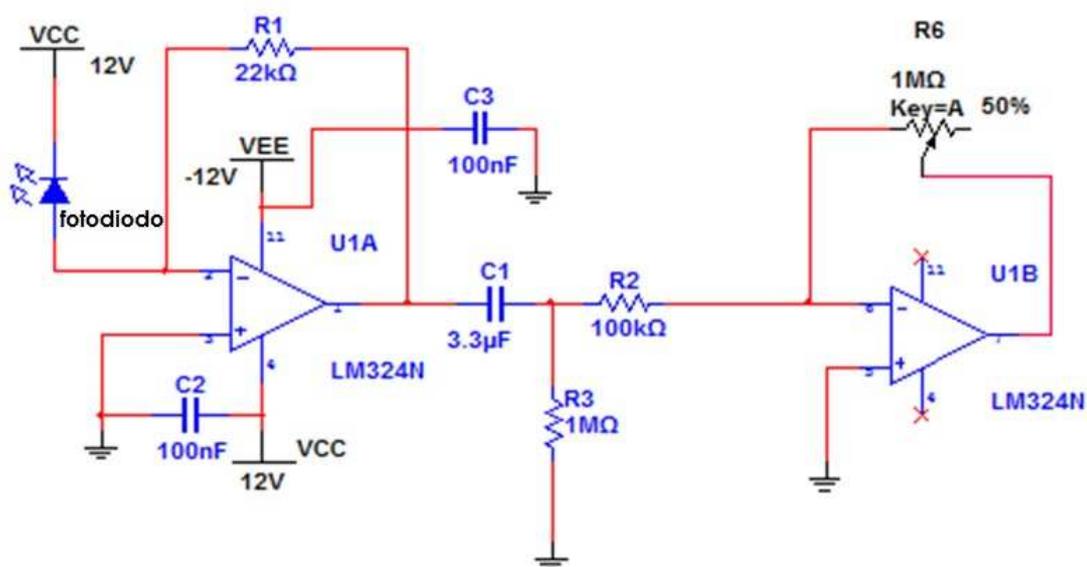


FIGURA 27 – ESQUEMA DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA RECEPTORA DO SINAL ÓPTICO

FONTE: O autor (2014)

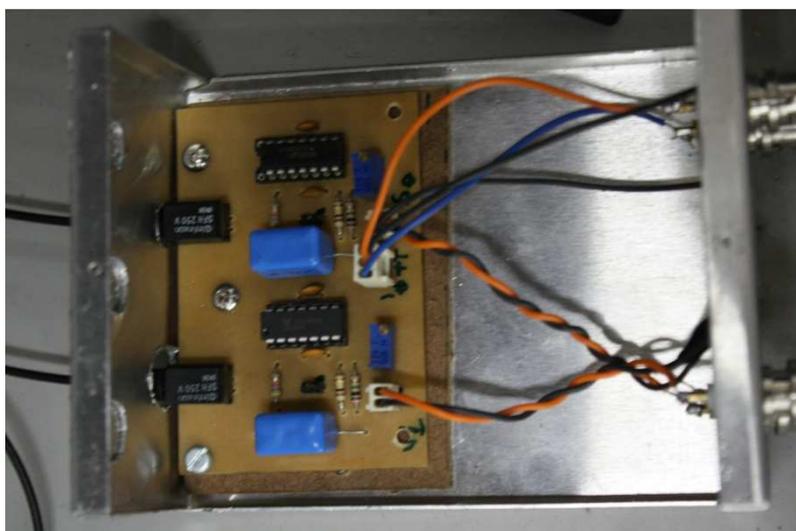


FIGURA 28 - FOTOGRAFIA DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA RECEPTORA DO SINAL ÓPTICO

FONTE: O autor (2014)

Pode-se observar na Figura 29 que a resposta típica da fotocorrente no fotodiodo receptor é uma resposta linear para diferentes temperaturas de operação, dentro da faixa de potência óptica que o LED (SFH 756V) emite o sinal óptico, garantindo que o sinal de entrada no sistema seja proporcional ao sinal de saída.

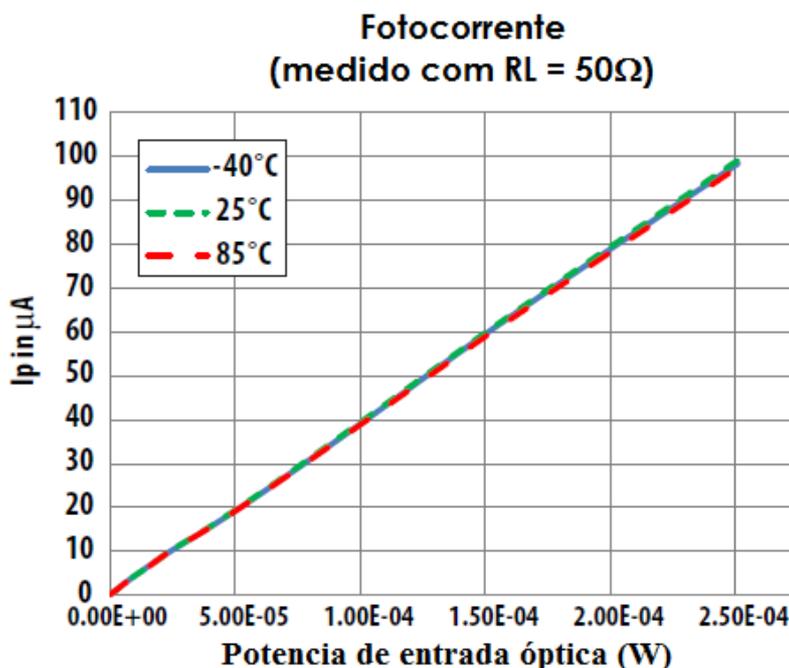


FIGURA 29 - RESPOSTA TÍPICA DA FOTOCORRENTE NO FOTODIODO RECEPTOR
FONTE: Data Sheet SFH 250V (2004)

3.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

O sistema de aquisição de dados utiliza um *software* desenvolvido em *Labview*^(R) e uma placa de aquisição da *National Instrumens* USB-6259 de 1,25 MS/s (fotografia visualizada na Figura 30). A velocidade de aquisição de dados foi otimizada para 500 registros por ciclo da rede elétrica de 60 Hz, com um total de 30.000 registros por segundo. Pode-se observar na Figura 31 a configuração destes registros. O valor de 500 registros por ciclo é suficiente para dar resolução as descargas na superfície das amostras. Além disso é

possível mostrar eventos com um mínimo de perda de informações, que ocorrem abaixo de 15 kHz, de acordo com o teorema de Nyquist.

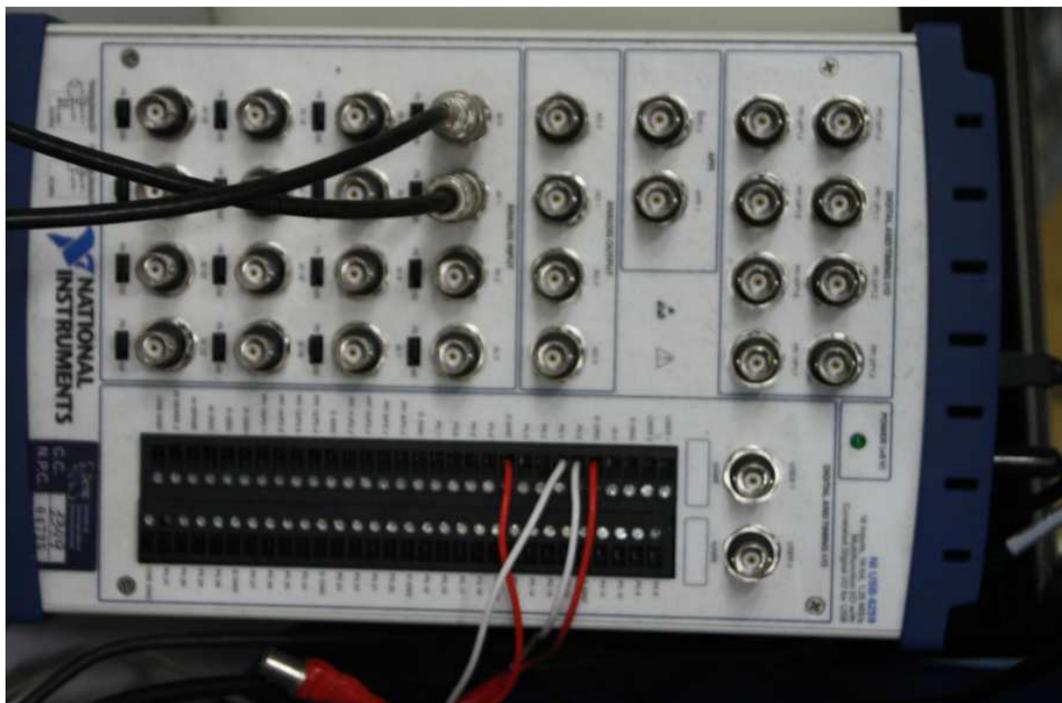


FIGURA 30 - PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA NATIONAL INSTRUMENTS - USB-6259
FONTE: O autor (2014)

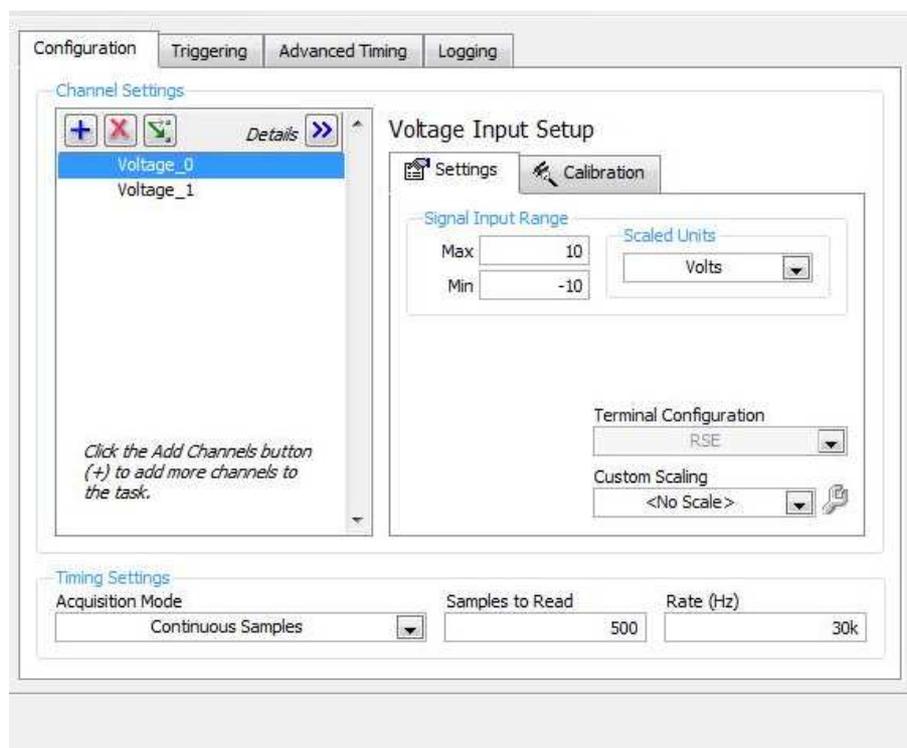


FIGURA 31 - CONFIGURAÇÕES DO REGISTRO DO DAQ
FONTE: O autor (2014)

O *software* de aquisição de dados em *Labview*^(R), observado na Figura 32 pode realizar a coleta de dados durante períodos variáveis de tempo, bastando alterar o parâmetro de controle de tempo do *loop*.

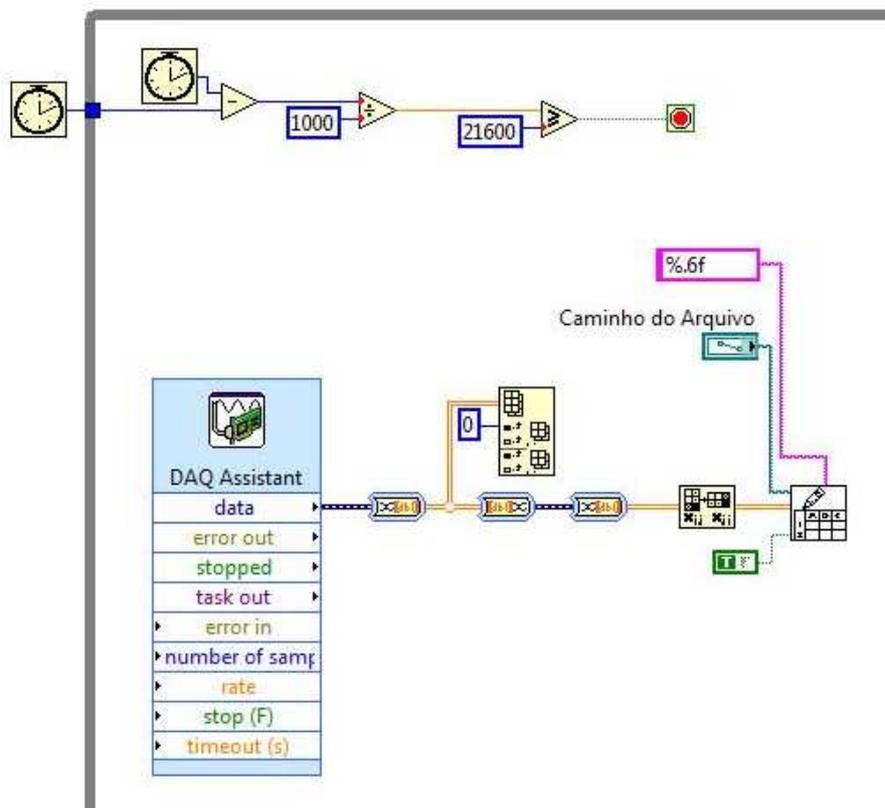


FIGURA 32 - SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM *LABVIEW*^(R)
 FONTE: O autor (2014)

Nos estudos normalmente esse tempo foi fixado em até 6 horas para que houvesse tempo suficiente para as amostras apresentarem as fases do trilhamento, gerando um arquivo de saída em formato de texto (*.txt) com duas colunas de dados (Tensão e Corrente) com até 12,0GB de dados, ou seja aproximadamente 0,7 bilhões de linhas com duas colunas. Esses dados foram tratados em *C ANSI* para separação das fases de evaporação do eletrólito (Figura 33 a, b e c), fase de descarga superficial, onde ocorre a degradação da superfície do material (Figura 34 a, b e c) e, por fim, a fase seca (figura 35 a, b e c).

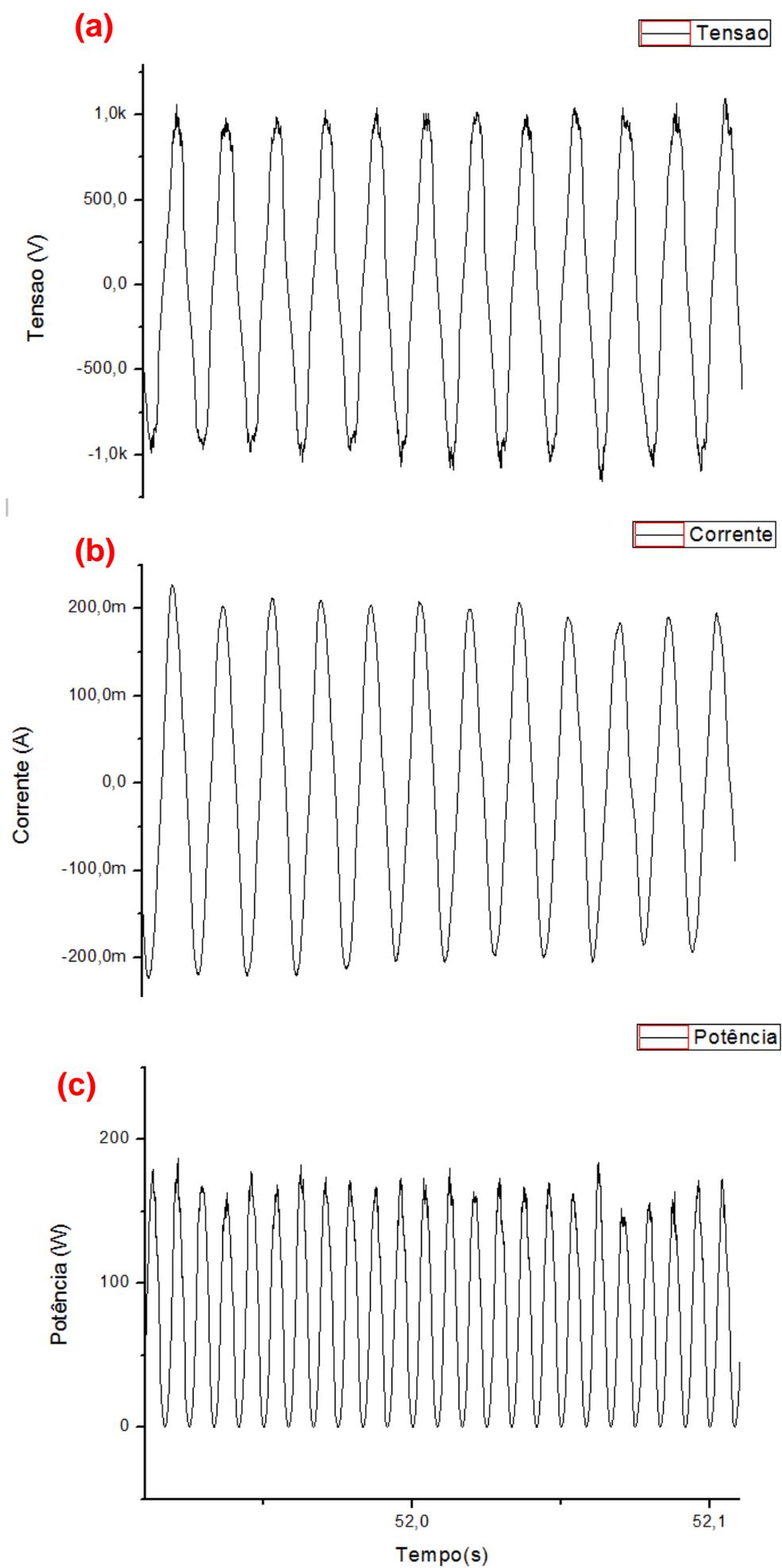


FIGURA 33 - (A) TENSÃO (B) CORRENTE (C) POTÊNCIA SOBRE A AMOSTRA DURANTE A EVAPORAÇÃO DO ELETRÓLITO
FONTE: O autor (2014)

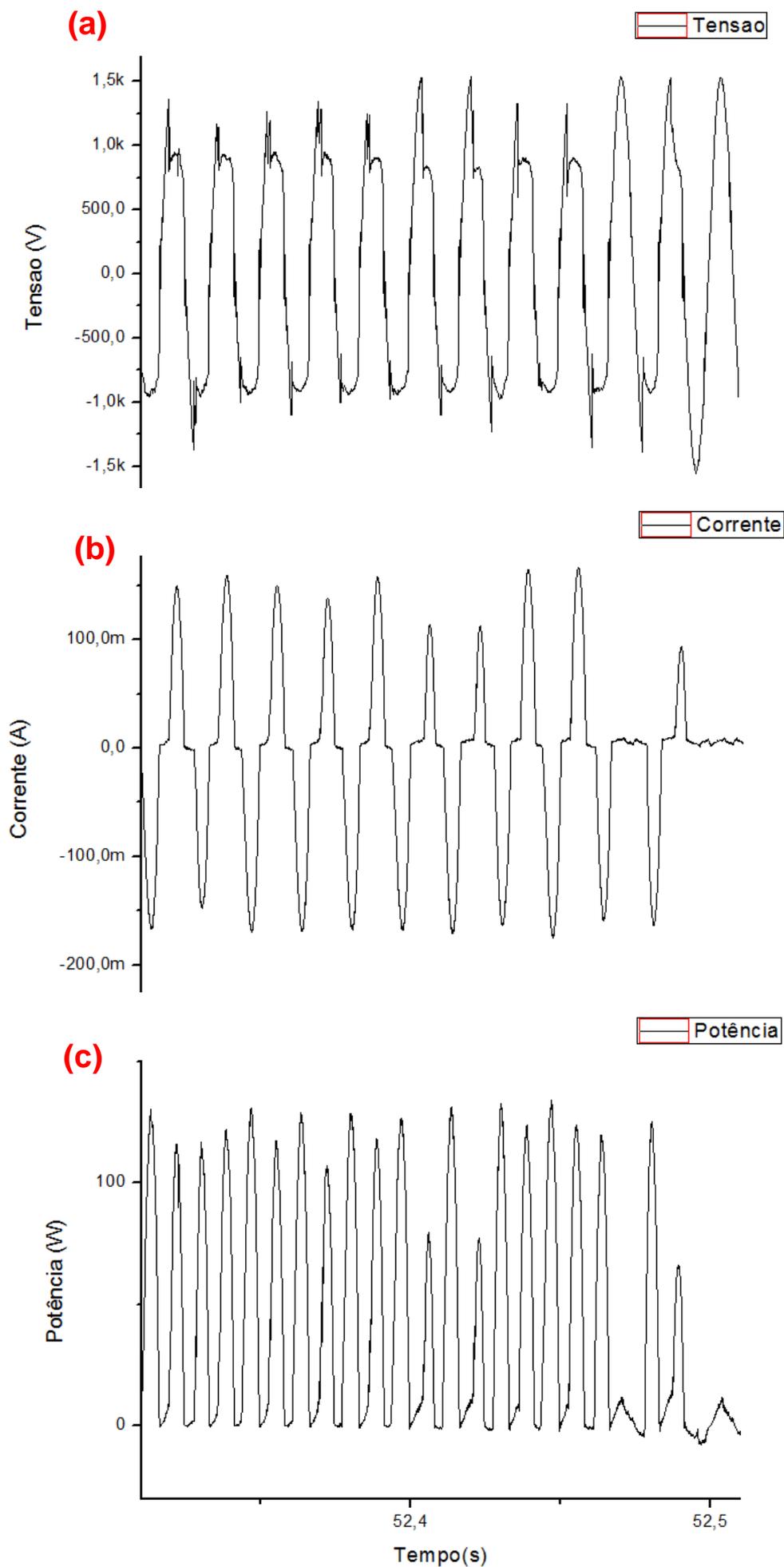


FIGURA 34 - (A) TENSÃO (B) CORRENTE (C) POTÊNCIA SOBRE A AMOSTRA DURANTE AS DESCARGAS SUPERFICIAIS
FONTE: O autor (2014)

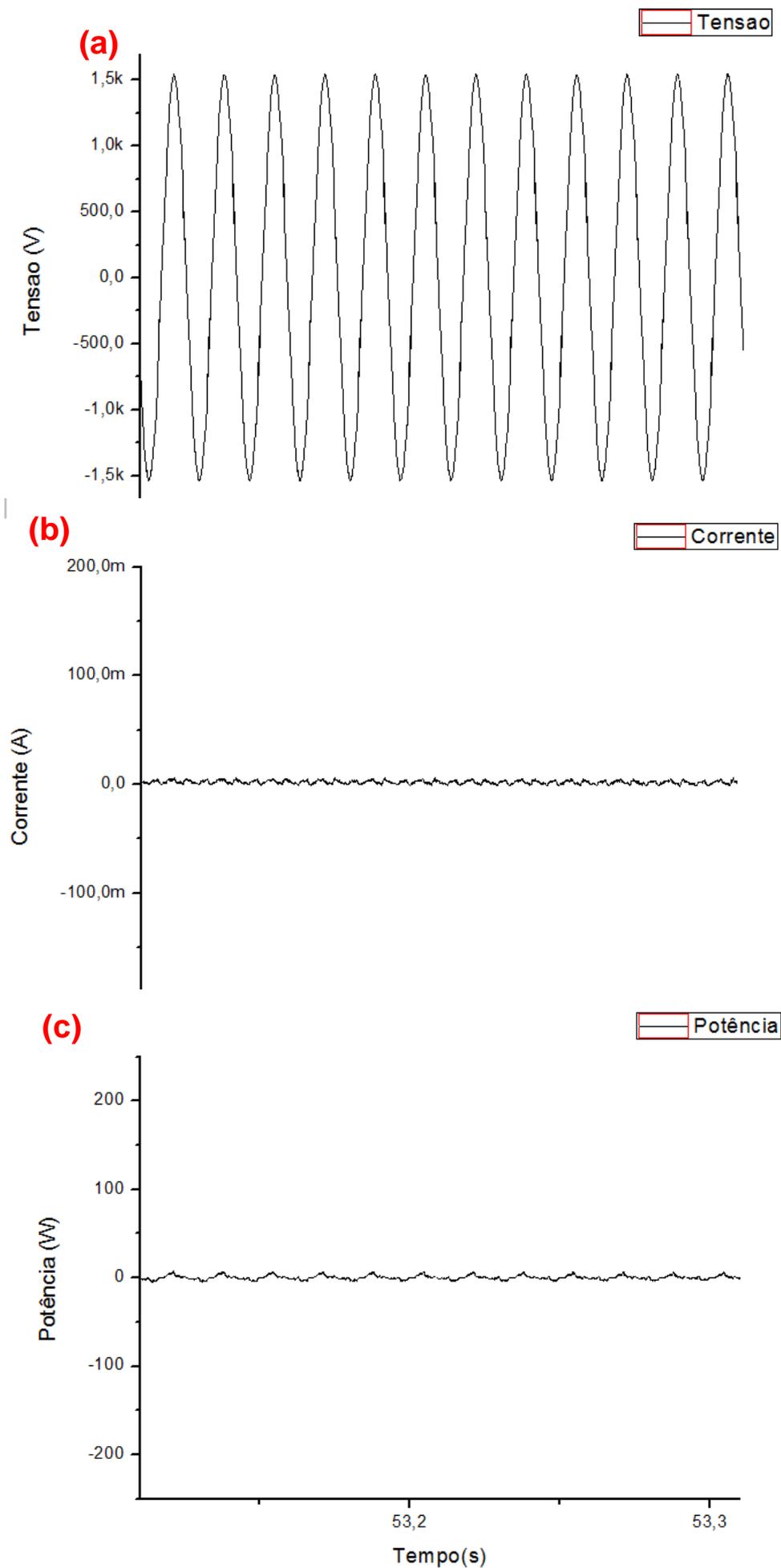


FIGURA 35 - (A) TENSÃO (B) CORRENTE (C) POTÊNCIA SOBRE A AMOSTRA DURANTE A FASE SECA
FONTE: O autor (2014)

As informações contidas na figura 33 *a*, *b* e *c* não são de interesse para a análise da energia absorvida pela amostra e sua consequente degradação, pois nessa fase toda a energia consumida é utilizada para evaporação do eletrólito, portanto não há degradação superficial por trilhamento elétrico.

Os dados observados na Figura 34 *a*, *b* e *c* ilustram as formas de onda dos eventos *c*, *d* e *e* no modelo de Malik (MALIK, 1998), estes são os dados de interesse para a análise da energia absorvida pela amostra e sua consequente degradação. Espera-se que a variação na intensidade da potência dissipada distinga os eventos *c*, *d* e *e*, mesmo sendo similares as formas de onda dessas fases.

Os dados que são vistos na figura 35 *a*, *b* e *c* não são de interesse para a análise da energia absorvida pela amostra e sua consequente degradação, pois nessa fase a corrente sobre a amostra é desprezível, portanto não há degradação superficial.

3.7 TRATAMENTO DOS DADOS

Para a realização do tratamento dos dados foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia de separação dos dados de interesse. Os dados de interesse para o estudo são aqueles contidos na figura 34 *a* e *b*, todos os outros dados devem ser descartados, pois a energia consumida nas outras etapas do processo não correspondem a energia absorvida pela amostra durante as descargas superficiais e sua consequente degradação por trilhamento elétrico. Como as descargas sobre a amostra geram no sinal da tensão uma perturbação na sua forma de onda, utilizamos como índice de separação dos dados o fator de forma da onda senoidal da tensão aplicada sobre a amostra, método que se mostrou muito eficiente para as amostras poliméricas em questão.

O fator de forma (K) de um sinal é definido pela equação (1) a seguir

$$K = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{2\pi} v(t)^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_0^{\pi} v(t) dt} \quad (1)$$

Onde $v(t)$ é a função de onda, T é o período da onda, 2π um ciclo completo e π meio ciclo. No caso específico onde o sinal é senoidal o fator de forma é observado abaixo, equação (2):

$$K_{sen} = \frac{V_{rms}}{V_{med,\pi}} = \frac{\frac{V_p}{\sqrt{2}}}{\frac{2V_p}{\pi}} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11 \quad (2)$$

Onde V_{rms} é o valor eficaz da tensão e $V_{med,\pi}$ o valor médio da tensão em meio ciclo e V_p tensão de pico. Para este estudo obteve-se valores discretos para tensão com uma alta taxa de amostragem, foi determinado o fator de forma discretizado (K_{dis}) pela equação (3):

$$K_{dis} = \frac{\sqrt{\frac{1}{500} \sum_0^{500} v_i^2}}{\frac{1}{500} \sum_0^{500} \sqrt{v_i^2}} \quad (3)$$

Valor em acordo, com o fator de forma em uma onda senoidal contínua, portanto aplicável em nosso estudo. A equação (3) é a mesma equação (1) porém discretizada, pois os dados coletados não eram contínuos. O valor 500 representa um ciclo completo e v_i é a tensão obtida em cada instantâneo da coleta de dados. Desta forma pode-se calcular o fator de forma em um ciclo completo para a tensão eficaz e para o valor médio da tensão, pois para que o denominador ($V_{med,2\pi}$) não seja zero em um ciclo completo para uma onda senoidal, utilizou-se o módulo do sinal de tensão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VALIDAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRO/ÓPTICA DE PROTEÇÃO E TRANSDUÇÃO

A validação da instrumentação eletro/óptica de proteção é de fundamental importância para os resultados, pois foi com essa instrumentação que a transdução das informações referentes a tensão e corrente sobre a amostra durante as descargas superficiais foram transmitidas para o sistema de aquisição de dados. Um exemplo dessa transdução pode ser observado nas Figuras 36 e 37.

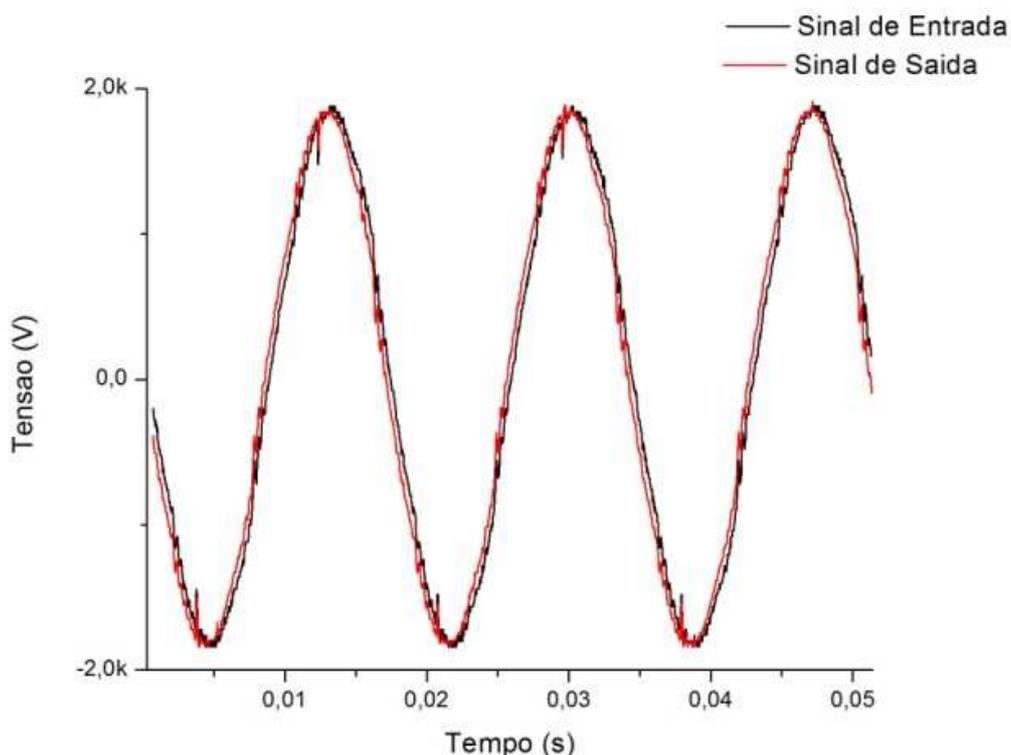


Figura 36 - SINAIS DE ENTRADA E SAIDA DE TENSÃO SOBRE A INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA EM UM INSTANTE DE DESCARGA SUPERFICIAL
FONTE: O autor (2014)

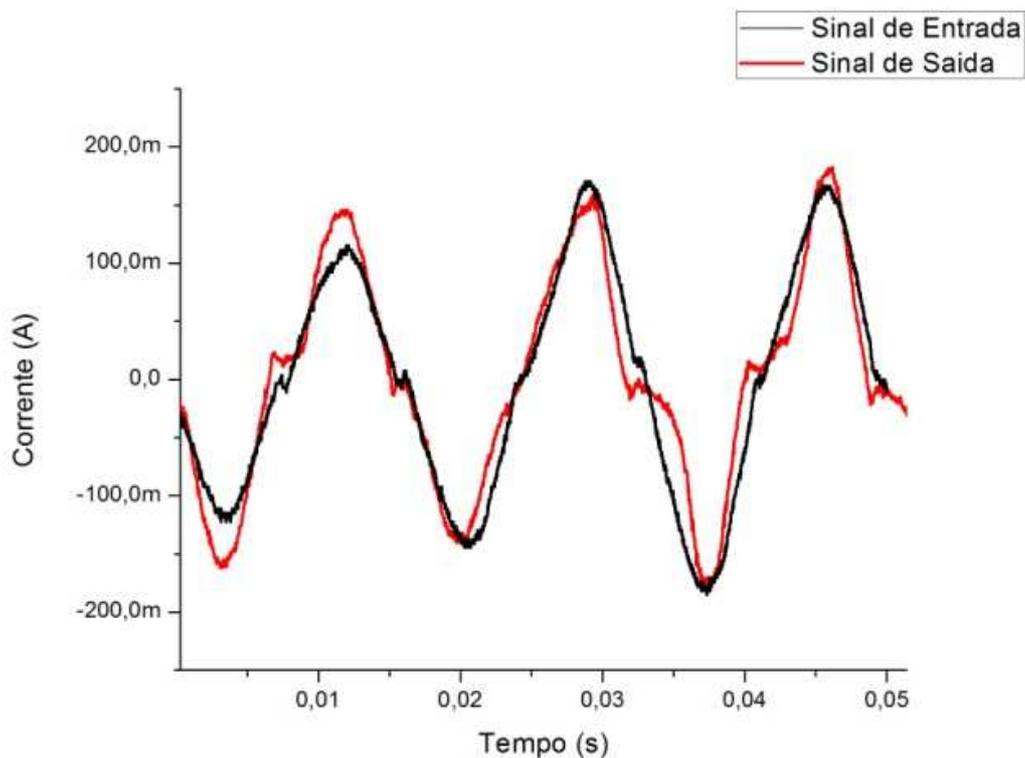


Figura 37 - SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA DE CORRENTE SOBRE A INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA EM UM INSTANTE DE DESCARGA SUPERFICIAL
 FONTE: O autor (2014)

Na Figura 36 a tensão de entrada no sistema foi adquirida por um osciloscópio marca Tektronix TDS 224, com profundidade de memória para 2048 pontos no intervalo de tempo de aquisição. Este sinal tem a mesma forma instantaneamente que o sinal da tensão de saída do sistema eletro/óptico, tornando a separação dos dados de interesse pelo fator de forma do sinal de tensão possível.

Na Figura 37 a corrente de entrada no sistema também foi adquirida pelo mesmo osciloscópio descrito no parágrafo anterior. Este sinal é muito similar ao sinal da corrente de saída do sistema eletro/óptico. Embora esses valores não sejam exatamente iguais instantaneamente, os valores médios desses sinais de entrada e saída são muito próximos, entrada de 75,2 mA e saída de 74,7 mA. Esses resultados tornam o valor médio da potência dissipada, calculada por meio do sinal de tensão e corrente de saída, confiável.

Outro parâmetro a ser avaliado é a resposta em frequência do sistema eletro/óptico, que exibe uma banda de resposta entre 60 Hz e 150 kHz que pode ser observado na FIGURA 38.

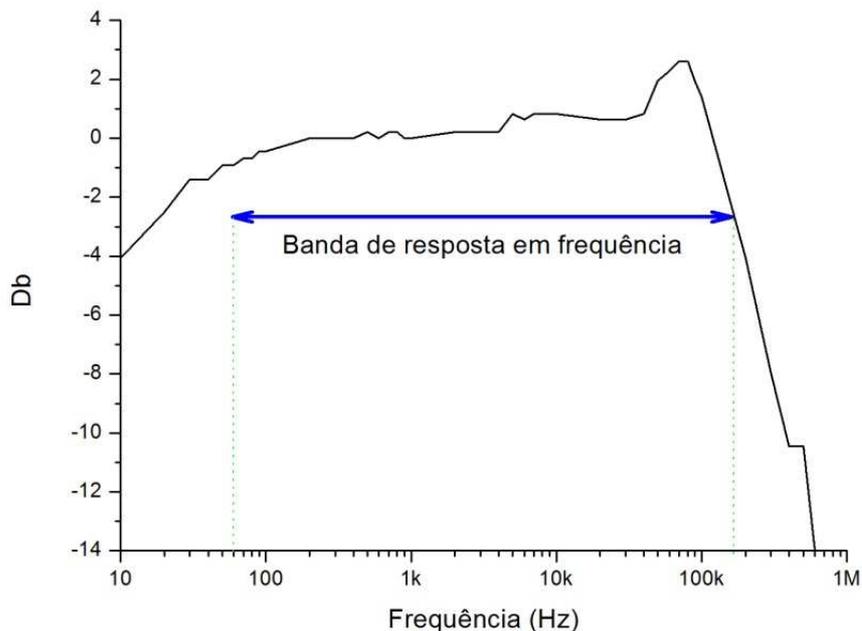


FIGURA 38 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO E TRANSDUÇÃO ELETRO/ÓPTICO
 FONTE: O autor (2014)

Essa banda de frequência engloba a grande maioria do espectro do sinal de entrada que a corrente apresenta. Esse espectro pode ser observado na Figura 40, transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transformer - FFT), realizada sobre o sinal de corrente na entrada do sistema eletro/óptico (FIGURA 39).

Com esses resultados observa-se que a maior parte do espectro de frequência do sinal de corrente na estrada do sistema eletro/óptico, está na faixa de 60 Hz, valor esperado, já que a frequência da rede elétrica possui este valor de operação. Também observa-se uma concentração em frequências na ordem de 180 Hz, muito provavelmente correspondente ao terceiro harmônico da rede e picos com menores amplitudes até 1 kHz, valores dentro da banda de resposta do sistema de proteção e transdução eletro/óptico.

Desta forma verifica-se que o sistema de proteção e transdução eletro/óptico é eficiente para obter os sinais de tensão e corrente durante as descargas superficiais e com isso obter o valor de energia absorvida pela amostra durante as descargas superficiais.

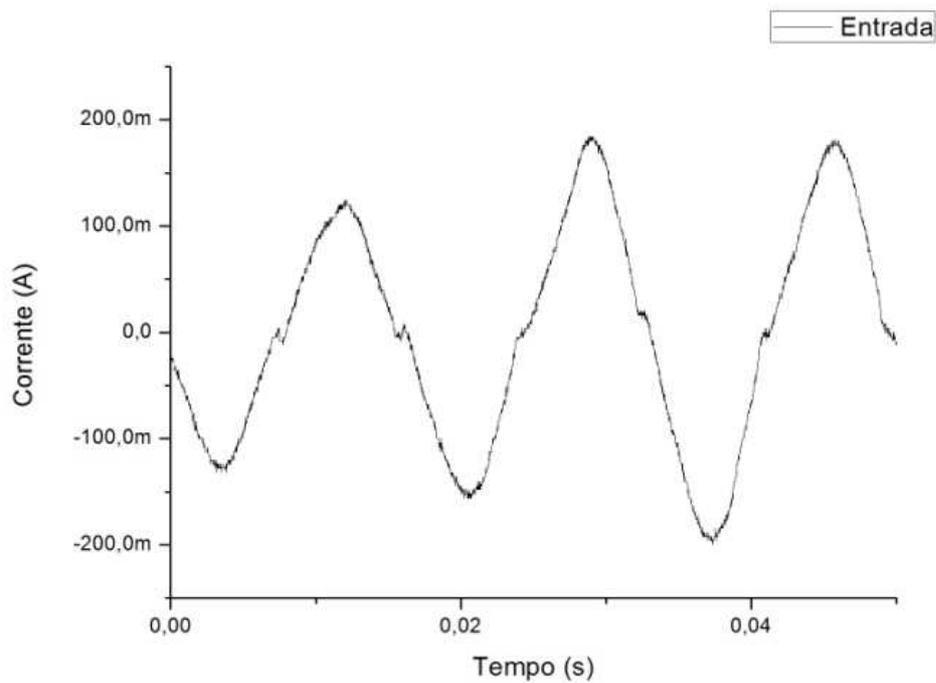


FIGURA 39 - SINAL DE CORRENTE NA ENTRADA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO ELETRO/ÓPTICO
 FONTE: O autor (2014)

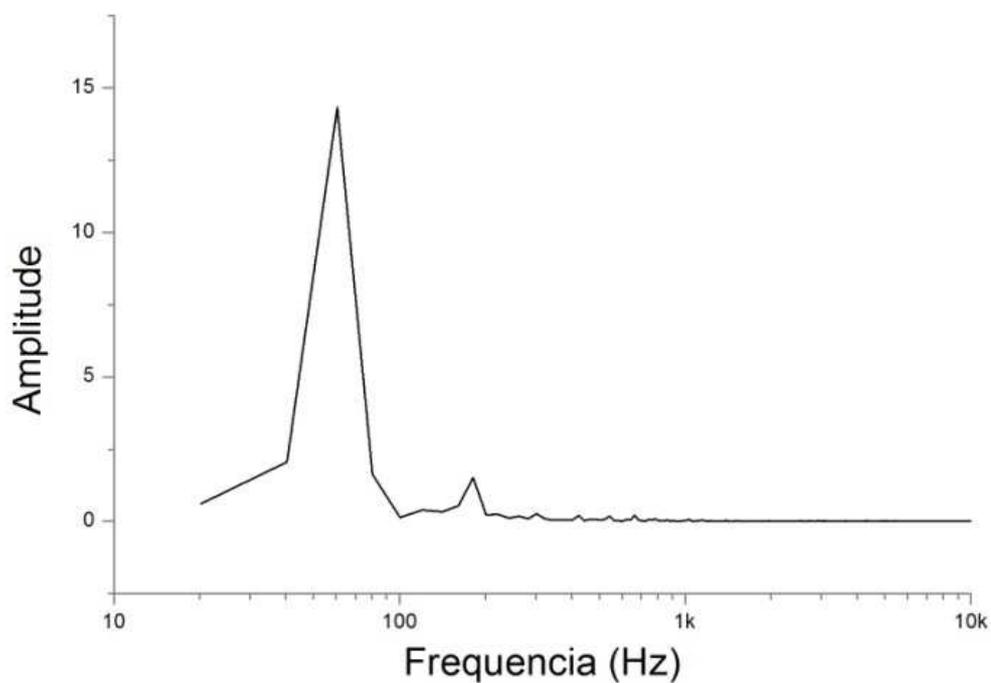


Figura 40 - TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT) SOBRE O SINAL DE CORRENTE NA ENTRADA DO SISTEMA ELETRO/ÓPTICO
 FONTE: O autor (2014)

4.2 SEPARAÇÃO DAS FASES DO TRILHAMENTO ELÉTRICO

O trilhamento elétrico tem seu início nas descargas superficiais que a amostra é submetida durante o ensaio aplicado neste estudo. Essas descargas na superfície da amostra ocorrem em curtos intervalos de tempo, o momento da descarga superficial ocorre quando a gota do eletrólito está no fim de sua evaporação apresentando como consequência na superfície da amostra zonas secas e úmidas. Estas descargas na superfície da amostra geram altas temperaturas que causam a degradação localizada da superfície do material, essa degradação evolui com o passar do tempo de ensaio. A superfície do material estará trilhada, quando a superfície da amostra apresentar trilhas carbonizadas visíveis sem equipamentos ópticos ou eletrônicos para ampliação.

As medidas de tensão e corrente nesse trabalho podem gerar arquivos de dados de aproximadamente 1 bilhão de linhas com duas colunas, essa quantidade de dados é necessária para que a perda de informações referentes as descargas superficiais, que ocorrem rapidamente, seja a menor possível. Essa quantidade de informações obtidas tornam a tarefa computacional e de visualização dos dados quase impossível para computadores pessoais, bem como a interpretação desses valores de tensão e corrente. Para reduzir a quantidade de informações e tornar a interpretação dos dados possível, faz-se necessário separar os dados de interesse, que são aqueles observados nas figuras 34 (a) e (b) do restante dos dados.

Para realizar essa separação de dados, utilizou-se como parâmetro o fator de forma da tensão aplicada sobre a amostra, já que este sinal exibe uma alteração considerável, quando as descargas na superfície da amostra ocorrem. Para isto desenvolveu-se um *software* especial em C *ANSI* que realiza os seguintes passos lógicos, observados na Figura 41.

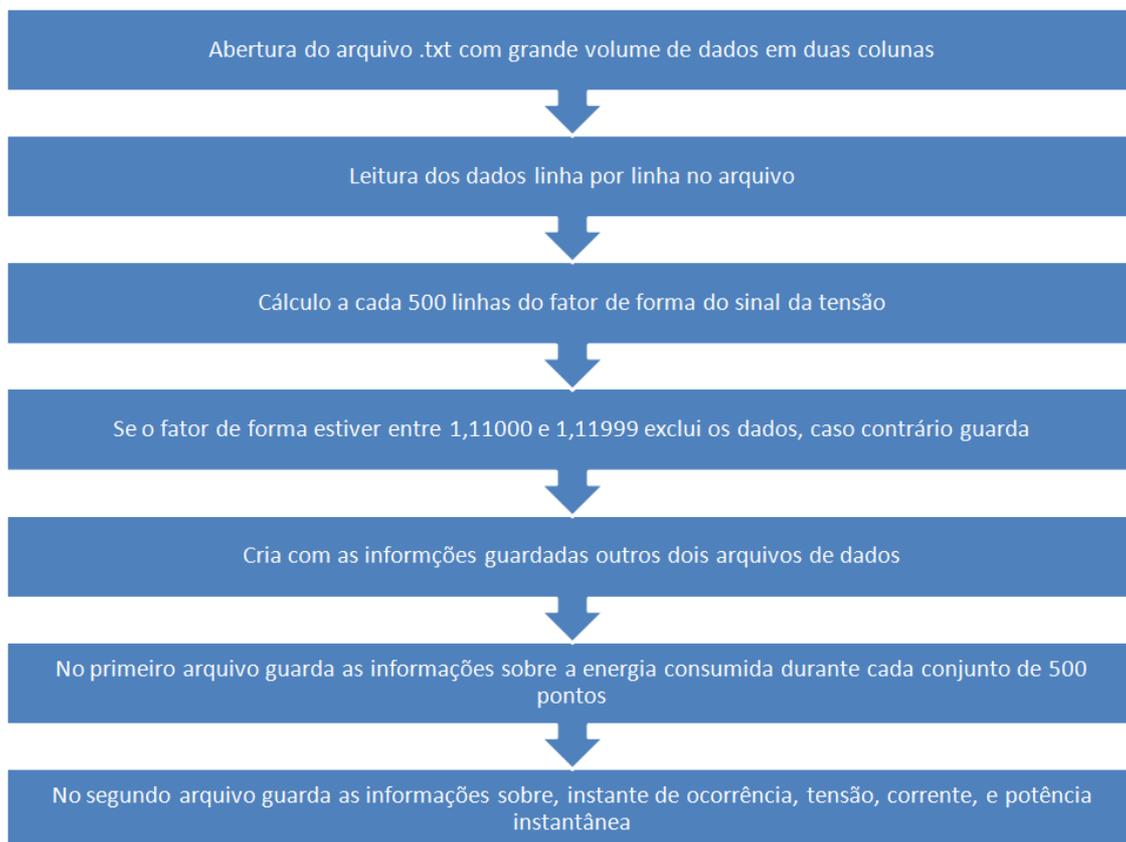


FIGURA 41 - PASSOS LÓGICOS DO SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA SEPARAÇÃO DOS DADOS DURANTE O ENSAIO DE TRILHAMENTO ELÉTRICO
FONTE: O autor (2014)

Este método mostrou-se eficiente para separação dos sinais de interesse nesse estudo. Na Figura 42 observa-se os pontos em vermelho que são os sinais de tensão com fator de forma entre 1,11000 e 1,11999. As informações nesses instantes devem ser descartadas da análise da energia absorvida pela amostra. Essas informações são referentes a energia consumida nos instantes onde ocorre a evaporação do eletrólito, ou nos instantes que não há consumo de energia pelo fato da superfície da amostra estar seca e, conseqüentemente, haver uma corrente desprezível entre os eletrodos.

Os pontos em preto na Figura 42 são os sinais de tensão com fator de forma que ficaram fora do intervalo entre 1,11000 e 1,11999, informações que interessam para a análise da energia absorvida pela amostra durante a degradação de sua superfície por trilhamento elétrico. São nesses instantes que a superfície do material fica exposta às descargas superficiais, causando

sua degradação e posterior formação de caminhos condutores permanentes, as chamadas trilhas.

Pode-se observar na Figura 42 que, durante o ensaio, existem muito mais instantes em que a superfície da amostra não está submetida às descargas superficiais e por consequência sua superfície não está degradando (pontos vermelhos) em comparação com os instantes em que a superfície da amostra está submetida às descargas superficiais e a consequente evolução do trilhamento elétrico está ocorrendo (pontos pretos). Portanto a separação desses dados reduz drasticamente a quantidade de informações tornando possível a interpretação e visualização do sinal de tensão e corrente sobre a amostra nos instantes que ocorrem as descargas superficiais.

Essa separação nos dados é o que torna possível o cálculo da energia absorvida pela amostra, durante os instantes que a amostra está sendo degradada pelas descargas superficiais e está evoluindo para apresentar trilhamento elétrico.

Para a exibição desses resultados utilizou-se uma amostra de LLDPE e no início do ensaio fez-se a coleta dos dados do fator de forma, para exibir a qualidade na separação dos dados. O intervalo entre 55,5 s e 57,5 s foi tomado de forma arbitrária, pois a intenção desta coleta de dados foi exibir a variação do fator de forma para os momentos anteriores às descargas superficiais (pontos vermelhos antes dos pontos pretos), as próprias descargas superficiais (os pontos pretos) e o momento posterior às descargas superficiais (pontos vermelhos após os pontos pretos).

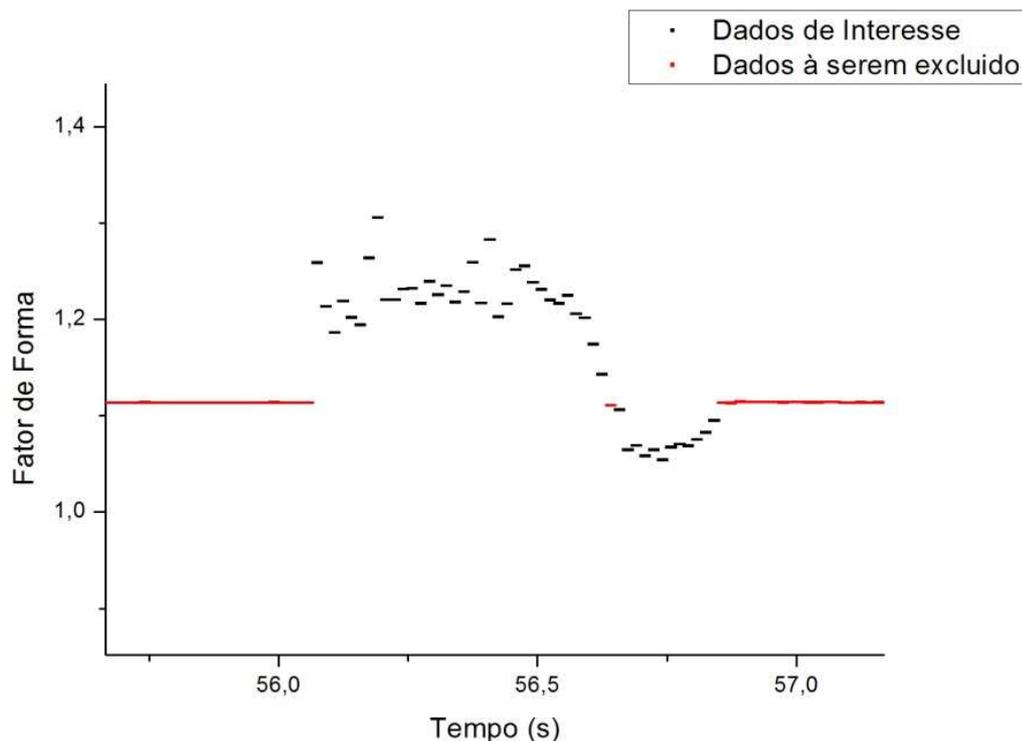


FIGURA 42 - FATOR DE FORMA PARA ALGUMAS FORMAS DE ONDA DURANTE O ENSAIO
 FONTE: O autor (2014)

Pode-se observar alguns instantâneos do sinal de tensão na FIGURA 43. Este sinal exibe a tensão durante o início do ensaio, onde não há contaminação da superfície da amostra pelo eletrólito e conseqüentemente esse sinal se mantém senoidal durante todo momento (apresentando um fator de forma igual a 1,11013). Estas informações devem ser desconsideradas para análise da energia absorvida pela amostra. A Figura 44 exibe o sinal da tensão nos instantes iniciais de evaporação do contaminante, sem a formação das bandas secas e úmidas, desta forma esse sinal também se mantém senoidal durante todos esses instantes apresentando um fator de forma igual a 1,11889. Ainda, neste momento, as informações devem ser desconsideradas para análise da energia absorvida pela amostra. Na Figura 45 tem-se o sinal da tensão durante as descargas na superfície da amostra. Neste momento, há a formação das bandas secas e úmidas e, neste caso, o sinal deixa de ser senoidal apresentando um fator de forma igual a 1,18884. Estes dados fornecem informações sobre a energia absorvida pela amostra durante as descargas superficiais que são responsáveis pela formação dos caminhos

condutores por trilhamento elétrico. Por fim na Figura 46 o sinal de tensão quando o eletrólito evaporou totalmente volta ficar senoidal apresentando um fator de forma igual a 1,11196, estas informações também são desconsideradas para análise da energia absorvida pela amostra e a partir desse momento todo o ciclo se repete, iniciando com a contaminação, passando pela evaporação, descarga superficial e acabando na secagem completa da superfície, até que a amostra sofra falha por trilhamento elétrico.

Durante a maior parte do tempo de ensaio, a amostra fica sujeita às tensões senoidais que são desprezadas no cálculo da energia absorvida responsável pela degradação de sua superfície.

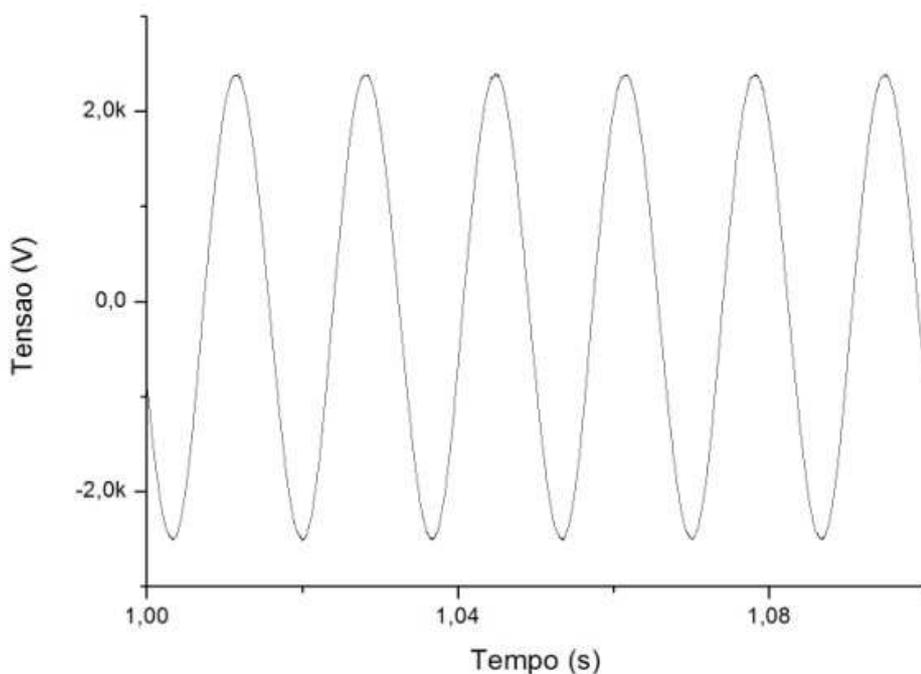


FIGURA 43 - INICIO DO ENSAIO, TENSÃO MÁXIMA, SEM DEFORMAÇÃO NA FORMA DE ONDA – FATOR DE FORMA DE 1,11013
FONTE: O autor (2014)

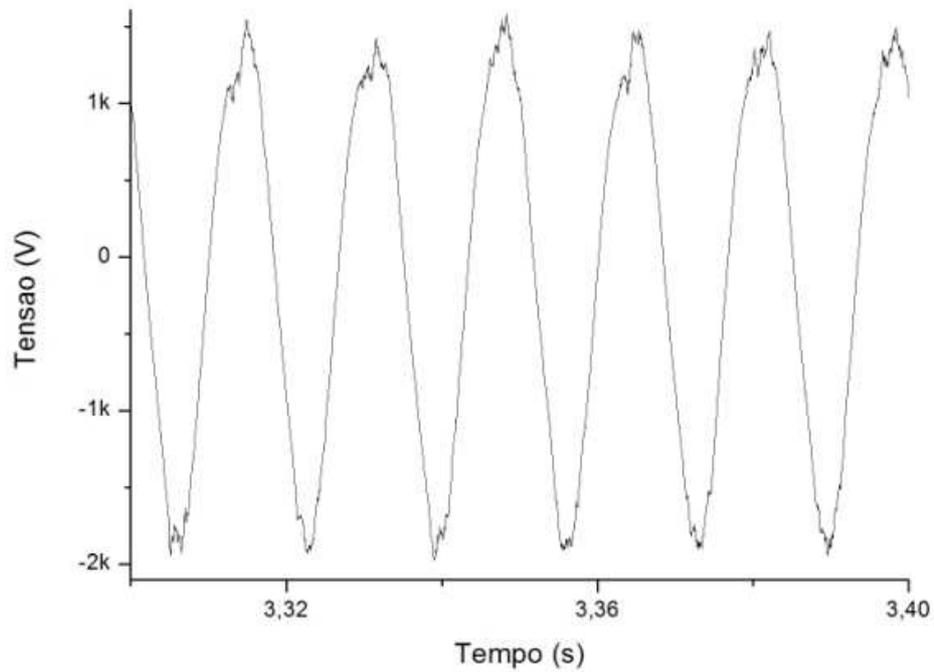


Figura 44 - QUEDA DO CONTAMINANTE, TENSÃO SOFRE UMA QUEDA, POUCA DEFORMAÇÃO NA FORMA DE ONDA - FATOR DE FORMA DE 1,11889
 FONTE: O autor (2014)

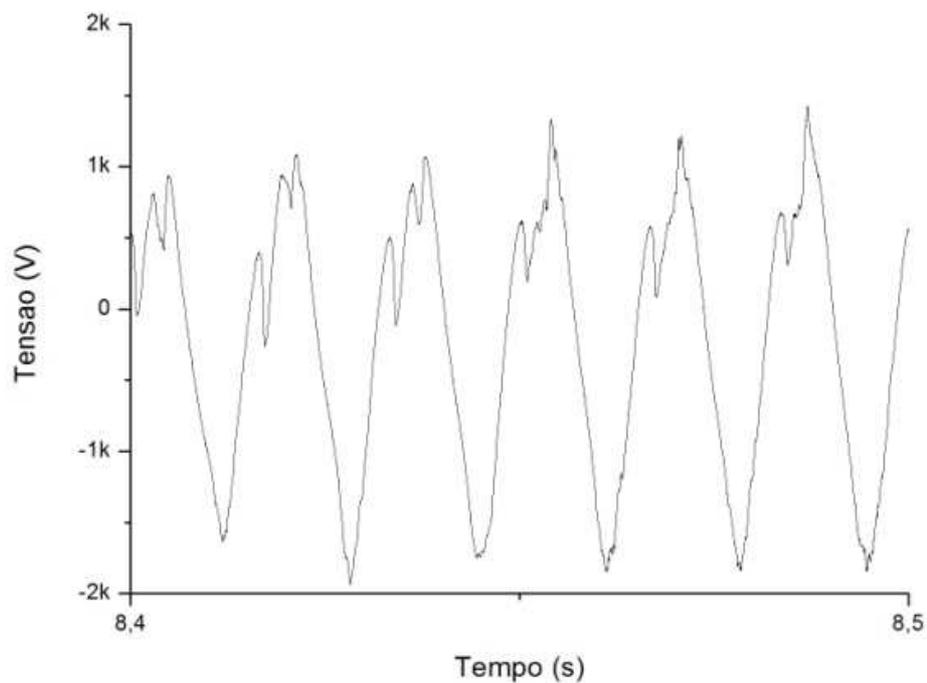


Figura 45 - FORMAÇÃO DAS BANDAS SECAS E ÚMIDAS, GRANDE DEFORMAÇÃO NA FORMA DE ONDA - FATOR DE FORMA DE 1,18884
 FONTE: O autor (2014)

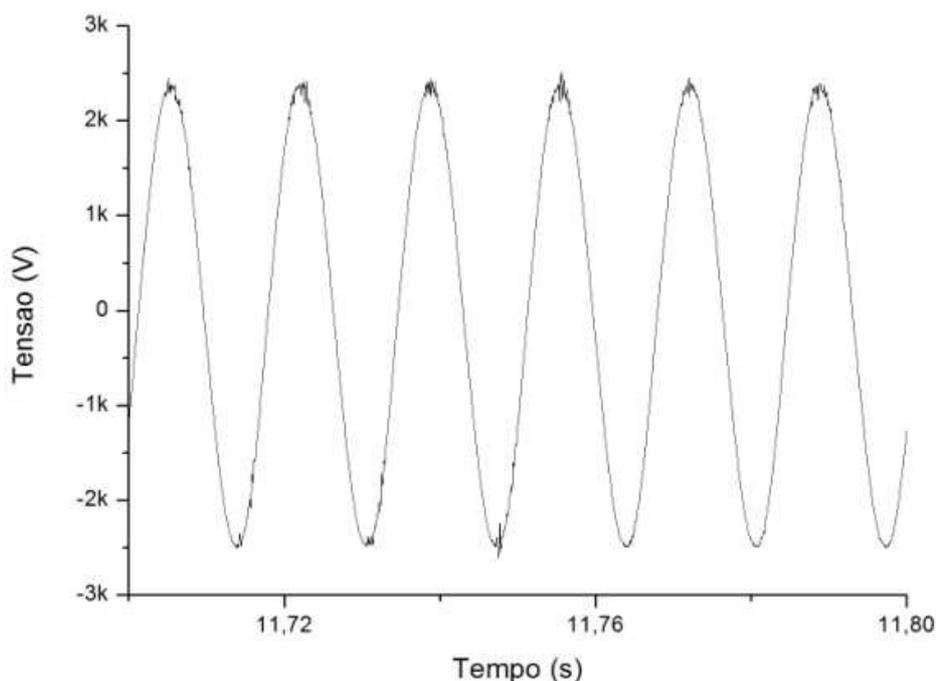


Figura 46 - SECAGEM TOTAL DA GOTA, POUCA DEFORMAÇÃO NA FORMA DE ONDA - FATOR DE FORMA DE 1,11196
FONTE: O autor (2014)

Na Figura 47 tem-se uma outra amostra de tensão que evidencia a separação de dados em um instantante de tempo que ocorrem descargas superficiais. Esses dados foram coletados a partir de uma amostra aleatória de compósito polimérico, esses dados foram retirados com o auxilio do *software* desenvolvido para separação dos dados. O resultado para a tensão (normalizada) apresentou um fator de forma de 1,067411 e na Figura 48 observa-se a forma de onda da corrente (normalizada) nesse mesmo instante. Essa onda possui a forma típica do sinal gerado para a corrente durante as descargas superficiais. Este resultado indica que o método de separação dos dados é eficiente para encontrar o sinal de tensão e corrente nos instantes que ocorrem as descargas superficiais.

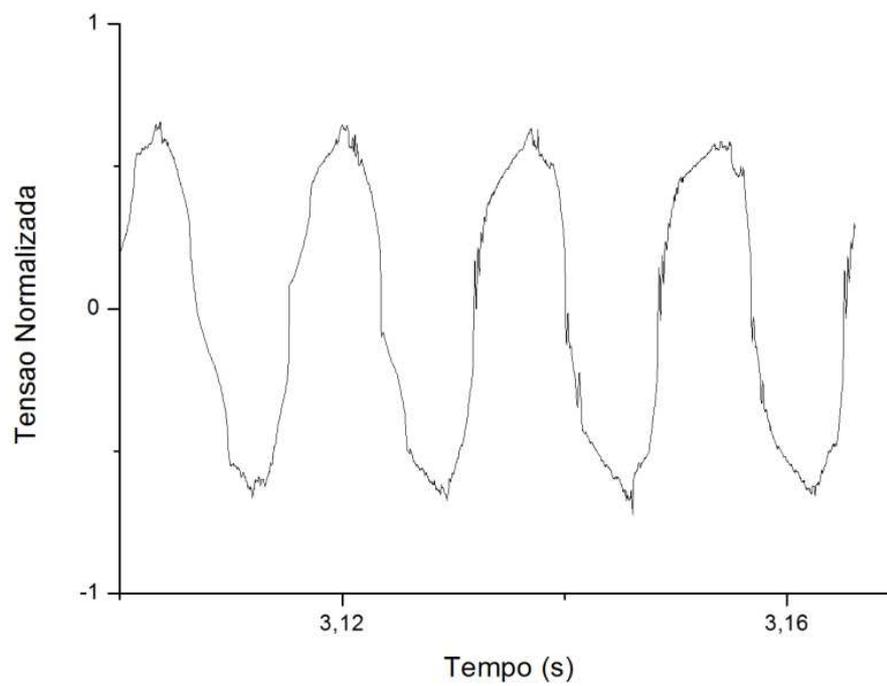


FIGURA 47 – SINAL DE TENSÃO NORMALIZADA PARA UMA AMOSTRA DE LLDPE COM PERCENTUAL ALEATÓRIO DE MONTMORILONITA
FONTE: O autor (2014)

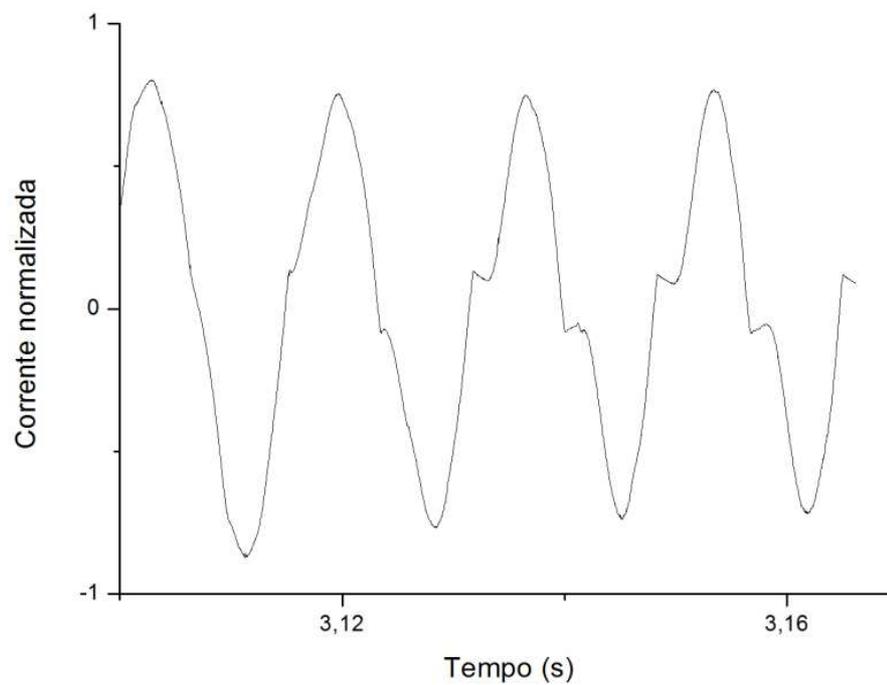


FIGURA 48 - SINAL DE CORRENTE NORMALIZADA PARA UMA AMOSTRA DE LLDPE COM POLIETILENO COM PERCENTUAL ALEATÓRIO DE MONTMORILONITA
FONTE: O autor (2014)

4.3 AJUSTE DOS PARÂMETROS EXPERIMENTAIS

Sabe-se que o fenômeno de trilhamento elétrico é extremamente dependente de fatores contaminantes e ambientais sobre a amostra, bem como a hidrofobicidade da superfície do material a ser ensaiado. Por esse motivo, fatores como resistividade do eletrólito e sua composição química devem ser bem controlados. A temperatura e umidade ambiente interferem diretamente na velocidade de evaporação do eletrólito, dessa forma o controle do ambiente do laboratório com ar condicionado é fundamental para que não ocorram alterações nos resultados. A uniformidade da hidrofobicidade das amostras é alcançada com a padronização da preparação das superfícies com o lixamento e limpeza com álcool isopropílico. Acredita-se que a preparação das superfícies a serem ensaiadas, com o lixamento, como sugerem as normas para avaliação do trilhamento elétrico, pode mascarar os resultados. Pois uma amostra com tratamento superficial, quando lixada, tem esse tratamento arrancado, podendo alterar consideravelmente sua resistência ao trilhamento elétrico. Além disso a dificuldade do controle da força com a qual as amostras são lixadas é outra variante. Por isso, segue a sugestão que as amostras sejam preparadas apenas com uma limpeza de sua superfície com álcool isopropílico, dessa forma a hidrofobicidade da superfície do material é mantida.

As curvas para as amostras de LLDPE obtidas com:

- Tensão de 1,30 kVAC;
- Distância entre os eletrodos 6 mm;
- Resistividade do eletrólito de 395 Ω .cm;
- Altura da agulha contaminante 30 mm;
- Temperatura da sala do laboratório 21⁰C;

Com o controle desses parâmetros pode-se garantir a reprodutividade dos resultados. Observa-se, na Figura 49, que o início da degradação da superfície das amostras ocorreu próximo aos 15 min de ensaio, com a amostra (A) apresentando a primeira diferença na inclinação da curva em 16 min., a amostra (B) em 13 min. essa diferença de apenas 3 min é tolerável para determinação do início do trilhamento elétrico.

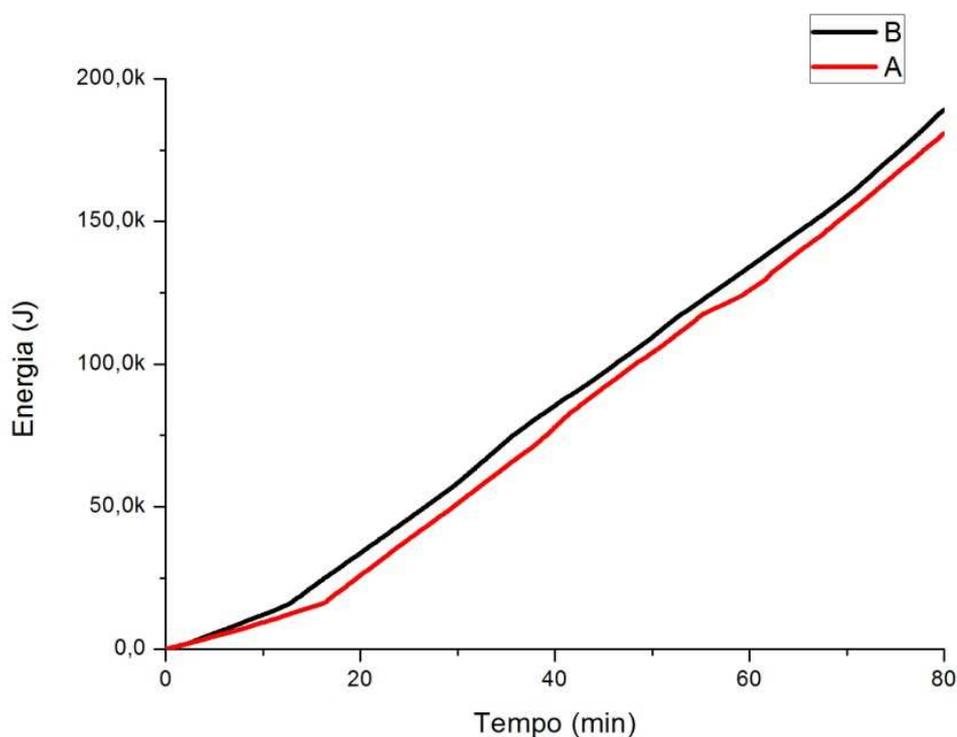


FIGURA 49 - CURVAS DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DURANTE O TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE DUAS AMOSTRAS (A) E (B) DE UMA MESMA PLACA DE LLDPE
 FONTE: O autor (2014)

Sobre as curvas de absorção de energia durante o ensaio de trilhamento elétrico, fez-se os ajustes lineares dos dados em regiões onde as curvas apresentavam inclinações distintas para a amostra (A) (Figura 50) até o instante 16 min a inclinação da curva foi de $(16,657 \pm 0,003) \text{ W}$, com $R^2 = 0,998$, indicando um excelente ajuste dos pontos ao *fitting* linear e depois desse instante a inclinação da curva cresceu para $(42,343 \pm 0,002) \text{ W}$, com $R^2 = 0,998$, indicando um excelente ajuste dos pontos ao *fitting* linear. Comparando os valores antes (vermelho) e depois (verde) da degradação superficial por trilhamento elétrico temos aproximadamente 2,5 vezes o valor da inclinação nos primeiros minutos de ensaio, indicando que este parâmetro pode ser um indicador da degradação da superfície de materiais poliméricos.

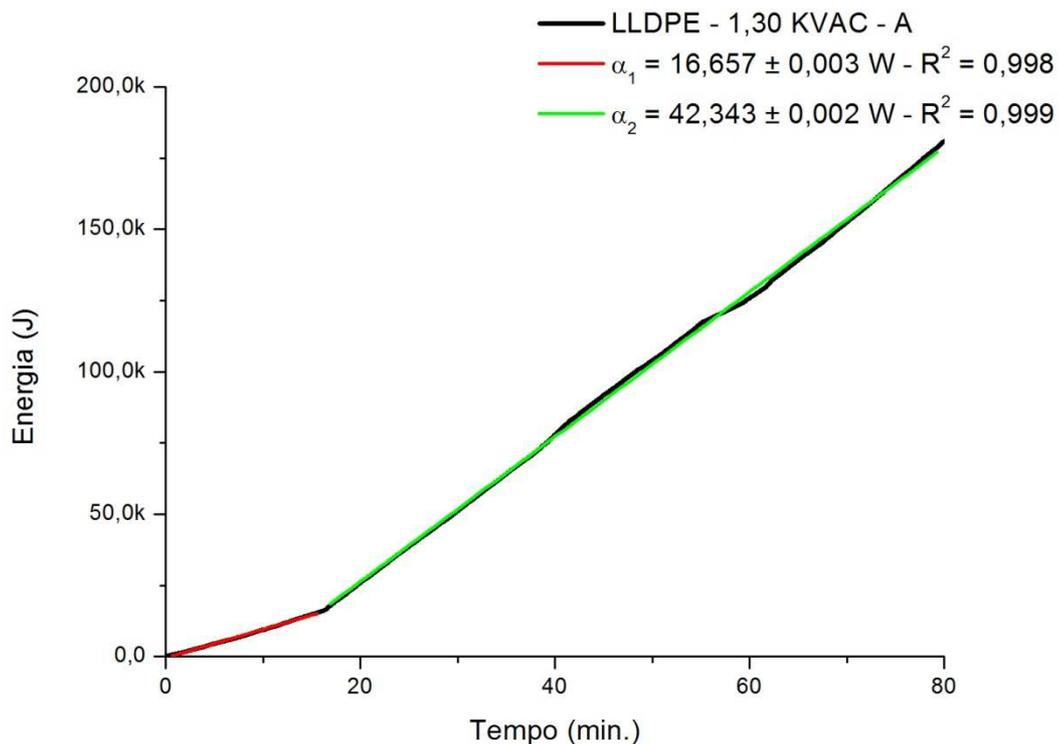


FIGURA 50 - CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DURANTE O TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE A AMOSTRA (A) DE LLDPE, COM INDICAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA NOS TRECHOS COM INCLINAÇÕES DISTINTAS
 FONTE: O autor (2014)

Também foi realizado o acompanhamento por fotografia (Figura 51) da amostra polimérica (A) e na primeira fotografia (Figura 51-(a)) (5 min. de ensaio) a superfície da amostra encontra-se inalterada, na segunda fotografia (Figura 51-(b)) (45 min. de ensaio) a amostra apresentou trilhamento elétrico e na terceira (Figura 51-(c)) temos uma foto do perfil de trilhamento causado pela degradação da superfície no final dos 80 min. de ensaio.

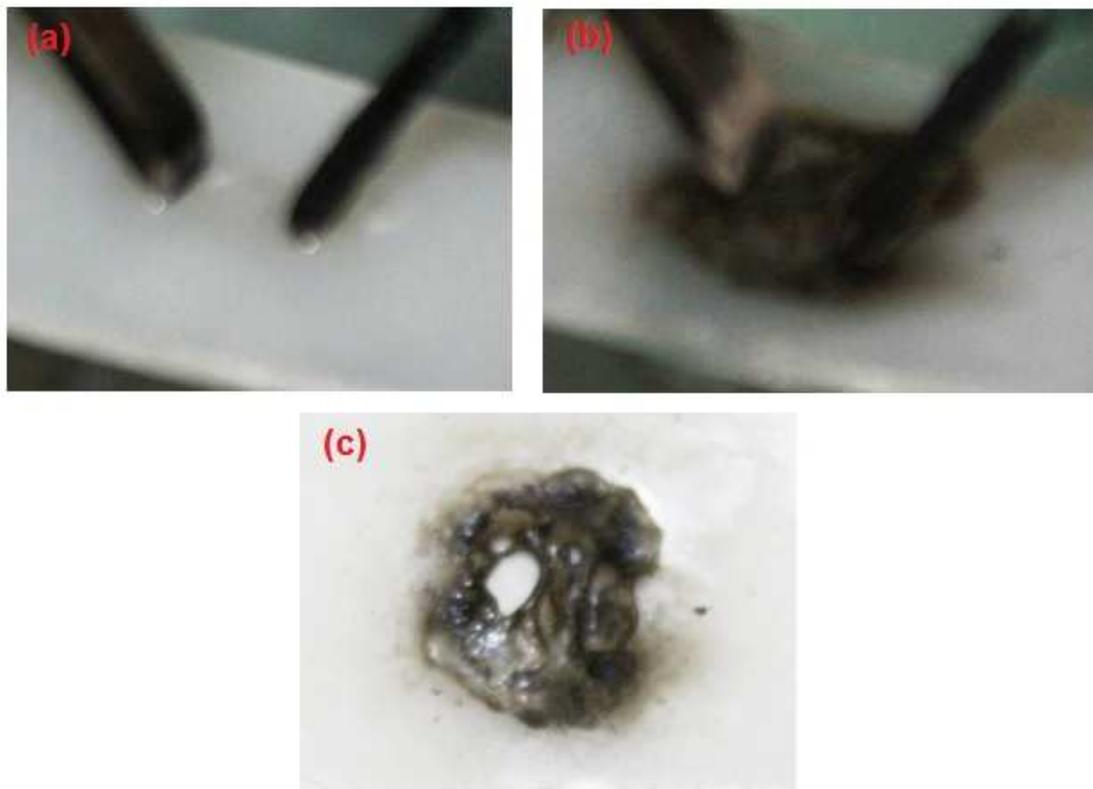


FIGURA 51 - ACOMPANHAMENTO POR FOTOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA POLIMÉRICA (A) DE LLDPE – (A) - 5 MIN. DE ENSAIO, A SUPERFÍCIE DA AMOSTRA ENCONTRA-SE INALTERADA - (B) 45 MIN. DE ENSAIO A AMOSTRA APRESENTOU TRILHAMENTO ELÉTRICO - (C) PERFIL DE TRILHAMENTO CAUSADO PELA DEGRADAÇÃO DA SUPERFÍCIE NO FINAL DOS 80 MIN. DE ENSAIO
 FONTE: O autor (2014)

Para a amostra (B) (Figura 52) tem-se a curva de absorção de energia durante o ensaio de trilhamento elétrico, também fez-se os ajustes lineares dos dados em regiões onde as curvas apresentavam inclinações distintas. Até o instante 13 min a inclinação da curva foi de $(21,580 \pm 0,003) \text{ W}$, com $R^2 = 0,999$, indicando um excelente ajuste dos pontos ao *fitting* linear e depois desse instante a inclinação da curva cresceu para $(41,973 \pm 0,002) \text{ W}$, também , com $R^2 = 0,999$, valor este de aproximadamente 2,0 vezes o valor da inclinação nos primeiros minutos de ensaio, da mesma forma que a amostra (A), a amostra (B) indica que a inclinação da curva pode ser um indicador da degradação da superfície de materiais poliméricos.

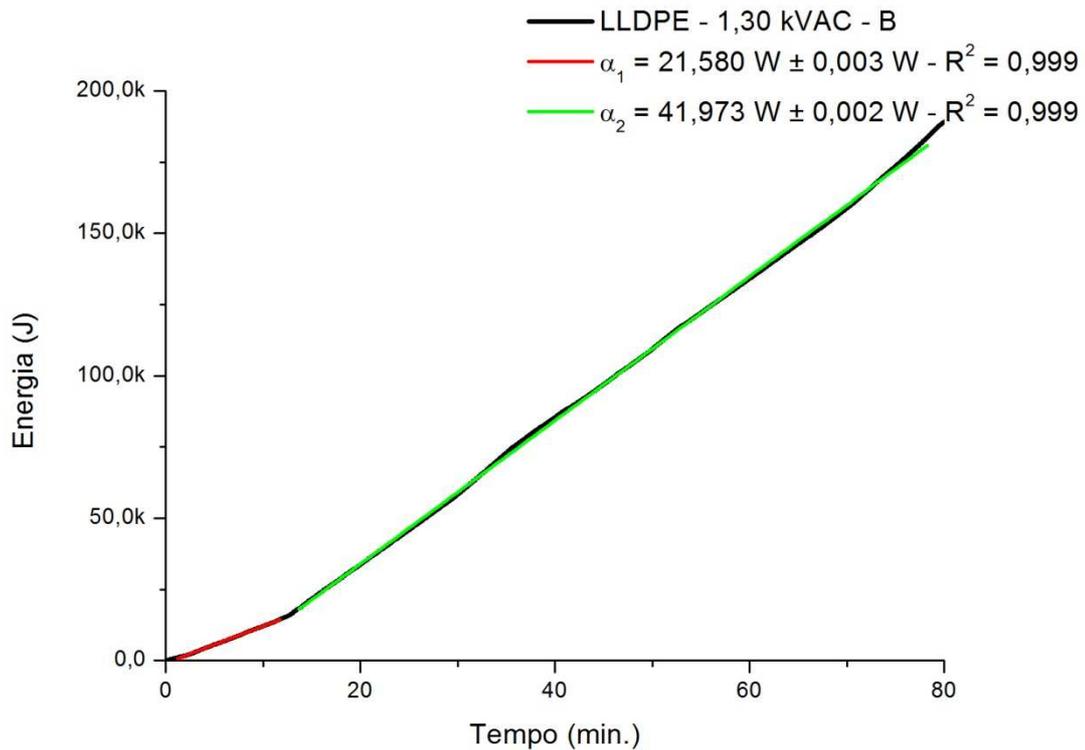


FIGURA 52 - CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DURANTE O TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE A AMOSTRA (B) DE LLDPE, COM INDICAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA NOS TRECHOS COM INCLINAÇÕES DISTINTAS
 FONTE: O autor (2014)

Também foi realizado o acompanhamento por fotografia (FIGURA 53) da amostra polimérica (B) e na primeira fotografia (FIGURA 53-(a)) (5 min. de ensaio) a superfície da amostra encontra-se inalterada, na segunda fotografia (FIGURA 53-(b)) (45 min. de ensaio) a amostra apresentou trilhamento elétrico e na terceira (FIGURA 53-(c)) temos uma foto do perfil de trilhamento causado pela degradação da superfície no final dos 80 min. de ensaio.

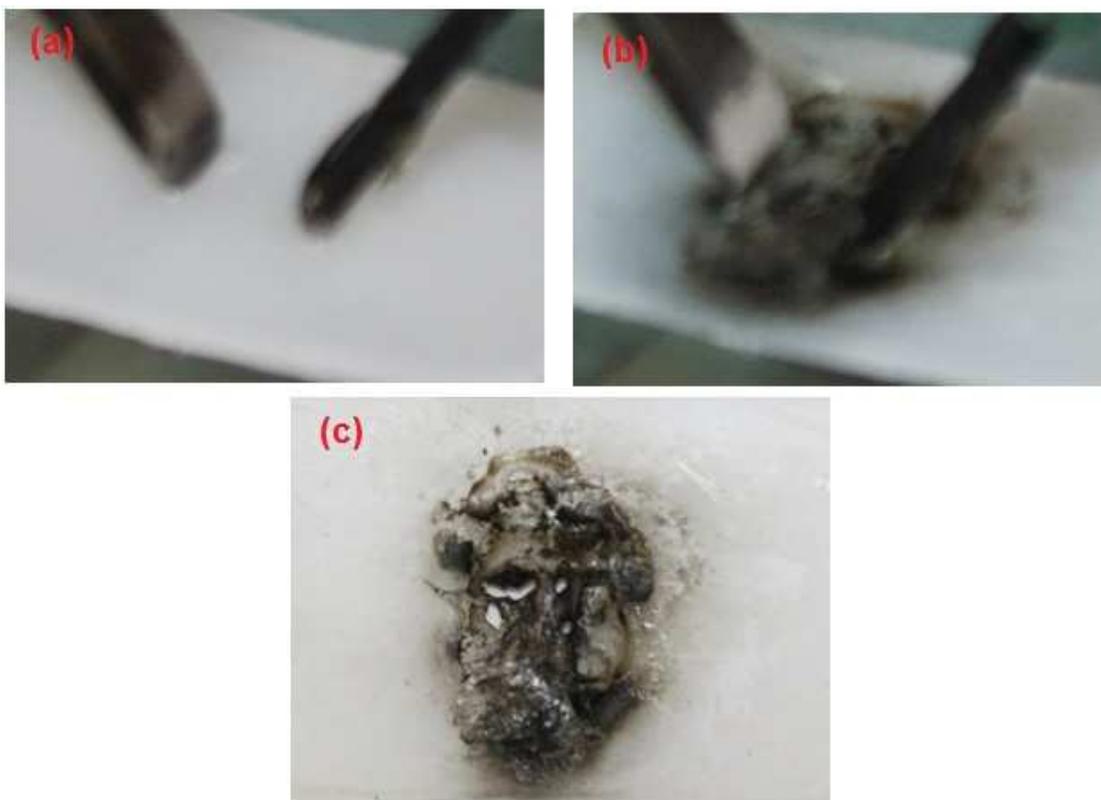


FIGURA 53 - ACOMPANHAMENTO POR FOTOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA POLIMÉRICA (B) DE LLDPE - (A) - 5 MIN. DE ENSAIO, A SUPERFÍCIE DA AMOSTRA ENCONTRA-SE INALTERADA - (B) 45 MIN. DE ENSAIO A AMOSTRA APRESENTOU TRILHAMENTO ELÉTRICO - (C) PERFIL DE TRILHAMENTO CAUSADO PELA DEGRADAÇÃO DA SUPERFÍCIE NO FINAL DOS 80 MIN. DE ENSAIO
 FONTE: O autor (2014)

Nas curvas das amostra poliméricas de LLDPE (A) e (B) os valores das inclinações das curvas foram próximos, tanto para os instantes iniciais (anterior à 15 minutos), quanto para os instantes finais (posteriores à 15 minutos), em que as curvas indicam que a superfície da amostra está apresentando degradação superficial, devido ao trilhamento elétrico.

Nos instantes iniciais estes valores de inclinações das curvas ficaram próximos aos 20 W, com a amostra (A) apresentando um valor de 16,7 W e a amostra (B) de 21,6 W uma diferença de 4,9 W. Nos instantes finais, que podem indicar o momento da degradação da superfície estes valores indicados ficaram mais próximos, com a amostra (A) em 42,3 W e a amostra (B) em 42,0 W. Uma diferença de apenas 0,3 W. Pode-se dizer com essa análise que o método proposto possui uma boa reprodutibilidade em seus resultados, quando os parâmetros experimentais são bem controlados.

4.4 DETERMINAÇÃO DO LIMITE SUPERIOR DA TENSÃO DE ENSAIO

Durante os estudos pode-se perceber que algumas amostras, quando expostas a condições de tensão e corrente muito elevadas sofriam perfuração ou inflamavam. Esta degradação rápida e permanente na amostra implica em um curto intervalo de formação das trilhas, condição não desejável para o estudo da evolução do fenômeno de trilhamento elétrico. Por esse motivo, explorou-se o limite máximo de tensão que as amostras poderiam suportar de tal forma que elas não apresentassem perfuração e nem inflamassem, esse limite máximo foi baseado na menor temperatura de fusão dentre os materiais estudados que, no caso é o LLDPE, que fica em torno de 110°C (WONG e LAM, 2002). As termografias da Figura 56 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) exibem o acréscimo da temperatura do ensaio no momento da cintilação em função da tensão aplicada sobre a amostra. Estas temperaturas permanecem sobre a amostra por um tempo não superior a 2 s. Por esta razão as temperaturas podem ser um pouco superiores ao ponto de fusão do LLDPE (110°C), causando pequenos danos superficiais por aquecimento e gerando a degradação da superfície por trilhamento elétrico. Caso essas temperaturas fossem mantidas sobre a amostra por um tempo superior a 2 s as amostras sofreriam uma degradação térmica acentuada e a degradação elétrica seria minimizada. Porém a técnica aqui apresentada é capaz de identificar o momento em que a amostra irá falhar, mesmo que essa falha seja por trilhamento elétrico ou por aquecimento devido as descargas superficiais. Na Figura 56 observam-se algumas termografias para a superfície da amostra em função da tensão aplicada em (a) pode-se observar uma termografia da superfície da amostra, quando ela está sob uma tensão de 750 V, onde no centro entre os eletrodos encontra-se uma temperatura de $64,0^{\circ}\text{C}$, em (b) sob uma tensão de 1 000 V, onde no centro entre os eletrodos encontra-se uma temperatura de $75,4^{\circ}\text{C}$, em (c) sob uma tensão de 1 250 V, onde no centro entre os eletrodos encontra-se uma temperatura de $94,0^{\circ}\text{C}$, em (d) sob uma tensão de 1 500 V, onde no centro entre os eletrodos encontra-se uma temperatura de $131,0^{\circ}\text{C}$, em (e) sob uma tensão de 1 750 V, onde no centro

entre os eletrodos encontra-se uma temperatura de $145,4^{\circ}\text{C}$, em (f) sob uma tensão de 2 000 V, onde no centro entre os eletrodos encontra-se uma temperatura de $169,1^{\circ}\text{C}$ e finalmente em (g) também sob uma tensão de 2 000 V, porém, no instante em que a descarga está ocorrendo sobre a amostra e portanto a temperatura da chama é muito maior no centro entre os eletrodos, algo em torno de $349,6^{\circ}\text{C}$. Essas termografias foram obtidas com um termovisor Fluke Ti32 60 Hz e tratadas com o *software SmartView*[®] para obtenção dos valores de temperaturas na região central dos eletrodos.

As termografias obtidas confirmam que em 1 500 V, a superfície da amostra devido as descargas superficiais, atingem temperaturas superiores a temperatura de fusão do polietileno que fica em torno de 110°C (WONG e LAM, 2002), portanto os ensaios realizados abaixo desta tensão, com espaçamento entre os eletrodos de 6 mm, ficam na região de temperatura na qual a superfície terá degradação predominantemente por trilhamento elétrico.

Para uma melhor ilustração desse limite de temperatura observa-se nas Figuras 54 e 55 os termogramas de aquecimento do HDPE e LLDPE realizados por (WONG e LAM, 2002) e utilizado como referência neste trabalho. Existe um único pico indicando que o material absorve energia sem alterar significativamente sua temperatura, ou seja, está realizando uma mudança de fase. A temperatura correspondente ao pico representa o ponto de fusão de cada um dos polímeros. Essas temperaturas não podem ser ultrapassadas durante o ensaio para evitar que a amostra tenha a superfície degradada por fusão. Se a superfície polimérica atingir a temperatura de fusão por um tempo suficientemente grande para que a amostra perca massa e/ou perfure, o fenômeno de trilhamento elétrico acaba por ser disfarçado e não pode ser observado claramente. Então tomou-se o cuidado para que estes valores de temperaturas fossem ultrapassados durante o ensaio de trilhamento elétrico, para garantir a degradação da superfície predominantemente pela geração das trilhas condutoras de material a base de carbono, como grafite, negro de fumo e carbono amorfo.

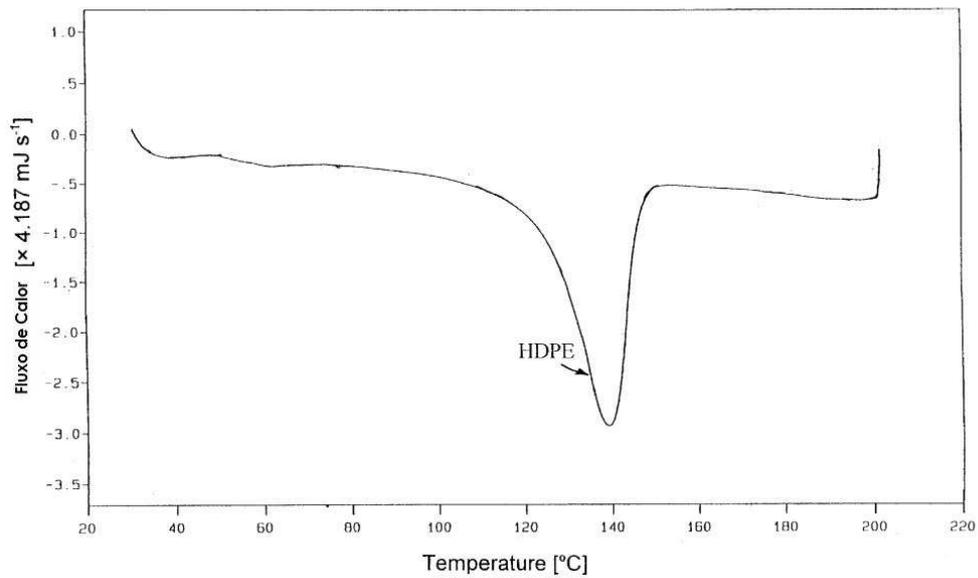


FIGURA 54 - TÍPICO TERMOGRAMA DSC PARA HDPE
FONTE: WONG e LAM (2002)

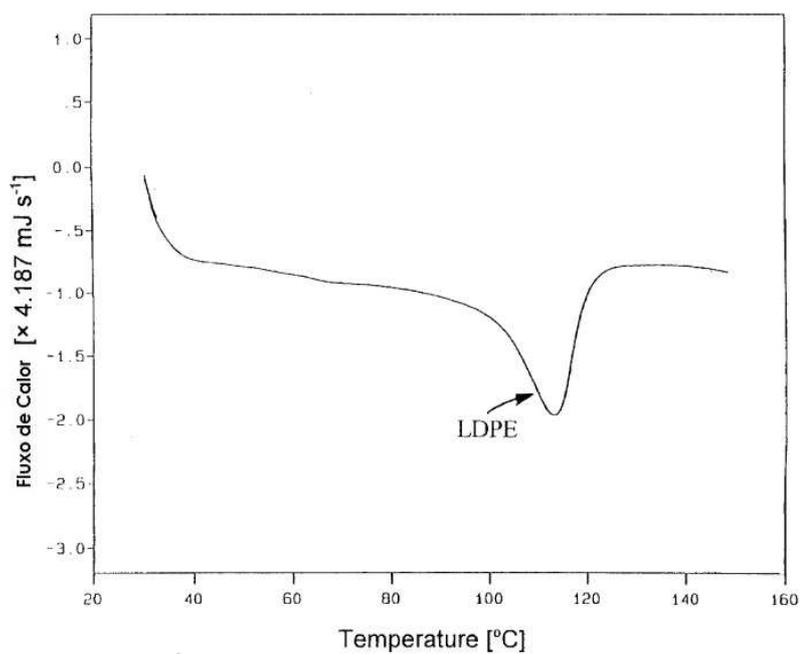


FIGURA 55 - TÍPICO TERMOGRAMA DSC PARA LLDPE
FONTE: WONG e LAM (2002)

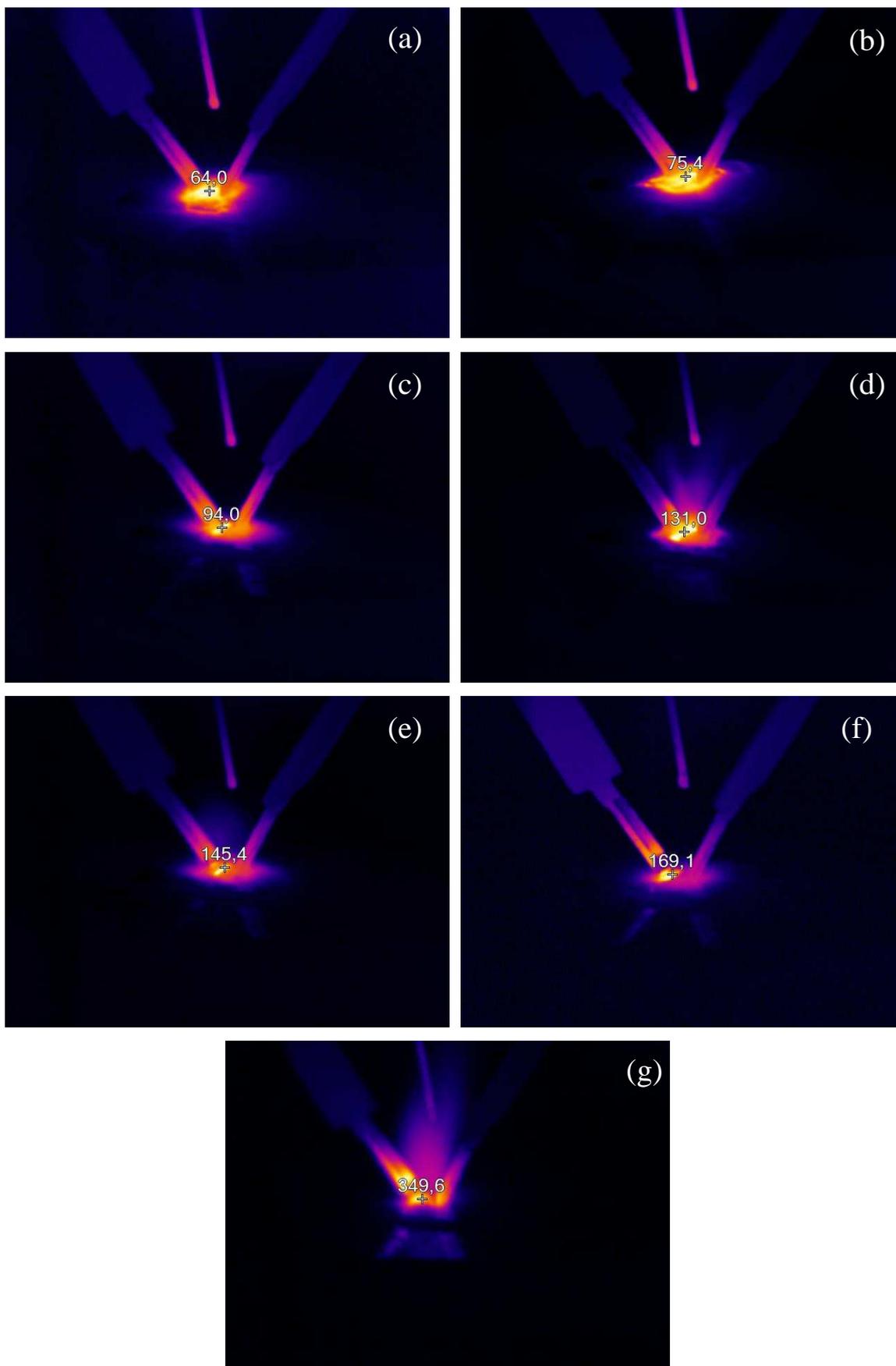


FIGURA 56 – TERMOGRAFIAS EM DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO (A) 750 V (B) 1000V (C) 1250 V (D) 1500 V (E) 1750 V (F) 2000 V (G) 2000 V NO MOMENTO DA CINTILAÇÃO. FONTE: O autor (2014)

4.5 SINAIS DE CORRENTE

Muitas técnicas de caracterização da resistência ao trilhamento elétrico de materiais sólidos utilizam um valor limite de corrente como parâmetro de avaliação da suportabilidade ao trilhamento elétrico, pois o valor médio da corrente elétrica, em geral, tende a aumentar em função do aumento na degradação da superfície do material em estudo. Com a técnica desenvolvida neste trabalho foi possível observar uma significativa diferença no tempo de ocorrência dos sinais de corrente elétrica sobre a amostra em função do tempo e do grau de degradação da superfície ensaiada. A Figura 57 exibe a evolução no consumo de energia sobre a superfície da amostra onde se vê duas regiões distintas. A primeira região, exibe uma inclinação da reta formada pelos dados de 13,5 W e, na segunda região, mostra uma inclinação de 33,5 W. Essa diferença na inclinação da curva nas duas regiões é explicada pelo tempo em que as descargas superficiais ocorrem sobre a amostra. Isso pode ser observado nas Figuras 58 e 60 (primeiro estágio de degradação) e Figuras 59 e 61 (segundo estágio de degradação). No primeiro estágio de degradação, a superfície da amostra ainda não apresenta trilhas visíveis e, portanto tem-se uma superfície que não apresenta trilhamento elétrico. Na Figura 58 pode-se observar o comportamento da corrente elétrica durante duas descargas superficiais e na Figura 60 tem-se um *zoom* da primeira descarga superficial da Figura 58, essas figuras evidenciam que nesse estágio de degradação superficial as descargas na superfície da amostra tem uma duração média de aproximadamente 0,7 s. Já no segundo estágio de degradação, a superfície da amostra apresenta trilhas visíveis e, portanto tem-se uma superfície que apresenta trilhamento elétrico. Na Figura 59 pode-se observar o comportamento da corrente elétrica durante duas descargas superficiais nesse estágio e na Figura 61 tem-se um *zoom* da primeira descarga superficial da Figura 59. Nesse estágio há degradação da superfície e, o tempo médio das descargas superficiais apresenta um acréscimo no tempo de ocorrência, durando aproximadamente 2,3 s. Essas diferenças nos tempos médios de duração dos sinais de corrente, fazem com que a potência média dissipada

sejam diferentes em cada região, exibindo uma diferença na inclinação da curva de absorção de energia, em função da degradação superficial.

Antes do trilhamento elétrico tem-se uma inclinação na curva e após a ocorrência do trilhamento elétrico essa inclinação é aumentada, em aproximadamente o dobro de seu valor inicial.

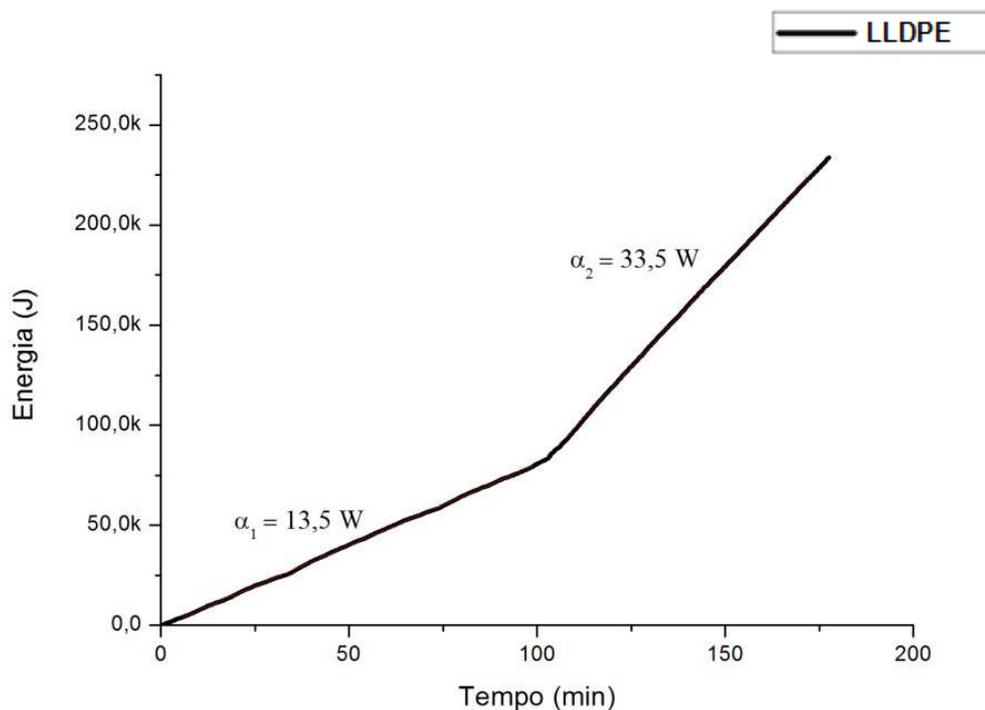


Figura 57 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE
FONTE: O autor (2014)

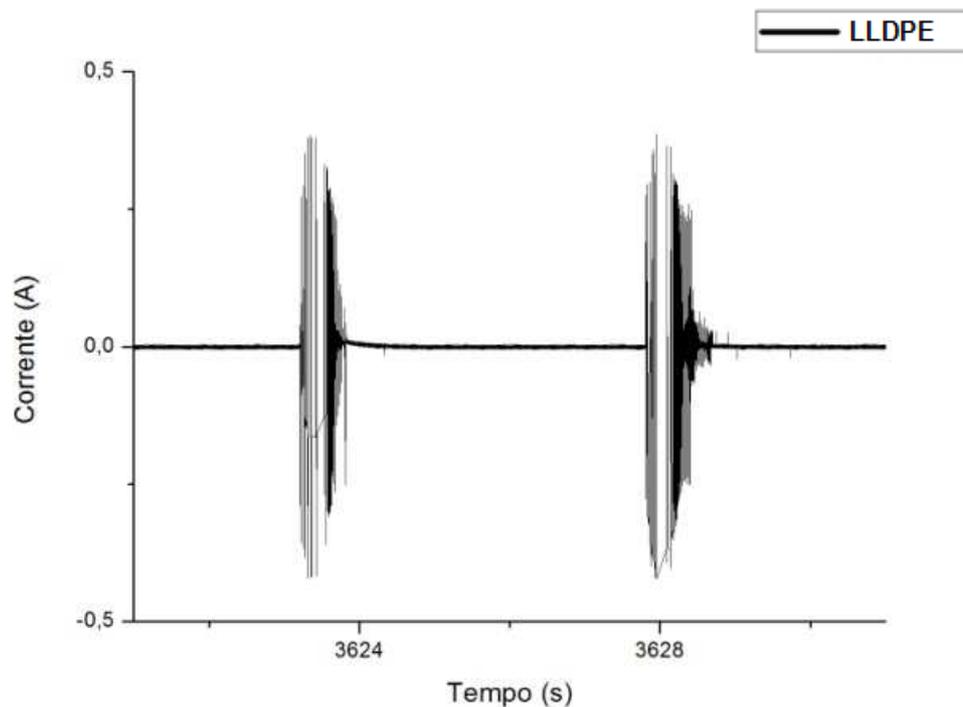


Figura 58 - UMA AMOSTRA DO SINAL DA CORRENTE NA REGIÃO ONDE $\alpha_1=13,5$ W, RETIRADA DO GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE
 FONTE: O autor (2014)

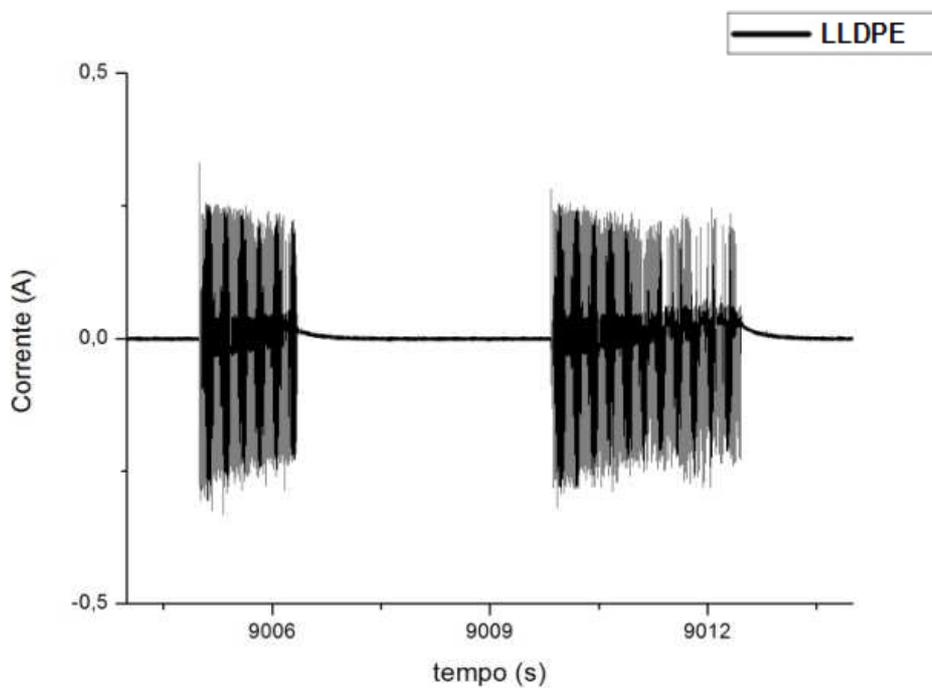


Figura 59 - UMA AMOSTRA DO SINAL DA CORRENTE ONDE $\alpha_2 = 33,5$ W, RETIRADA DO GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE
 FONTE: O autor (2014)

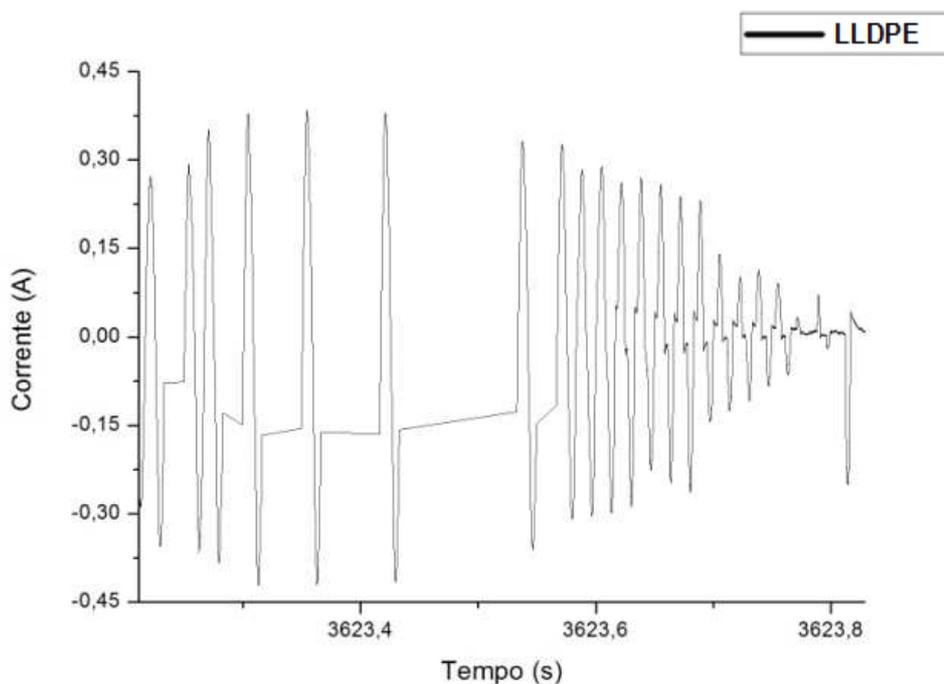


Figura 60 - DETALHE DE UMA AMOSTRA DO SINAL DA CORRENTE NA REGIÃO ONDE $\alpha_1=13,5$ W, RETIRADA DO GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE
 FONTE: O autor (2014)

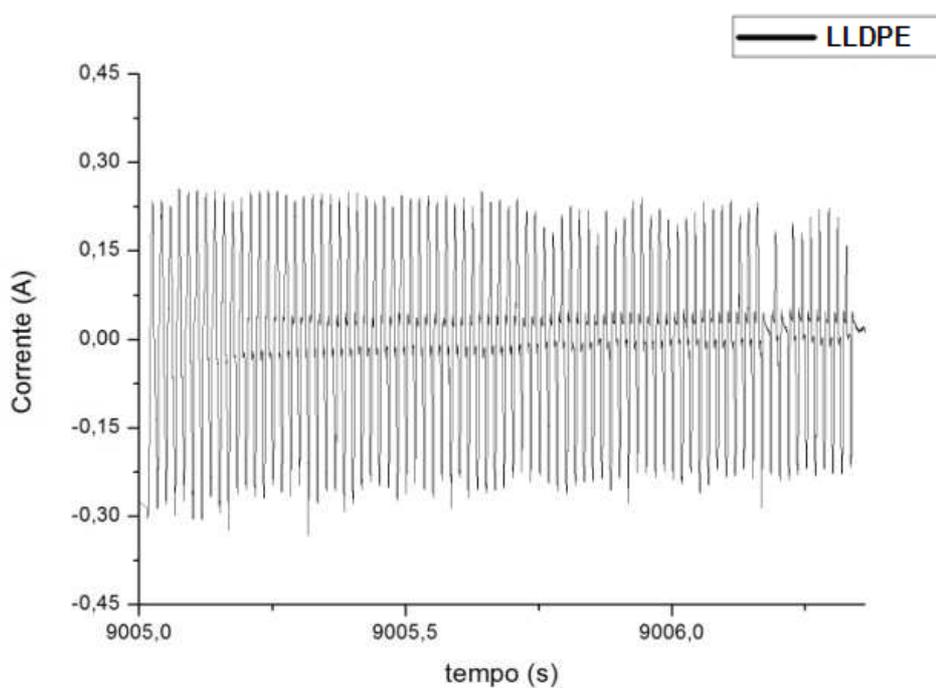


Figura 61 - DETALHE DE UMA AMOSTRA DO SINAL DA CORRENTE NA REGIÃO ONDE $\alpha_2 = 33,5$ W, RETIRADA DO GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE LLDPE
 FONTE: O autor (2014)

4.6 EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ACOMPANHADO POR FOTOGRAFIA

A técnica proposta apresenta resultados satisfatórios para indicação do momento em que a superfície da amostra formará caminhos condutores e estará na iminência de sofrer uma falha por trilhamento elétrico. Pode-se observar, com maior detalhe, a aplicação desta técnica em algumas amostras poliméricas preparadas e comparar esses resultados com algumas fotografias que foram retiradas periodicamente da superfície da amostra para ilustrar essa evolução.

Os resultados observados na Figura 62 apresentam a evolução da absorção de energia para uma amostra polimérica de LLDPE e o acompanhamento dessa evolução também foi feito com as fotografias da Figura 63. Em (a) pode-se observar a superfície da amostra no início do ensaio. Em (b) inicia-se a degradação da superfície com um pequeno escurecimento na superfície da amostra, porém a absorção de energia não sofre alterações. Nas fotografias (c), (d) e (e) esse escurecimento na superfície aumenta gradativamente, mas ainda não exibe alterações no padrão de absorção de energia pela amostra, na fotografia (f) verifica-se que o escurecimento está completando a distância entre os dois eletrodos e o padrão de absorção de energia pela amostra sofre uma alteração, exibindo um aumento na inclinação da curva. Essa inclinação da curva se mantém até (g), nesse ponto encerrou-se o ensaio.

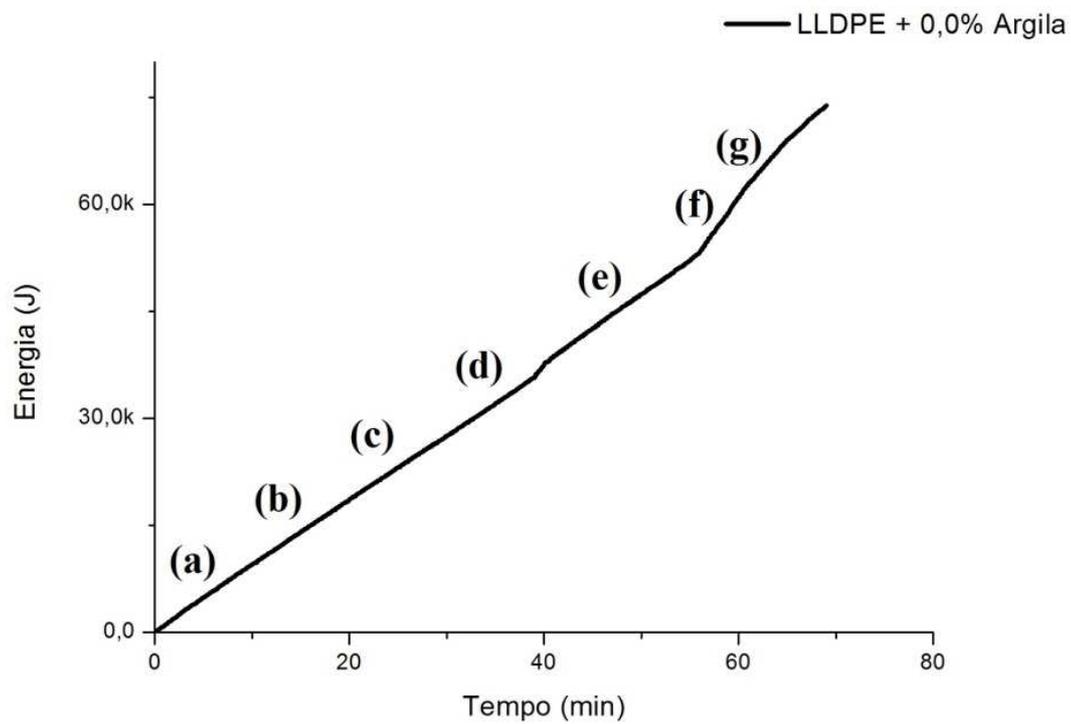


FIGURA 62 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA POR TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE UMA AMOSTRA PURA DE LLDPE
FONTE: O autor (2014)

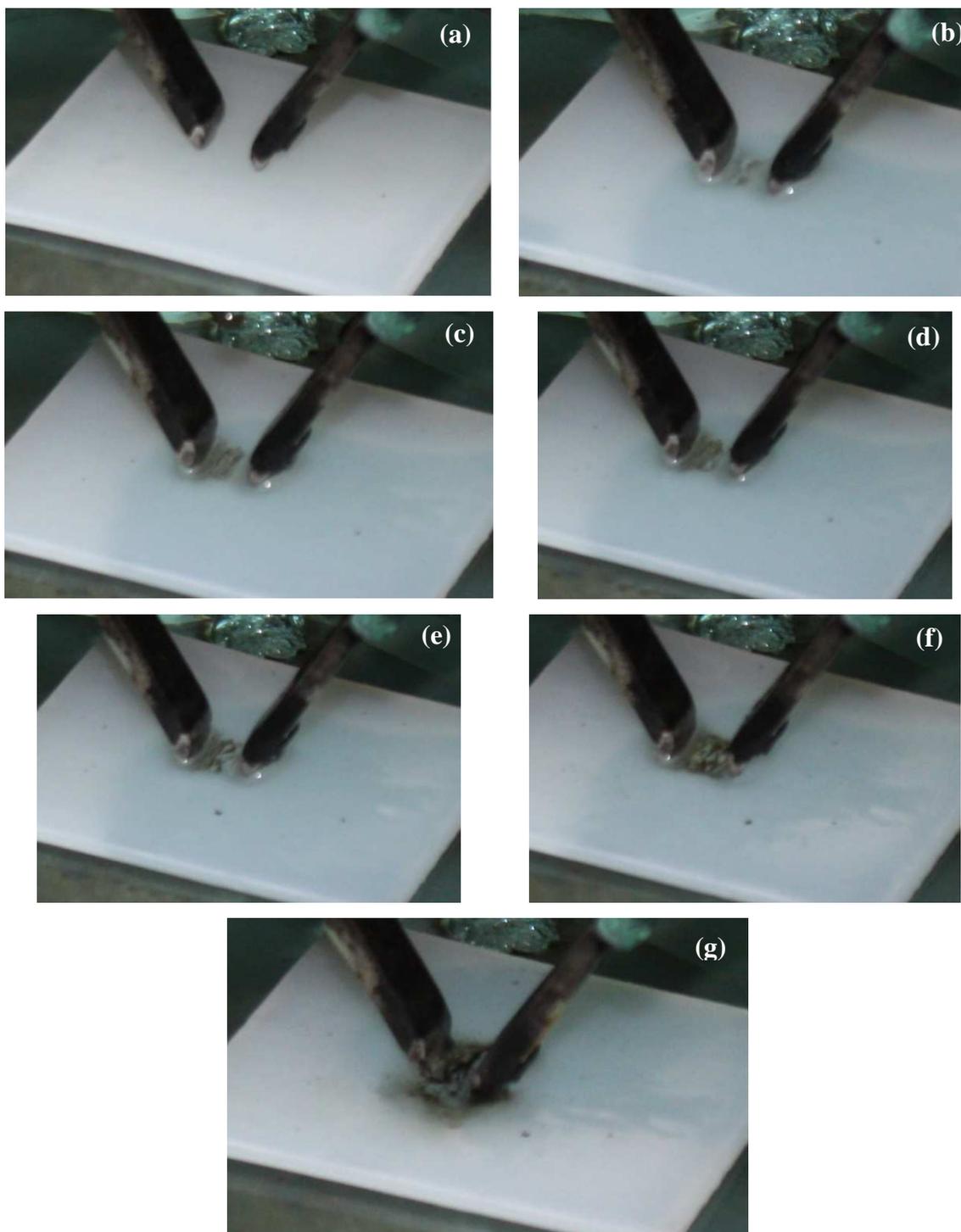


FIGURA 63 - ACOMPANHAMENTO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA DE LLDPE NOS INSTANTES (A) 0 MIN. (B) 35 MIN. (C) 45 MIN. (D) 50 MIN. (E) 55 MIN. (F) 60 MIN. E (G) 65 MIN.

FONTE: O autor (2014)

Os resultados visualizados na Figura 64 apresentam a evolução da absorção de energia, por uma amostra polimérica de um composto, formado por LLDPE e argila montmorilonita modificada NovaClay™, com 0,5% em

massa de argila na matriz polimérica e o acompanhamento dessa evolução também foi realizado com as fotografias da Figura 65. Em (a) pode-se observar a superfície da amostra no início do ensaio, em (b), (c) e (d) inicia-se a degradação da superfície com um leve escurecimento na superfície da amostra, aumentando gradativamente esse escurecimento em função do transcorrer do ensaio. Nesses instantes, a absorção de energia não sofre alterações. Nas fotografias (e), (f) e (g) verifica-se que o escurecimento já completou a distância entre os dois eletrodos e o padrão de absorção de energia pela amostra sofre uma alteração, exibindo um aumento na inclinação da curva.

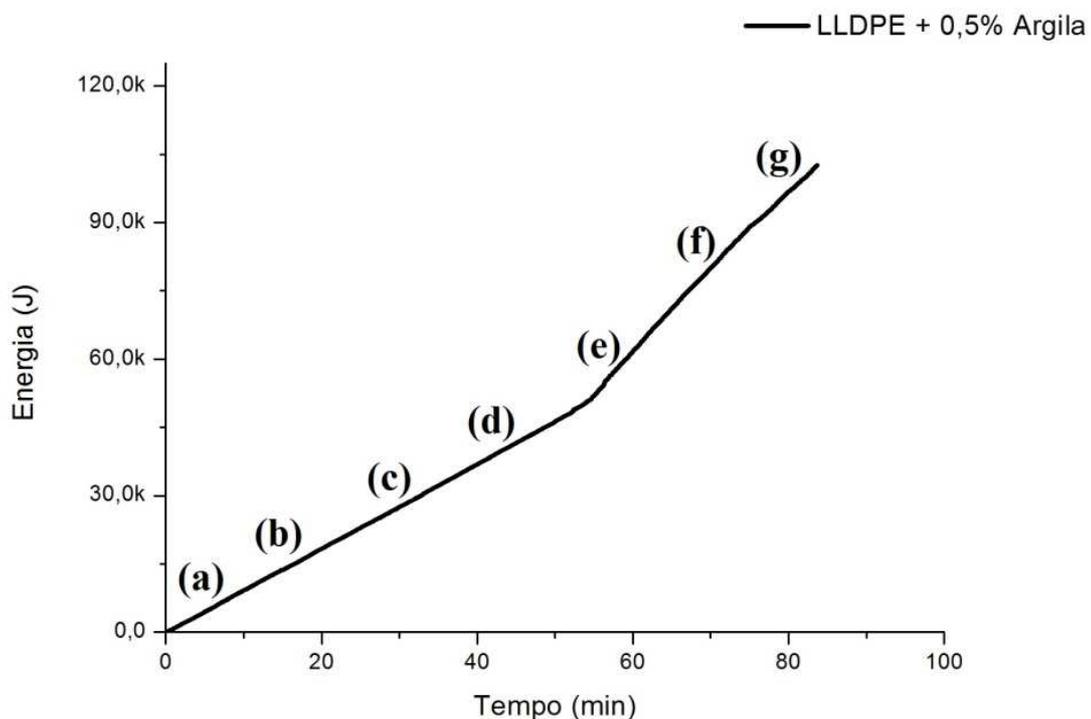


FIGURA 64 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA POR TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE UMA AMOSTRA DE COMPOSITO DE LLDPE/ARGILA MONTMORILONITA - 0,5%
FONTE: O autor (2014)

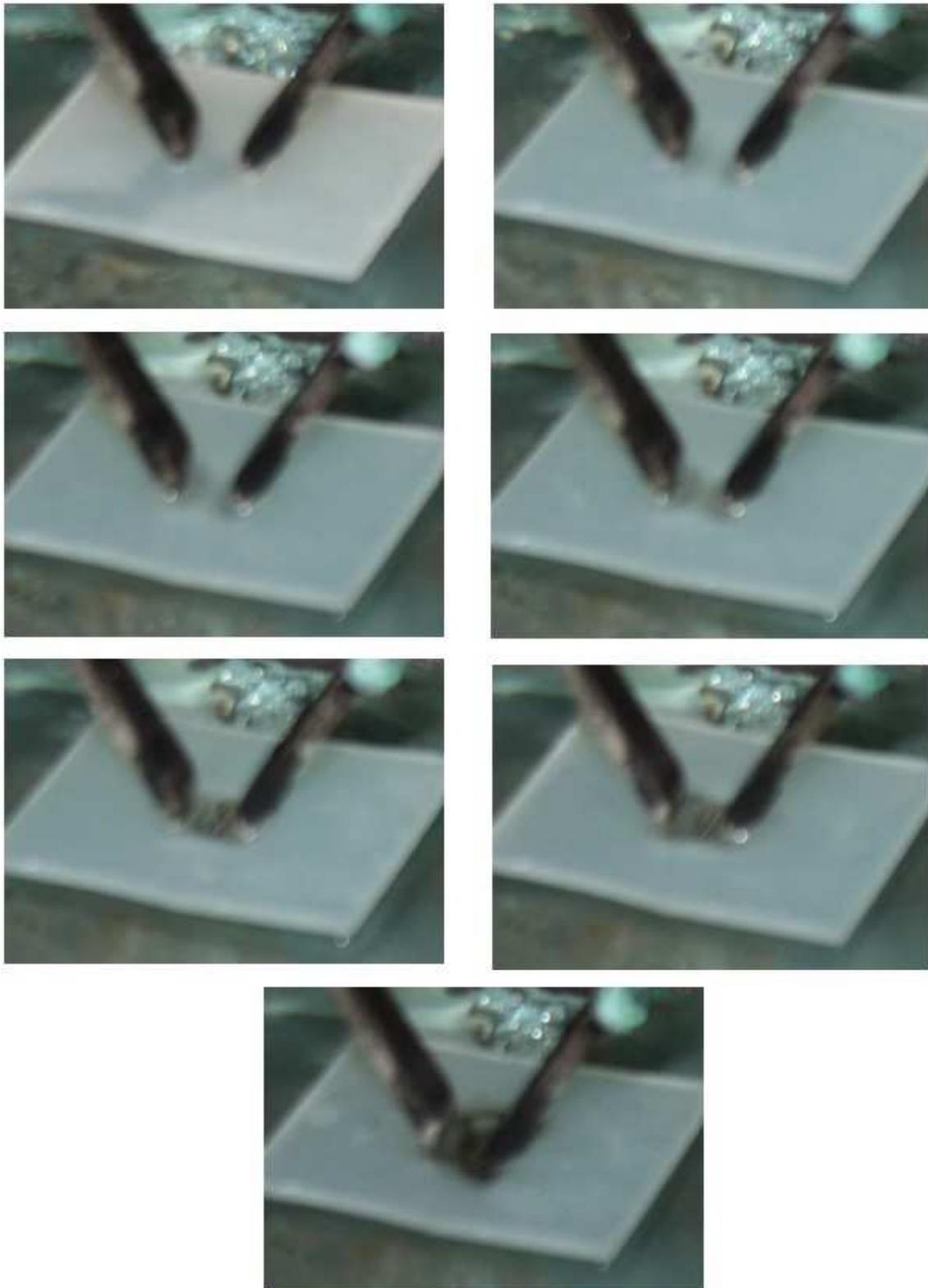


FIGURA 65 - ACOMPANHAMENTO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA DO COMPÓSITO LLDPE/MONTMORILONITA 0,5% EM MASSA NOS INSTANTES (A) 0 MIN. (B) 15 MIN. (C) 30 MIN. (D) 45 MIN. (E) 60 MIN. (F) 75 MIN. E (G) 90 MIN.
FONTE: O autor (2014)

Os resultados obtidos na Figura 66 apresentam a evolução da absorção de energia, por uma amostra polimérica de um compósito, formado por LLDPE

e argila montmorilonita modificada NovaClay™, com 1,0% em massa de argila na matriz polimérica. O acompanhamento dessa evolução também foi realizado com as fotografias da Figura 67. Em (a) pode-se observar a superfície da amostra no início do ensaio. Em (b) e (c) inicia-se a degradação da superfície com um escurecimento muito leve na superfície da amostra, aumentando gradativamente esse escurecimento com o passar do tempo de ensaio. Porém, nesses instantes a absorção de energia não sofre alterações. Nas fotografias (d), (e) e (f) verifica-se que o escurecimento já completou a distância entre os dois eletrodos e o padrão de absorção de energia pela amostra sofre uma alteração, exibindo um aumento na inclinação da curva. Também pode-se observar que esse escurecimento está aumentando em função do tempo. Entretanto de (d) à (f) a inclinação da curva de absorção de energia se mantém constante.

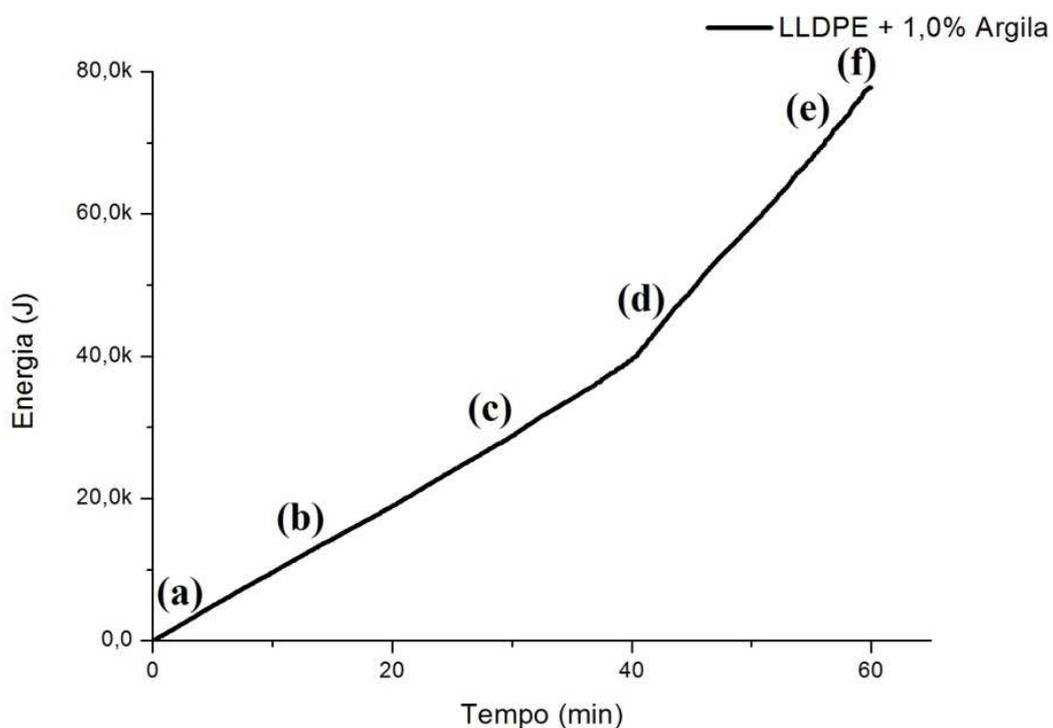


FIGURA 66 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA POR TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE UMA AMOSTRA DE COMPÓSITO DE LLDPE/ARGILA MONTMORILONITA - 1,0%
FONTE: O autor (2014)

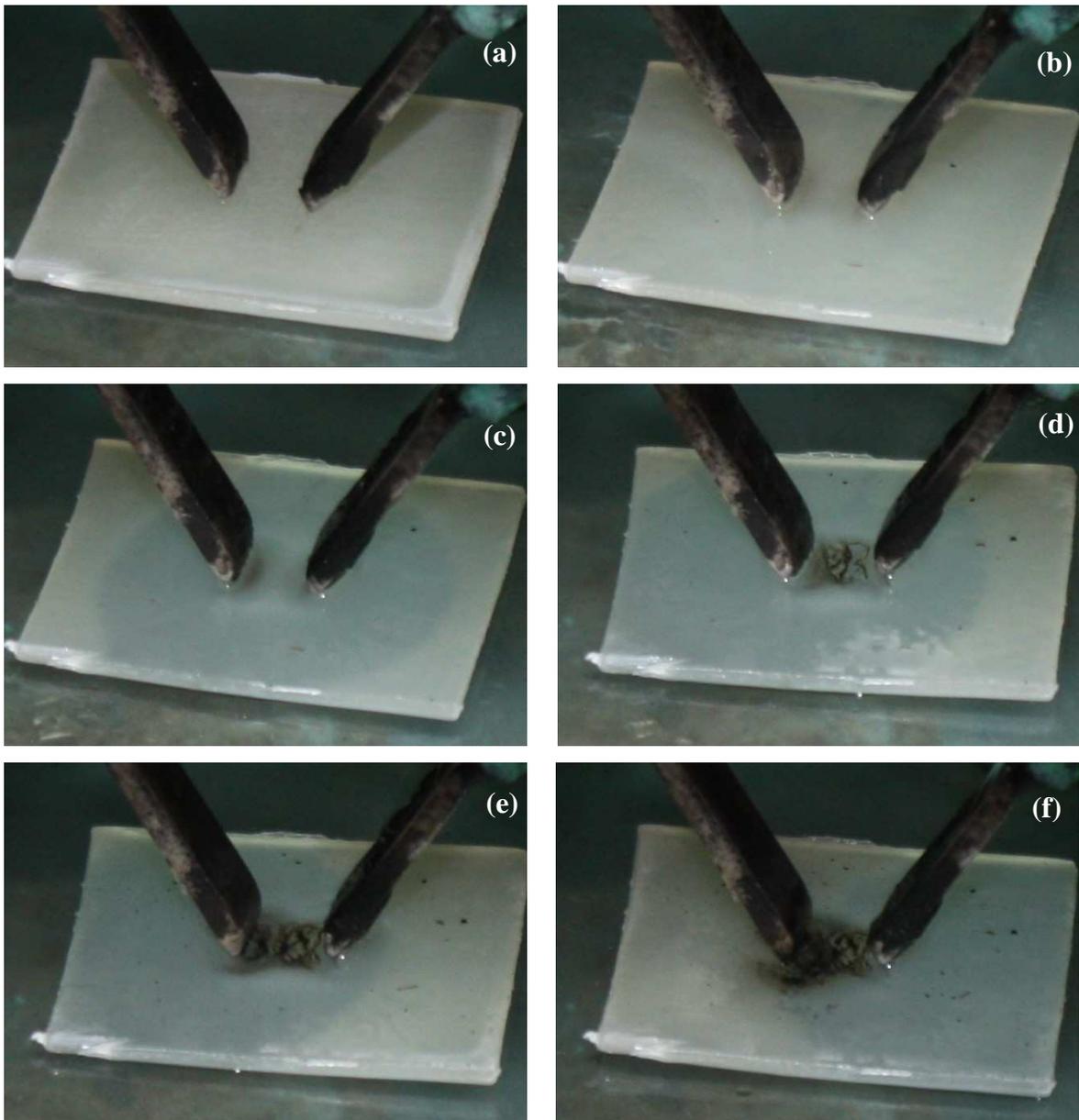


FIGURA 67 - ACOMPANHAMENTO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA DO COMPÓSITO LLDPE/MONTMORILONITA 1,0% EM MASSA NOS INSTANTES (A) 0 MIN. (B) 15 MIN. (C) 30 MIN. (D) 45 MIN. (E) 60 MIN. E (F) 65 MIN.
 FONTE: O autor (2014)

Os resultados obtidos na Figura 68 apresentam a evolução da absorção de energia, por uma amostra polimérica de um compósito, formado por LLDPE e argila montmorilonita modificada NovaClay™, com 1,5% em massa de argila na matriz polimérica. O acompanhamento dessa evolução também foi realizado com as fotografias da Figura 69. Em (a) pode-se observar a superfície da amostra no início do ensaio. Em (b) e (c) inicia-se a degradação da superfície com um leve escurecimento na superfície da amostra, aumentando gradativamente esse escurecimento com o passar do tempo de ensaio. Porém

nesses instantes a absorção de energia não sofre alterações. Na fotografia (d) observa-se o escurecimento de boa parte da distância entre os dois eletrodos e o padrão de absorção de energia pela amostra já apresenta alterações, exibindo um aumento na inclinação da curva. Finalmente em (e) a amostra está inflamada e a inclinação da curva de absorção de energia se mantém. Isso sugere que esse primeiro momento em que a curva sofre um aumento em sua inclinação é um indicador de falha do material por trilhamento elétrico.

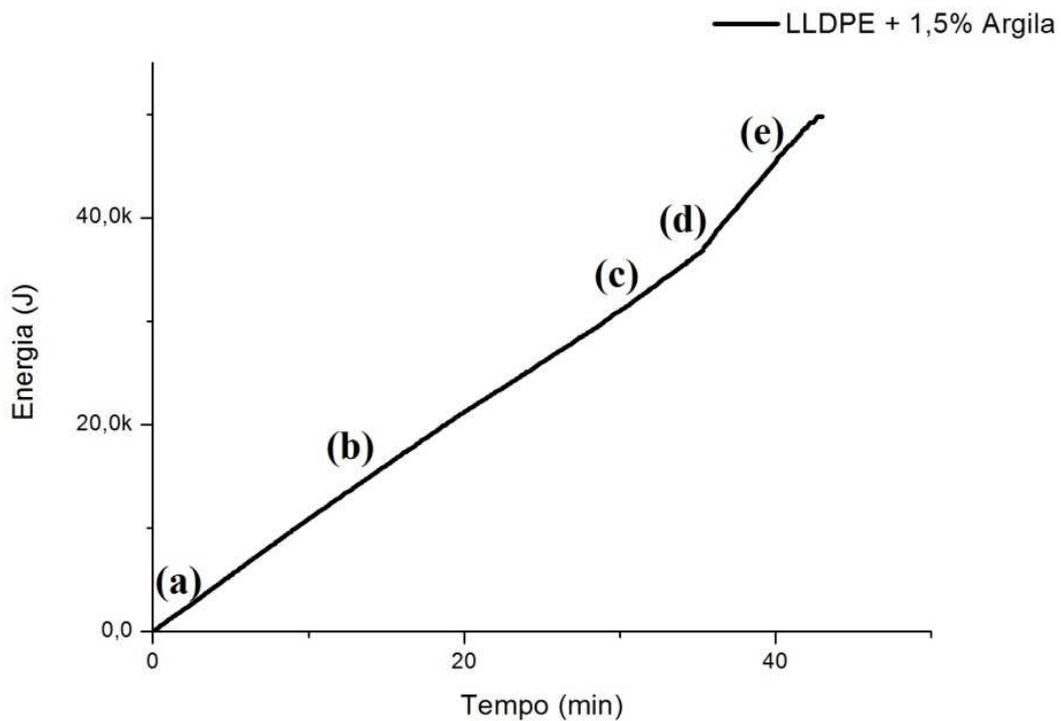


FIGURA 68 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA POR TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE UMA AMOSTRA DE COMPÓSITO DE LLDPE/ARGILA MONTMORILONITA - 1,5%
FONTE: O autor (2014)

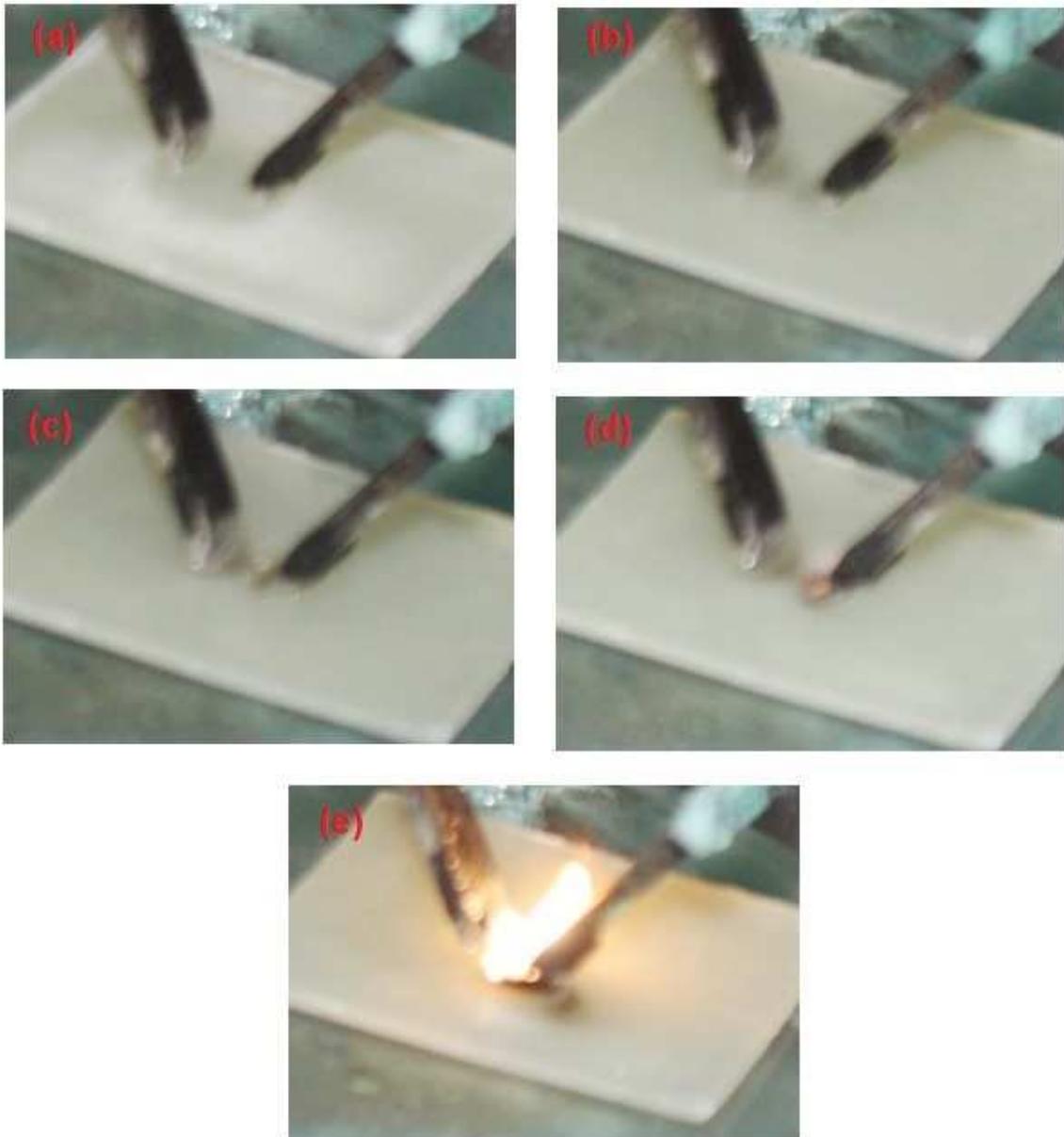


FIGURA 69 - ACOMPANHAMENTO FOTOGRÁFICO DA AMOSTRA DO COMPÓSITO LLDPE/MONTMORILONITA 1,5% EM MASSA NOS INSTANTES (A) 0 MIN. (B) 15 MIN. (C) 30 MIN. (D) 35 MIN. E (E) 40 MIN.

FONTE: O autor (2014)

4.7 RESULTADO COMPARATIVO COM O MODELO DE MALIK

Percebeu-se com este estudo que as amostras poliméricas quando submetidas a condições extremas de degradação (como a aplicação de uma alta energia em sua superfície, na forma de tensão e corrente elevadas) as descargas superficiais atingem altas temperaturas e, rapidamente, degradam a

superfície do material em estudo. Isto pode ser vantajoso, quando a técnica estiver bem estabelecida, pois poderá reduzir o tempo de ensaio.

Para uma melhor avaliação do fenômeno de trilhamento elétrico, realizou-se sobre uma amostra de compósito polimérico de LLDPE com 1,0% em massa de argila montmorilonita NovaClay™ um ensaio com duração de aproximadamente 3 horas e em condições mais amenas de tensão e corrente. Para este ensaio estabeleceu-se os seguintes parâmetros, tensão aplicada de (900 ± 1) kVAC e uma distância entre os eletrodos de $(6,0 \pm 0,1)$ mm.

Os resultados obtidos com esses parâmetros sobre a amostra polimérica podem ser observados na Figura 70, a curva apresenta claramente três regiões de absorção de energia:

1ª. Em vermelho, corresponde a uma inclinação de $(8,842 \pm 0,009)$ W, com $R^2 = 0,999$, indicando uma excelente correlação linear, e a amostra não apresenta degradação da superfície, representando a fase c do modelo de Malik (FIGURA 9);

2ª. Em verde, corresponde a uma inclinação de $(15,894 \pm 0,005)$ W, com $R^2 = 0,996$, indicando uma boa correlação linear, e a amostra apresenta uma degradação em sua superfície, com formação de alguns caminhos condutores, representando a fase d do modelo de Malik (FIGURA 9);

3ª. Em Azul, corresponde a uma inclinação de $(94,470 \pm 0,005)$ W, com $R^2 = 0,995$, indicando uma boa correlação linear, e a amostra apresenta uma degradação pronunciada em sua superfície, com formação de vários caminhos condutores, representando a fase e do modelo de Malik (FIGURA 9);

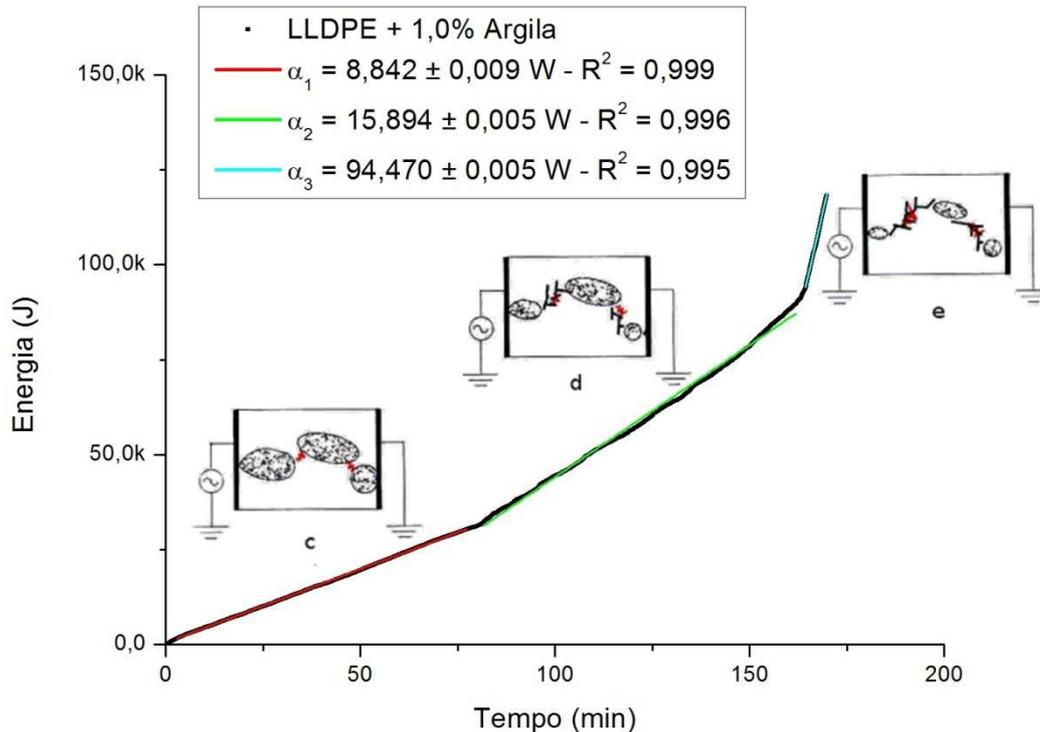


FIGURA 70 - ABSORÇÃO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UMA AMOSTRA DE COMPÓSITO POLIMÉRICO DE LLDPE COM 1,0% EM MASSA DE ARGILA MONTMORILONITA NOVAACLAY™
 FONTE: O autor (2014)

Os resultados referentes aos sinais de potência estão em concordância com a curva de absorção de energia, estes resultados exibem no final dos 0,3 s que são vistos na Figura 71-(a) uma queda no nível da potência absorvida pela amostra, já na Figura 71-(b) também verifica-se esta queda no nível da potência absorvida pela amostra no final dos 0,3 s no sinal de potência que são exibidos porém com uma queda menor e na Figura 71-(c) pode-se observar que não há queda no nível da potência absorvida pela amostra no final dos 0,3 s no sinal da potência.

Pode-se observar que esses sinais não são bons indicadores da diferença do grau de degradação da superfície do material, pois as diferenças apresentadas pelos sinais são muito pequenas, não fornecendo informações que possibilitem facilmente a identificação do estágio de degradação da superfície do material, tornando a análise da suportabilidade de materiais poliméricos, por estes sinais praticamente inviável.

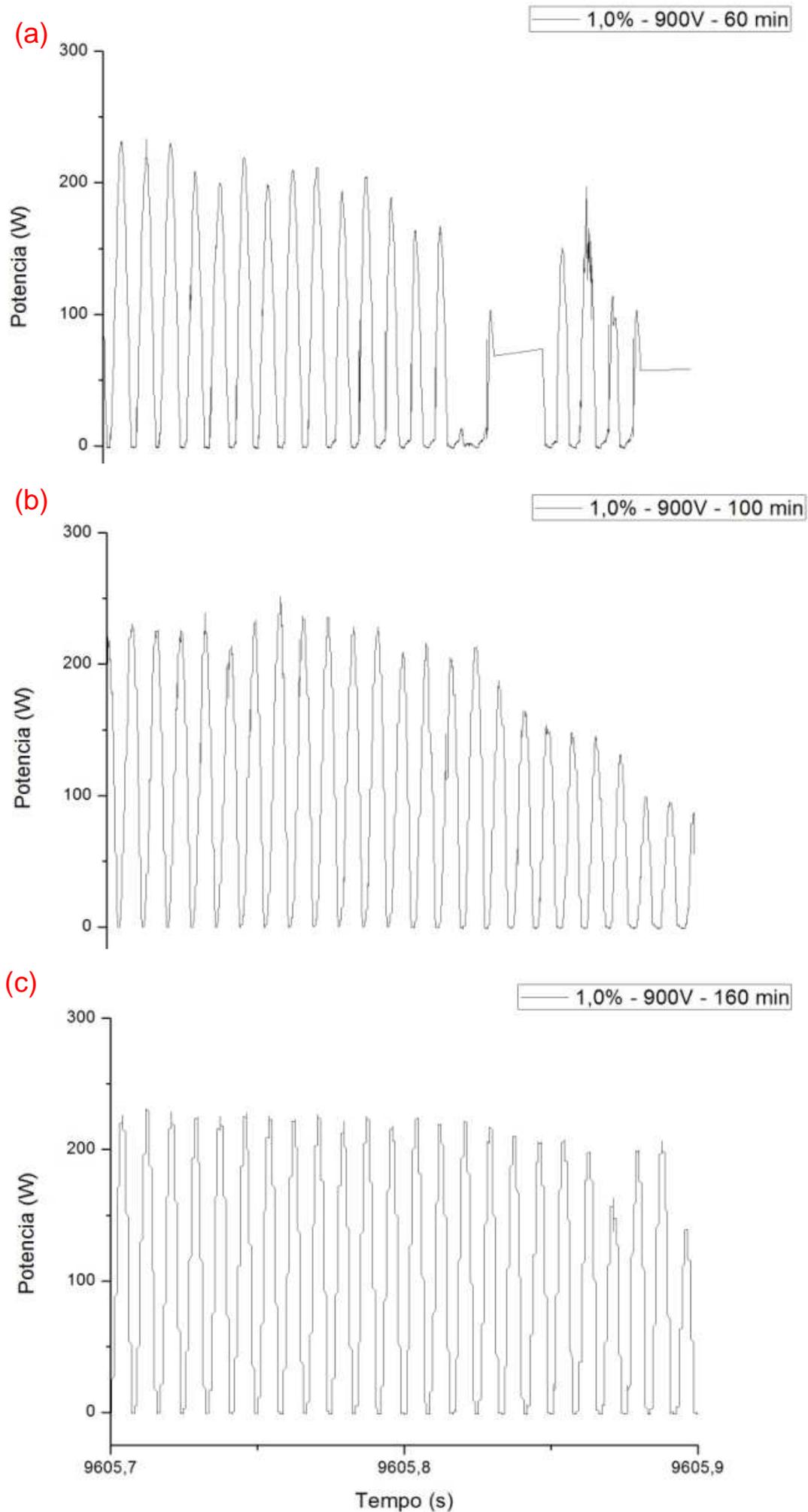


FIGURA 71 - SINAIS DA POTÊNCIA EM CADA NÍVEL DE DEGRADAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MATERIAL POLIMÉRICO (A) 60 MIN. DE ENSAIO (B) 100 MIN. DE ENSAIO (C) 160 MIN. DE ENSAIO
FONTE: O autor (2014)

4.8 RESULTADO SOBRE UMA AMOSTRA DE HDPE

Em um primeiro momento, a técnica desenvolvida neste trabalho, foi ajustada para a detecção do momento em que o LLDPE apresentava uma formação acentuada de trilhas, ou seja, apresentava trilhamento elétrico. O momento da ocorrência, desse fenômeno, pode ser observado com a mudança na inclinação da curva de absorção de energia, como foi verificado anteriormente, nas figuras 50, 52, 57, 62, 64, 66, 68 e 70.

Em seguida a técnica foi aplicada em amostras de HDPE, que exibiram resultados para mudança de inclinação da curva de absorção de energia similares aos vistos em amostras de LLDPE. Na Figura 72, esses resultados são apresentados. No primeiro trecho da curva (instantâneos anteriores a formação do trilhamento elétrico) observa-se uma inclinação de $(12,812 \pm 0,001)$ W e um ajuste linear com $R^2 = 0,999$, indicando uma excelente regressão linear. Já no segundo trecho da curva (instantâneos posteriores a formação do trilhamento elétrico) observa-se uma inclinação de $(21,498 \pm 0,001)$ W e um ajuste linear também de $R^2 = 0,999$, indicando uma excelente regressão linear. Observa-se que essa diferença, é de também, aproximadamente 2,0 vezes, assim como nas amostras de LLDPE anteriormente citadas.

Estes resultados, evidenciam que esta técnica pode ser extrapolada para outros materiais a base de polietileno.

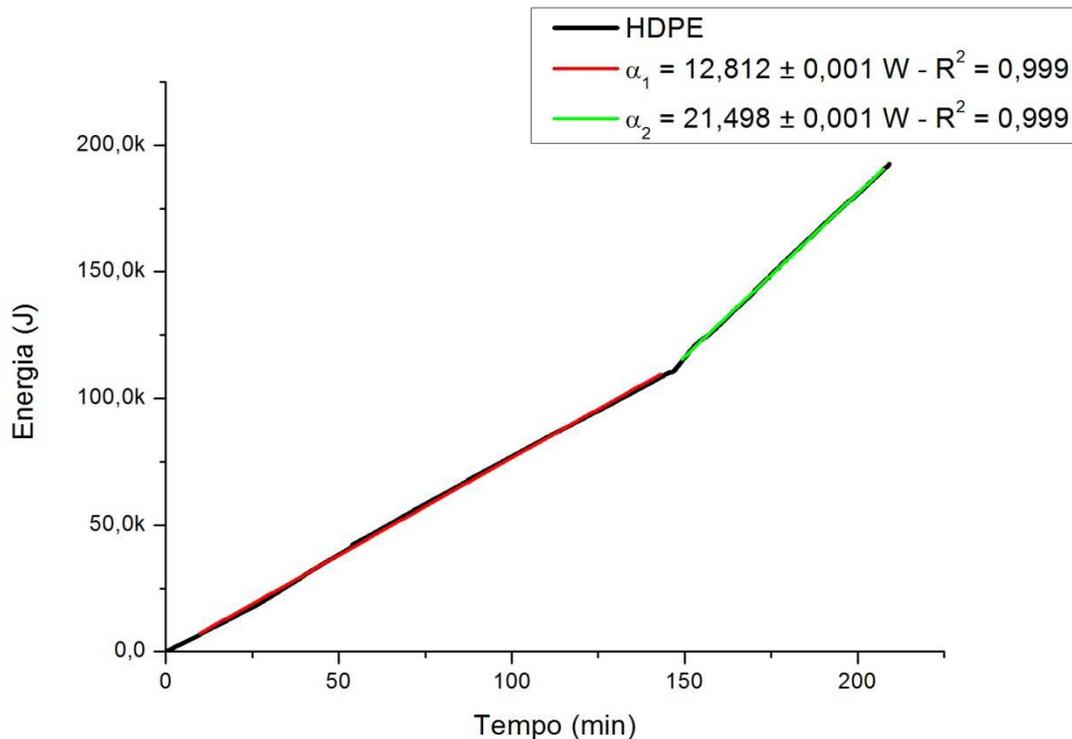


Figura 72 - CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA PARA POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (HDPE)
 FONTE: O autor (2014)

4.9 RESULTADO SOBRE UMA AMOSTRA DE BORRACHA DE SILICONE COMERCIAL

A aplicação desta técnica em materiais poliméricos com base diferente do que o polietileno, também apresentou resultados satisfatórios, como observado na Figura 73 sobre uma amostra de borracha de silicone. No primeiro trecho da curva (instantentes anteriores a formação do trilhamento elétrico) observa-se uma inclinação de $(17,303 \pm 0,001)$ W e um ajuste linear com $R^2 = 0,998$, indicando uma excelente regressão linear. Já no segundo trecho da curva (instantentes posteriores a formação do trilhamento elétrico) observa-se uma inclinação de $(31,079 \pm 0,002)$ W e um ajuste linear de $R^2 = 0,999$, indicando uma excelente regressão linear. Observa-se que essa

diferença, é de também, aproximadamente 2,0 vezes, assim como nas amostras de LLDPE e HDPE anteriormente citadas.

Estes resultados indicam que esta técnica também pode ser extrapolada para outros tipos de materiais poliméricos, além daqueles com base no polietileno.

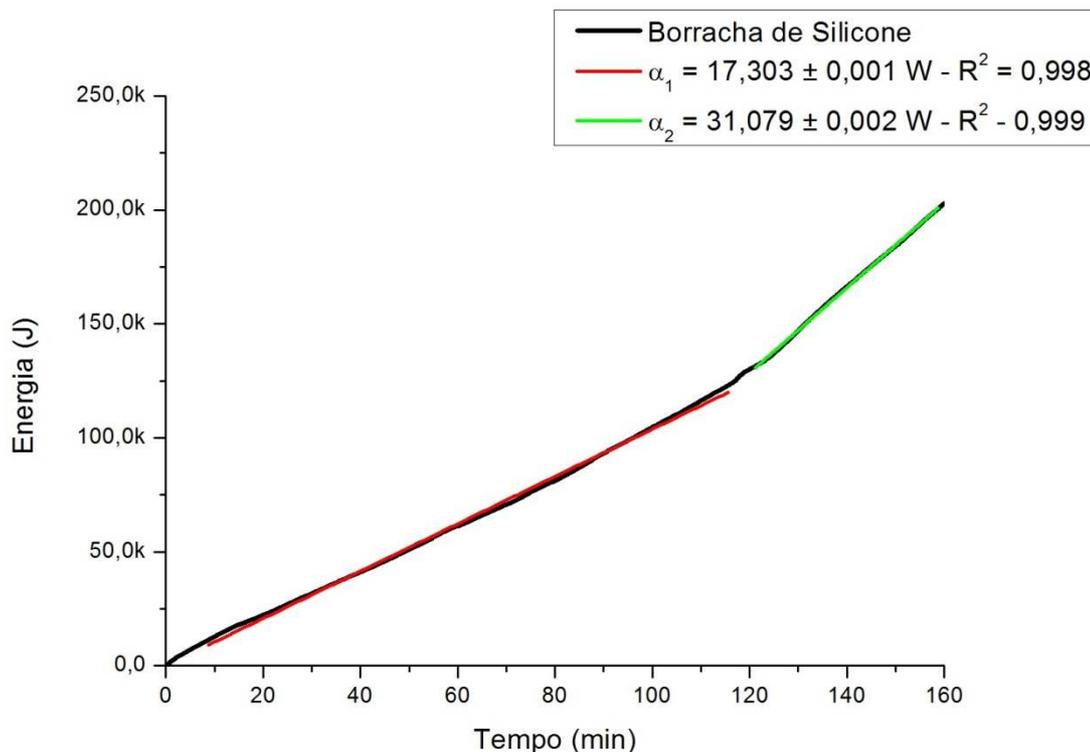


FIGURA 73 - CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA PARA BORRACHA DE SILICONE
 FONTE: O autor (2014)

4.10 RESULTADO SOBRE UMA AMOSTRA ALEATÓRIA DE COMPÓSITO POLIMÉRICO

Esta técnica mostrou-se eficiente também para o caso em que a amostra e a tensão aplicada não são conhecidas. Para a realização deste ensaio foi obtida uma amostra aleatória dentre as amostra de compósitos disponíveis (0,5% até 1,5% de argila montmorilonita). A amostra foi limpa com álcool isopropílico e posicionada sob os eletrodos. Fez-se o ajuste de tensão até que as descargas na superfície da amostra fossem suficientes para degradar a

superfície, de acordo com a experiência do operador. Na Figura 74 observa-se o resultado sobre uma amostra desconhecida, onde nos primeiros instantes tem-se uma taxa de absorção de energia da ordem de 21,7 W. Com a evolução da degradação da amostra essa taxa avança para 43,7 W. Indicando que a superfície da amostra entrou no regime onde há trilhas em sua superfície devido ao trilhamento elétrico, portanto deverá ser substituída.

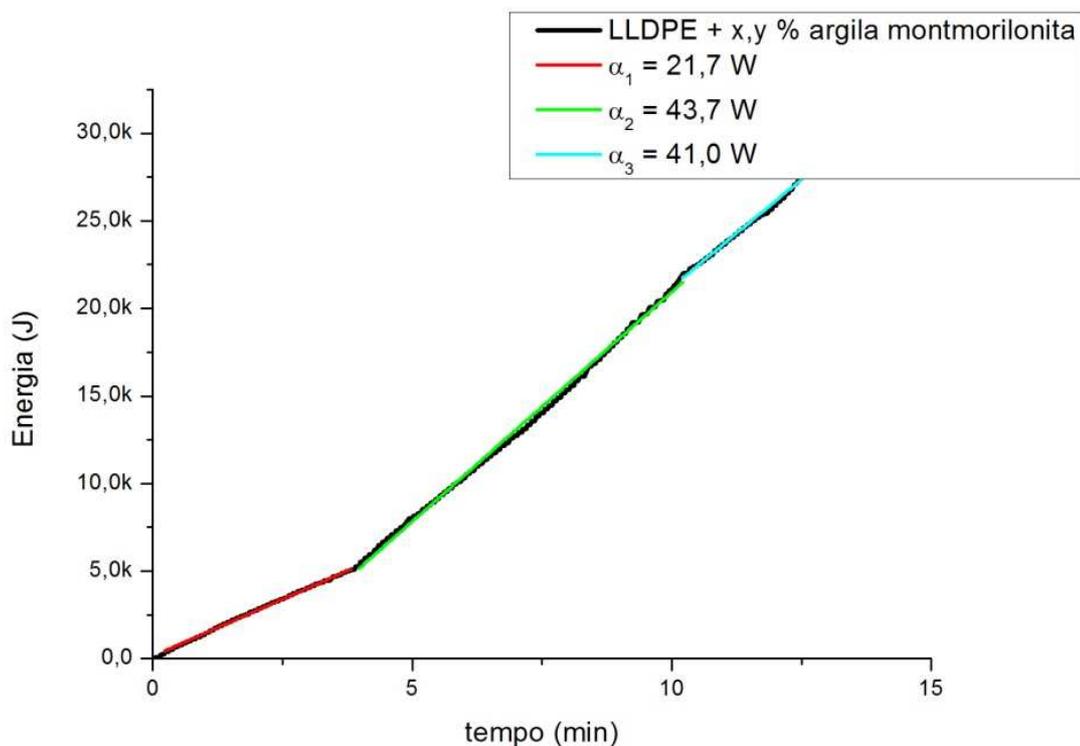


FIGURA 74 – CURVA DE ABSORÇÃO DE ENERGIA PARA POLIETILENO COM PERCENTUAL DESCONHECIDO DE ARGILA MONTMORILONITA
 FONTE: O autor (2014)

Esse resultado é importante, pois mostra que a técnica pode ser utilizada conhecendo-se pouco sobre as condições de ensaio, caso o interesse seja apenas no momento em que a amostra sofre uma variação em sua taxa de absorção de energia. Isso poderá ser útil para o acompanhamento em tempo real da suportabilidade de algum componente isolante no sistema.

5. CONCLUSÕES

A variação da inclinação na curva de absorção de energia, mostra-se um indicador do momento em que a amostra entra em uma nova fase de degradação e poderá, no futuro, ser utilizado como parâmetro de avaliação da resistência ao trilhamento elétrico.

O fator de forma da tensão aplicada à amostra, mostrou-se um parâmetro adequado para a separação dos dados que efetivamente contribuem na determinação da energia absorvida pela amostra durante o trilhamento elétrico.

O sistema de transferência de sinais por fibra óptica mostrou-se eficiente e com baixa atenuação do sinal de tensão e corrente. Entretanto, sua resposta em frequência poderia ser maior, pois foi possível observar que os sinais de corrente durante os instantes de transição rápida nos momentos de descargas superficiais apresentaram uma leve deformação em sua forma de onda. Pode-se observar que estas pequenas deformações não são significativas para este estudo, mesmo porque com essa deformação nas formas de onda da corrente, as amostras em estudo apresentaram diferenças nas inclinações das curvas de absorção de energia para os diferentes estágios de degradação da superfície polimérica.

O *software* desenvolvido para o tratamento dos dados foi de suma importância para o estudo, pois possibilitou a separação dos dados de interesse. Ou seja, os dados de tensão e corrente sobre as amostras durante as descargas superficiais, descartou todas as outras informações referentes a energia consumida pela evaporação do eletrólito e as informações de tensão e corrente nos instantes em que a amostra estava seca e, sem descargas relevantes em sua superfície. Dessa forma reduziu-se drasticamente o trabalho computacional.

O *software* desenvolvido para aquisição dos dados mostrou-se rápido e eficiente na coleta dos dados. Isto possibilitou que a coleta de dados fosse suficiente para exibição da diferença nas inclinações das curvas de absorção de energia e análise das formas de onda com base no fator de forma das ondas senoidais da tensão sobre a amostra.

Esta técnica desenvolvida, apresenta resultados promissores quanto a detecção do momento no qual o material polimérico entra em um estado de degradação por trilhamento elétrico, com base nas informações de tensão e corrente sobre a amostra. Pode-se obter a energia absorvida pela superfície da amostra durante as descargas superficiais e, com a análise dos dados dessa energia absorvida prever o momento de falha do material, por trilhamento elétrico.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Modificar o circuito de transmissão de sinais por fibra óptica de tal modo que se possa mudar o operacional para o LM 6172, que em testes preliminares está respondendo, sem deformação na forma de onda da corrente, até frequências de 5 MHz;
- Desenvolver um *software* de aquisição, tratamento e visualização da energia absorvida durante as descargas superficiais em tempo real;
- Estabelecer uma grandeza física para resistência ao trilhamento elétrico, algo como W/mm, W/mm² ou outros parâmetros que se mostrarem mais adequados;
- Realizar estudos de resistência ao trilhamento elétrico com a técnica de absorção de energia em outros materiais poliméricos;
- Estabelecer uma relação entre a massa perdida pela amostra durante o ensaio com a energia dissipada;
- Sugerir aos comitês responsáveis pelas normas técnicas a aplicação desta técnica como um novo parâmetro para avaliação de materiais isolantes.

7. BIBLIOGRAFIA

AKCELRUD, L. FUNDAMENTOS DA CIÊNCIA DOS POLÍMEROS. SÃO PAULO, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ELECTRICAL INSULATING MATERIALS. 1376. ED. BALTIMORE: ASTM, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. STANDARD TEST METHOD FOR DUST-AND-FOG TRACKING AND EROSION RESISTANCE OF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS. ASTM. 2001. (D2132).

AMIN, M.; AKBAR, M.; KHAN, M. N. AGING INVESTIGATIONS OF POLYMERIC INSULATORS: OVERVIEW AND BIBLIOGRAPHY. ELECTRICAL INSULATION MAGAZINE, IEEE, JULY/AUGUST 2007. 44-50.

BECKER, M. R. PREPARAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE MISTURAS DE POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE COM POLIETILENO LINEAR DE BAIXA DENSIDADE. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE MATERIAIS, UFRGS. PORTO ALEGRE, P. 70. 2002.

BEN AMOR I., A. M. . K. A. EFFECT OF MALEIC ANHYDRIDE ON DIELECTRIC PROPERTIES OF NATURAL FIBER COMPOSITE. JOURNAL OF ELECTROSTATICS, V. 72, N. 2, P. 156-160, JANUARY 2014.

BLUME, S. W. ELECTRIC POWER SYSTEM BASICS FOR THE NONELECTRICAL PROFESSIONAL. IEEE PRESS, 2007.

CALLISTER, W. D. J. CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO. 5A. ED. ED. RIO DE JANEIRO: LTC, 2002.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; MARIA, L. C. S. POLIETILENO: PRINCIPAIS TIPOS, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES. POLÍMEROS: CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2003. 1-13.

DÁVI, G. A. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DE TERMINAÇÕES POLIMÉRICAS DE CABOS ISOLADOS DE MÉDIA TENSÃO. CURITIBA: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2008.

DENSLEY, J.; BARTNIKAS, R.; BERNSTEIN, B. S. MULTI-STRESS AGEING OF EXTRUDED INSULATION SYSTEMS FOR TRANSMISSION CABLES. ELECTRICAL INSULATION MAGAZINE, IEEE, JANUARY/FEBRUARY 1993. 15-17.

DU, B. X. ET AL. APPLICATION OF NONLINEAR METHODS IN TRACKING FAILURE TEST OF EPOXY/SIO₂ NANOCOMPOSITE. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID DIELECTRICS. POTSDAM, GERMANY. 2010.

DU, B. X.; DONG, D. S.; ZHENG, X. L. CHAOS ANALYSIS OF SCINTILLATION DISCHARGE BASED ON TRACKING TEST OF GAMMA-RAY IRRADIATED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID DIELECTRICS. WINCHESTER, UK. 2007.

DU, B. X.; LIU, H. J. THE APPLICATION OF RECURRENCE PLOT IN DC TRACKING TEST OF GAMMA-RAY IRRADIATED POLYCARBONATE. IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION, FEBRUARY 2009. 17-23.

DU, B.; KOBAYASHI, S. WAVELET ANALYSIS OF SCINTILLATION DISCHARGE CURRENT ON DC TRACKING RESISTANCE OF GAMMA-RAY IRRADIATED POLYETHYLENE AND MODIFIED POLYCARBONATE. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDUCTION AND BREAKDOWN IN SOLID DIELECTRICS. VASTERAS, SWEDEN. 1998.

ECKMANN, J. P.; KAMPHORST, S. O.; RUELLE, D. RECURRENCE PLOTS OF DYNAMICAL SYSTEMS. EUROPHYS LETT., VOL.4, 1987. 973-977.

EL-HAG, A. H.; MEYER, L. H.; NADERIAN, A. EXPERIENCE WITH SALT-FOG AND INCLINED-PLANE TESTS FOR AGING POLYMERIC INSULATORS AND MATERIALS. ELECTRICAL INSULATION MAGAZINE, IEEE, MARCH/APRIL 2010. 42-50.

ESTEVEES, A. C. C.; BARROS-TIMMONS, A.; TRINDADE, T. NANOCOMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA: ESTRATÉGIAS DE SÍNTESE DE MATERIAIS HÍBRIDOS. QUÍMICA NOVA, SÃO PAULO, SEPTEMBER/OCTOBER 2004. 798-806.

FELDMAN, D.; A. BARBALATA, A. SYNTHETIC POLYMERS – TECHNOLOGY PROPERTIES, APPLICATIONS. 1ST. ED. LONDRES: CHAPMAN & HALL, 1996.

GIANNELIS, E. P.; KRISHNAMOORTI, R.; MANIAS, E. POLYMER-SILICATE NANOCOMPOSITES: MODEL SYSTEMS FOR CONFINED POLYMERS AND POLYMER BRUSHES. POLYMERS IN CONFINED ENVIRONMENTS ADVANCES IN POLYMER SCIENCE, V. 138, P. 107-147, 1999.

HARTMANN, C. L. ET AL. DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS DE REDES PROTEGIDAS SOB CONDIÇÕES DE MULTIESTRESSAMENTO. ESPAÇO ENERGIA, CURITIBA, OUTUBRO 2008. 13-20.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE PROOF AND THE COMPARATIVE TRACKING INDICES OF SOLID INSULATING MATERIALS. IEC. GENEVRA. 2003. (60112).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. POLYMERIC INSULATORS FOR INDOOR AND OUTDOOR USE WITH A NOMINAL VOLTAGE >1 000 V – GENERAL DEFINITIONS, TEST METHODS AND ACCEPTANCE CRITERIA, 2005.

INFINEON TECHNOLOGIES - DATA SHEET SFH 756V - PLASTIC FIBER OPTIC TRANSMITTER DIODE. 2004 DISPONIVEL EM <
[HTTP://MEDIA.DIGIKEY.COM/PDF/DATA%20SHEETS/INFINEON%20PDFS/SFH756_756V.PDF](http://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/infineon%20pdfs/sfh756_756v.pdf)> ACESSADO EM 20/02/2012

INFINEON TECHNOLOGIES - DATA SHEET SFH 250V - PLASTIC FIBER OPTIC PHOTODIODE DETECTOR. 2004 DISPONIVEL EM <

[HTTP://MEDIA.DIGIKEY.COM/PDF/DATA%20SHEETS/INFINEON%20PDFS/SFH250,%20250V.PDF](http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Infineon%20PDFS/SFH250,%20250V.PDF)> ACESSADO EM 20/02/2012

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ELECTRICAL INSULATING MATERIALS USED UNDER SEVERE AMBIENT CONDITIONS - TEST METHODS FOR EVALUATING RESISTANCE TO TRACKING AND EROSION. IEC. GENEVRA. 2007. (60587).

KAREN, T. M. D. A. J. R. RECURRENCE PLOT FEATURES: AN EXAMPLE USING ECG. 15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SIGNAL PROCESSING AND ITS APPLICATIONS. BRISBANE, AUSTRALIA. 1999. P. 22-25.

KOZAK, M.; DOMKA, L. ADSORPTION OF THE QUATERNARY AMMONIUM SALTS ON MONTMORILLONITE. JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLIDS, V. 65, N. 2-3, P. 441-445, MARCH 2004.

LAI M., Y. S. . S. R. CERAMIC/POLYMER COMPOSITES WITH ENHANCED PERMITTIVITY AND LOW DIELECTRIC LOSS THROUGH GRAFTING MODIFICATION OF POLYMER MATRIX BY POLYETHYLENE GLYCOL. MATERIALS LETTERS, 122, 29 JANUARY 2014. 45-48.

LEE, S. Y.; KIM, S. J. EXPANSION CHARACTERISTICS OF ORGANOCCLAY AS A PRECURSOR TO NANOCOMPOSITES. COLLOIDS AND SURFACES A: PHYSICO-CHEMICAL AND ENGINEERING ASPECTS, V. 211, N. 1, P. 19-26, NOVEMBER 2002.

MALIK, N. H. ELECTRICAL INSULATION IN POWER SYSTEMS. POWER ENGINEERING. MARCEL DEKKER, 1998.

MARAN, M. A. FOZ UNIOESTE, 2010. DISPONIVEL EM: <[HTTP://WWW.FOZ.UNIOESTE.BR/~LAMAT/DOWNCOMPENDIO/COMPENDIOV1.PDF](http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downcompendio/compendioV1.pdf)>. ACESSO EM: 17 JANEIRO 2014.

MARINHO, J. R. D. MACROMOLÉCULAS E POLÍMEROS. SÃO PAULO: MANOLE, 2005.

MARK, J. E. POLYMER DATA HANDBOOK. NOVA YORK. 1999.

MINISINI, B.; TSOBNANG, F. MOLECULAR MECHANICS STUDIES OF SPECIFIC INTERACTIONS IN ORGANOMODIFIED CLAY NANOCOMPOSITE. , 2004. COMPOSITES PART A: APPLIED SCIENCE AND MANUFACTURING, APRIL 2005. 531-537.

MODERN PLASTICS MAGAZINE. PLASTICS HANDBOOK. NEW YORK: MACGRAW-HILL, 1994.

MUNARO, M.; AKCELRUD, L. POLYETHYLENE BLENDS: A CORRELATION STUDY BETWEEN MORPHOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESISTANCE. POLYMER DEGRADATION AND STABILITY, 2008. 43-49.

NIMMAGADDA V. K., S. M. M. M. . K. R. INVESTIGATION OF DIELECTRIC PROPERTIES OF INDUSTRIAL WASTE REINFORCED PARTICULATE POLYMER COMPOSITES. ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, 3 FEBRUARY 2014. 6.

OTHMAN M. B. H., M. N. A. S. . A. H. M. A. Z. DEPENDENCE OF THE DIELECTRIC CONSTANT ON THE FLUORINE CONTENT AND POROSITY OF POLYIMIDES. JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE, V. 121, N. 6, P. 3192-3200, 2011.

PEACOCK, A. J. HANDBOOK OF POLYETHYLENE: STRUCTURES, PROPERTIES. NOVA YORK. 2000.

PETER BARBER, S. B. Y. A. S. G. A. W. H. G. H. J. P. H.-C. Z. L. POLYMER COMPOSITE AND NANOCOMPOSITE DIELECTRIC MATERIALS FOR PULSE POWER ENERGY STORAGE. MATERIALS , 2009. 1697-1733.

PLUART, L. L. ET AL. RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ORGANOCCLAY SUSPENSIONS IN EPOXY NETWORK PRECURSORS. APPLIED CLAY SCIENCE, V. 25, N. 3-4, P. 207-219, JUNE 2004.

RABELLO, M. ADITIVAÇÃO DE POLÍMEROS. SÃO PAULO: ARTILIBER, 2000.

REED, C. ADVANCES IN POLYMER DIELECTRICS OVER THE PAST 50 YEARS. IEEE ELECTRICAL INSULATION MAGAZINE, JULY-AUGUST 2013. 58-62.

SANTOS, P. S. CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ARGILAS. 2A ED. ED. SÃO PAULO: EDGARD BLÜCHER, V. V. 1, 1989.

SHAH, J. M. A. M. POLYMER OUTDOOR INSULATING MATERIALS - PART. I: COMPARASION OF PORCELAIN AND POLYMER ELECGRICAL INSULATION. ELECTRICAL INSULATION MAGAZINE, IEEE, 1997. 5-12.

SHORT, T. A. ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION - HANDBOOK. BOCA RATON, LONDON, NEW YORK, WASHINGTON D.C.: CRC PRESS, 2003.

THOMAZINI, D. CLASSIFICAÇÃO DA HIDROFOBICIDADE EM ISOLADORES ELÉTRICOS POLIMÉRICOS DE ALTA TENSÃO. SÃO PAULO: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA, 2009.

TOMCZAK, F. CORRELAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO TRILHAMENTO ELÉTRICO. UFPR. CURITIBA, P. 86. 2000.

WIEBECK, H.; HARADA, J. PLÁSTICOS DE ENGENHARIA: TECNOLOGIA E APLICAÇÕES. SÃO PAULO. 2005.

WONG, A. C.-Y.; LAM, F. STUDY OF SELECTED THERMAL CHARACTERISTICS OF POLYPROPYLENE/POLYETHYLENE BINARY BLENDS USING DSC AND TGA. POLYMER TESTING, V. 21, P. 691-696, 2002.

XI, Y. ET AL. STRUCTURE OF ORGANOCCLAYS – AN X-RAY DIFFRACTION AND THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS STUDY. JOURNAL OF COLLOID AND INTERFACE SCIENCE, V. 277, N. 1, P. 116-120, SEPTEMBER 2004.

YUXING, R.; DAVUD, C. L. PROPERTIES AND MICROSTRUCTURES OF LOW-TEMPERATURE-PROCESSABLE ULTRALOW-DIELECTRIC POROUS

POLYIMIDE FILMS. JOURNAL OF ELECTRONIC MATERIALS, V. 37, N. 7, 2008.