



**Universidade Federal de Campina Grande**  
**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
**Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica**

KELLY DE OLIVEIRA SANTOS

**EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE TRILHAMENTO E  
EROSÃO EM ISOLAMENTOS POLIMÉRICOS**

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2016

KELLY DE OLIVEIRA SANTOS

EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE TRILHAMENTO E  
EROSÃO EM ISOLAMENTOS POLIMÉRICOS

*Dissertação apresentada à Coordenação do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande, como parte dos requisitos necessários  
para obtenção do grau de Mestre em Ciências  
no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientadores:

Prof. Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.

Prof. André Dantas Germano, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S237e Santos, Kelly de Oliveira.  
Equipamento para ensaio de trilhamento e erosão em materiais isolantes elétricos / Kelly de Oliveira Santos. – Campina Grande, 2016.  
84 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

"Orientação: Prof. D. Sc. Raimundo Carlos Silvério Freire".  
Referências.

1. Isolamentos Poliméricos. 2. Trilhamento. 3. Erosão. 4. IEC 60587.  
5. Ensaios. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Título.

CDU 621.315.62(043)

**"EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE TRILHAMENTO E EROSÃO EM ISOLAMENTOS  
POLIMÉRICOS"**

**KELLY DE OLIVEIRA SANTOS**

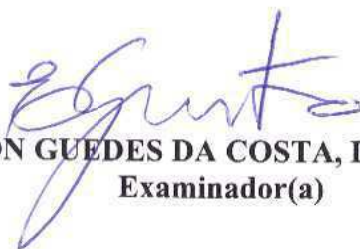
**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 15/03/2016**



**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG  
Orientador(a)**



**ANDRÉ DANTAS GERMANO, Dr., UFCG  
Orientador(a)**



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG  
Examinador(a)**



**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG  
Examinador(a)**

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Dedico esse trabalho, em especial, aos meus pais  
e familiares, pelo constante apoio.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força, sabedoria e por guiar os meus passos me possibilitando chegar até aqui.

Agradeço a meus pais, Walclécio da Conceição Santos e Silvana de Oliveira Santos, pelo amor incondicional, ensinamentos e por todo apoio nos momentos de dificuldades.

Agradeço a todos os meus familiares, que apesar de distantes, me acompanharam e apoiaram em todos os momentos.

Agradeço a Maicon Soares Silva por toda a motivação, paciência e amor. Que mesmo distante estava presente em meus pensamentos me dando forças para vencer mais essa etapa. Te amo muito.

Aos meus orientadores Raimundo Carlos Silvério Freire e André Dantas Germano pelo acompanhamento e incentivo durante todas as etapas dessa pesquisa.

Ao professor Edson Guedes da Costa pelos ensinamentos e pelo apoio.

Ao professor Tarso Vilela Ferreira por toda a contribuição para o desenvolvimento da pesquisa, pela paciência, apoio e incentivo.

Agradeço a Alfredo Irineu da Silva Neto por toda a ajuda no desenvolvimento do trabalho, bem como a paciência em acompanhar os ensaios.

Agradeço a Selma Alves de Oliveira, antiga colega e nova amiga pelo apoio, pela companhia e pela paciência durante todo o desenvolvimento desse trabalho. Foi difícil, enfrentamos muitos problemas, mas conseguimos chegar até aqui.

Aos meus colegas de pós-graduação que consciente ou inconscientemente ajudaram no meu desenvolvimento acadêmico e pela companhia nesta caminhada.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Alta Tensão (LAT) por toda a ajuda na montagem do equipamento. Em especial a Higor da Costa Rocha, por toda a assistência e pela disposição em sempre ajudar.

Agradeço ao Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), em especial a Daniella Cibele Bezerra, pela infraestrutura concedida para o preparo das amostras utilizadas neste trabalho.

Agradeço ao Laboratório de Metrologia de Campina Grande (LabMet), na pessoa da Professora Rucilana Patrícia Bezerra Cabral, Coordenadora do Laboratório de Caracterização de Óleos (LabCOL), pelos materiais disponibilizados para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa Jovens Talentos e a Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPELE) pelo apoio financeiro.

A todos que estiveram comigo nessa caminhada me dando forças e contribuindo para a realização deste trabalho.

Kelly de Oliveira Santos

*“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente,  
mas o que melhor se adapta às mudanças.”*

Charles Darwin



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia de um projeto para a construção de um equipamento capaz de verificar a resistência dos isolamentos poliméricos aos fenômenos de trilhamento e erosão, como o proposto na norma IEC 60587 (2007), a qual propõe ensaios sobre um plano inclinado. Devido ao alto valor do equipamento de ensaio, faz-se necessário o desenvolvimento de um equipamento eficaz e de baixo custo para a medição da resistência ao trilhamento e erosão. O desenvolvimento do novo mecanismo tem por finalidade estudar alguns materiais isolantes elétricos sob severas condições ambientais. O equipamento será utilizado na avaliação de novos materiais ou revestimentos poliméricos a serem aplicados em isoladores com o intuito de mitigar a corrente de fuga e aumentar a sua suportabilidade elétrica. De maneira a contribuir com a sedimentação do conhecimento sobre a execução dos testes de trilhamento e erosão em materiais poliméricos, foram realizados alguns ensaios. Os estudos realizados utilizaram amostras à base de borracha de silicone com cargas de alumina trihidratada e nanosílica em diferentes concentrações. Após a realização dos ensaios, tomando como base os resultados obtidos, foram realizadas algumas análises estatísticas. Por fim, constatou-se que a utilização das cargas aumentou a resistência das amostras aos fenômenos de trilhamento e erosão.

**Palavras-chave:** trilhamento, erosão, IEC 60587, revestimentos poliméricos, ensaios, análise estatística.

# ABSTRACT

This work proposes to present the methodology of a project for the construction of an equipment able to check the resistance of polymeric insulation to tracking and erosion, as proposed in the standard IEC 60587 (2007), which proposes tests on an inclined plane. Due to the high value of the test equipment, it is necessary to develop an effective and low-cost equipment for the measurement of tracking and erosion resistance. The development of the new mechanism aims to study some electric insulating materials under severe environmental conditions. The equipment will be used in the evaluation of new polymeric materials and coatings to be applied on insulators in order to mitigate the leakage current and increase your electrical supportability. In order to contribute to the sedimentation of knowledge on implementation of tracking and erosion tests in polymeric materials, some trials were carried out. The studies used samples based on silicone rubber with loads of alumina trihydrate and nanosilica at different concentrations. After the tests, based on the results, there were some statistical analysis. Finally, it was found that the use of these loads increased the resistance of the samples to the tracking and erosion.

**Key-words:** tracking, erosion, IEC 60587, polymeric coating, experiments, statistical analysis

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Superfícies hidrofóbicas.....	21
<b>Figura 2.</b> Processo de trilhamento elétrico. ....	23
<b>Figura 3.</b> Placa do Arduino.....	24
<b>Figura 4.</b> IDE do Arduino.....	26
<b>Figura 5.</b> Diagrama de blocos de processamento utilizando o Arduino.....	26
<b>Figura 6.</b> Configuração do teste “Admiralty”.....	29
<b>Figura 7.</b> Sistema “Admiralty” modificado.....	29
<b>Figura 8.</b> Câmera de ensaio “Dust-and-Fog-Test”. ....	30
<b>Figura 9.</b> Amostra para ensaio com perfurações para a fixação dos eletrodos; todas as grandezas em milímetros. ....	36
<b>Figura 10.</b> Bureta graduada. ....	36
<b>Figura 11.</b> Filtro de papel; todas as dimensões em milímetros. ....	37
<b>Figura 12.</b> Transformador.....	38
<b>Figura 13.</b> Vistas frontal e superior do transformador. ....	38
<b>Figura 14.</b> Esquema dos enrolamentos do transformador. ....	39
<b>Figura 15.</b> Variac. ....	40
<b>Figura 16.</b> Contator.....	40
<b>Figura 17.</b> Resistores utilizados.....	41
<b>Figura 18.</b> Placa do microcontrolador utilizado. ....	41
<b>Figura 19.</b> Display LCD. ....	42
<b>Figura 20.</b> Relé. ....	42
<b>Figura 21.</b> Modelo 3D da base em acrílico empregada como suporte das amostras nos ensaios. ....	43
<b>Figura 22.</b> Diagrama esquemático do circuito.....	44
<b>Figura 23.</b> Diagrama de blocos da rotina de monitoramento da corrente de fuga. ....	46
<b>Figura 24.</b> Eletrodo superior, de alta tensão; todas as dimensões em milímetros.....	47
<b>Figura 25.</b> Eletrodo inferior, de terra; todas as dimensões em milímetros.....	47
<b>Figura 26.</b> Esquema do equipamento de ensaio. ....	48
<b>Figura 27.</b> Base confeccionada.....	50
<b>Figura 28.</b> Sistema de gotejamento. ....	51

<b>Figura 29.</b> Ventilador industrial. ....	<b>52</b>
<b>Figura 30.</b> Montagem da estrutura elétrica. ....	<b>52</b>
<b>Figura 31.</b> Fusível para proteção. ....	<b>53</b>
<b>Figura 32.</b> Resistor shunt com gap de proteção. ....	<b>53</b>
<b>Figura 33.</b> Montagem para abertura do circuito. ....	<b>54</b>
<b>Figura 34.</b> Eletrodo de alta tensão. ....	<b>55</b>
<b>Figura 35.</b> Eletrodo de terra. ....	<b>55</b>
<b>Figura 36.</b> Eletrodo de alta tensão degradado a 3,5 kV. ....	<b>55</b>
<b>Figura 37.</b> Eletrodo de terra degradado a 3,5 kV. ....	<b>56</b>
<b>Figura 38.</b> Amostras antes da realização dos ensaios. ....	<b>57</b>
<b>Figura 39.</b> Efeito das descargas elétricas sobre a superfície de uma das amostras. ....	<b>58</b>
<b>Figura 40.</b> Amostras após os ensaios à tensão de 2,5 kV. ....	<b>59</b>
<b>Figura 41.</b> Amostras após os ensaios à tensão de 3,5 kV. ....	<b>60</b>
<b>Figura 42.</b> Gráfico gerado para comprovar a correlação ‘forte’ entre as grandezas ‘ $t \times m$ ’. ....	<b>68</b>
<b>Figura 43.</b> Gráfico gerado mostrando a correlação ‘moderada’ entre as grandezas ‘ $t \times e$ ’. ....	<b>69</b>
<b>Figura 44.</b> Gráfico gerado mostrando a correlação ‘moderada’ entre as grandezas ‘ $q \times e$ ’. ....	<b>69</b>
<b>Figura 45.</b> Gráfico gerado mostrando a correlação ‘muito fraca’ entre as grandezas ‘ $q \times m$ ’. ....	<b>70</b>
<b>Figura 46.</b> Gráfico gerado para comprovar a correlação ‘forte’ entre as grandezas ‘ $e \times m$ ’. ....	<b>72</b>
<b>Figura 47.</b> Gráfico gerado para comprovar a correlação ‘fraca’ entre as grandezas ‘ $t \times T$ ’. ....	<b>73</b>
<b>Figura 48.</b> Correlação linear com $\rho = 1$ entre as variáveis X e Y. ....	<b>84</b>
<b>Figura 49.</b> Correlação linear com $\rho = 0$ entre as variáveis X e Y. ....	<b>84</b>
<b>Figura 50.</b> Correlação linear com $\rho = -1$ entre as variáveis X e Y. ....	<b>84</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Síntese da revisão bibliográfica. ....	<b>33</b>
<b>Tabela 2.</b> Parâmetros de ensaio. ....	<b>45</b>
<b>Tabela 3.</b> Valores de trilhamento, erosão e massa perdida à 2,5 kV. ....	<b>59</b>
<b>Tabela 4.</b> Tempo de duração dos ensaios. ....	<b>61</b>
<b>Tabela 5.</b> Valores de trilhamento, erosão e massa perdida à 3,5 kV. ....	<b>61</b>
<b>Tabela 6.</b> Valores de trilhamentos medidos nos ensaios. ....	<b>63</b>
<b>Tabela 7.</b> ANOVA para valores de trilhamento. ....	<b>64</b>
<b>Tabela 8.</b> Valores de erosão medidos nos ensaios. ....	<b>65</b>
<b>Tabela 9.</b> ANOVA para valores de erosão. ....	<b>66</b>
<b>Tabela 10.</b> Valores correspondentes as variáveis de análise submetidas à tensão de 2,5 kV. ....	<b>67</b>
<b>Tabela 11.</b> Valores correspondentes as variáveis de análise submetidas à tensão de 3,5 kV . ....	<b>71</b>
<b>Tabela 12.</b> Análise de variância para um delineamento em blocos casualizados. ....	<b>81</b>
<b>Tabela 13.</b> Interpretação dos coeficientes de correlação. ....	<b>83</b>

# LISTA DE ABREVIATURAS

A/D	Analógico Digital
ANOVA	Analysis of Variance
ATH	Alumina Tri-Hidratada
CE	Epóxi Cicloalifática
CPU	Unidade Central de Processamento
CU	Unidade de Controle
DBC	Delineamento em Blocos Casualizados
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
EPDM	Monômero de Etileno Dieno Propileno
EPM	Monômero de Etileno Propileno
EVA	Acetato de Vinil Etileno
HVAC	High Voltage Alternating Current
IDE	Integrated Development Environment
gl	Grau de Liberdade
IEC	International Electrotechnical Commission
I/O	Input/Output
LaMMEA	Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas
LAT	Laboratório de Alta Tensão
PDMS	Polidimetilsiloxano
PTFE	Politetrafluoretileno
MQ	Média dos Quadrados ou Quadrados Médios
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
SQ	Soma dos Quadrados
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
ULA	Unidade Lógica Aritmética
USB	Universal Serial Bus

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	Motivação .....	17
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos.....	17
1.3	Organização do Trabalho.....	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
2.1	Isolamento Elétrico .....	19
2.1.1	Isolamentos Poliméricos .....	20
2.2	Arduino .....	24
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>28</b>
3.1	Principais Ensaios de Trilhamento e Erosão em Materiais Isolantes .....	28
3.2	Estudos sobre Trilhamento e Erosão Segundo a Norma IEC 60587 (2007) ...	30
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
4.1	Material.....	35
4.2	Métodos .....	43
4.2.1	Estrutura Mecânica.....	43
4.2.2	Estrutura Elétrica.....	44
4.2.3	Confecção dos Eletrodos.....	47
4.2.4	Métodos de Ensaio .....	48
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>50</b>
5.1	Construção do Equipamento.....	50
5.1.1	Estrutura Mecânica.....	50

5.1.2	Estrutura Elétrica.....	52
5.1.3	Confecção dos Eletrodos.....	54
5.2	Ensaio de Trilhamento e Erosão.....	56
5.2.1	Ensaio à Tensão de 2,5 kV.....	58
5.2.2	Ensaio à Tensão de 3,5 kV.....	60
5.2.3	Resultados Gerais dos Ensaio.....	62
5.3	Análises Estatísticas dos Ensaio.....	62
5.3.1	Análise de Variância para o Trilhamento.....	63
5.3.2	Análise de Variância para a Erosão.....	65
5.3.3	Análise de Correlação a Tensão de 2,5 kV.....	66
5.3.4	Análise de Correlação a Tensão de 3,5 kV.....	70
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>74</b>
6.1	Trabalhos Futuros.....	75
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>81</b>
1	Análise de Variância.....	81
2	Análise de Correlação.....	83



# 1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos presentes nos sistemas de transmissão e distribuição de energia são constituídos por diversos tipos de materiais, entre eles estão os materiais isolantes, que apresentam alta resistividade elétrica. Historicamente, os principais materiais empregados no isolamento desses sistemas são a porcelana e o vidro, porém, nas últimas décadas, os isolantes poliméricos vêm ganhando espaço no setor elétrico. A substituição se deve a algumas vantagens dos materiais poliméricos, como resistência ao vandalismo e sua hidrofobicidade.

Apesar das vantagens em utilizar isolantes poliméricos, eles apresentam algumas limitações na forma de envelhecimento superficial. Eles geralmente ficam expostos a chuvas, calor, radiação solar e poluentes, o que pode causar uma redução no desempenho do material, alterando suas propriedades mecânicas e dielétricas.

A constante exposição a contaminantes tais como maresia, poeira, fuligem e outros depósitos, na presença de umidade, formam um filme contínuo que diminui a resistividade superficial dos materiais poliméricos, criando assim condições para se estabelecerem correntes entre pontos de diferentes potenciais elétricos na superfície do material. Estas correntes, quando presentes no filme condutor, ocasionam um aumento de temperatura, podendo provocar evaporações não uniformes, originando as bandas secas. Desse modo, ocorre um aumento da tensão elétrica nas regiões entre as bandas secas, provocando descargas superficiais nos materiais, podendo causar os fenômenos de trilhamento e erosão nos materiais.

O monitoramento dos isolantes elétricos é indispensável, pois as falhas nos isolamentos são as principais causas das interrupções no fornecimento de energia elétrica, acarretando grandes prejuízos para os consumidores e concessionárias. Devido à crescente utilização dos materiais poliméricos como isolantes elétricos, criou-se a necessidade de avaliar a sua capacidade de suportarem o trilhamento e a erosão.

O fenômeno do trilhamento pode ser definido como a formação de um caminho condutor permanente na superfície do material isolante, devido à presença de descargas superficiais (SILVA, 2014). Quando essas descargas ocorrem numa região localizada, ocasiona a erosão, sendo isto a perda gradual de massa.

Devido a falhas ocasionadas por trilhamento e erosão, é importante o domínio de execução dos ensaios desses fenômenos. Atualmente, os equipamentos que realizam esses testes apresentam valores extremamente altos, o que leva a uma necessidade de criação de um sistema de baixo custo que realize tais ensaios.

Além da realização dos ensaios, a partir dos resultados obtidos nos testes de trilhamento e erosão foram efetuadas algumas análises estatísticas. As análises feitas, apesar de mostrarem uma limitação em relação ao número de amostras utilizadas, apresentaram resultados precisos comparados a resultados somente visuais.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Dentre os métodos de verificação da resistência dos materiais aos fenômenos de trilhamento e erosão, destaca-se o proposto na norma IEC 60587 (2007), a qual utiliza um equipamento elétrico para realizar ensaios sobre um plano inclinado.

Atualmente, os instrumentos existentes para a realização dos ensaios de trilhamento e erosão apresentam um alto custo financeiro. Devido a esse fato, viu-se a necessidade do desenvolvimento de um novo dispositivo de baixo custo com a finalidade de avaliar os isolamentos poliméricos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um equipamento para a realização de ensaios de trilhamento e erosão em materiais isolantes elétricos de acordo com a norma IEC 60587 (2007) e realizar análises estatísticas dos resultados obtidos.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Internalizar e sedimentar no grupo de pesquisa o domínio de execução dos ensaios de trilhamento e erosão em material polimérico;
- Propor uma metodologia que poderá ser empregada em estudos similares a construção de equipamentos que envolvam outros tipos de ensaios;

- Realizar ensaios de modo a verificar o desempenho de materiais poliméricos diante dos fenômenos de trilhamento e erosão;
- Realizar análises estatísticas a partir dos resultados dos ensaios de trilhamento e erosão;
- Construir um equipamento protótipo, capaz de realizar ensaios de trilhamento e erosão, de forma a contribuir com o Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos, a estrutura desta dissertação será apresentada a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica básica. Dentre os assuntos abordados, são discutidos os principais no que se refere a isolamentos elétricos e ao microcontrolador empregado no controle do protótipo desenvolvido, baseado na plataforma Arduino.

Em seguida, no Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre ensaios em materiais isolantes e sobre trabalhos que abordam o estudo sobre trilhamento e erosão segundo a norma IEC 60587 (2007).

No Capítulo 4 são descritos material e métodos empregados para a construção do equipamento, o qual realizará ensaios de trilhamento e erosão, enfatizando as etapas necessárias para a construção e desenvolvimento dos ensaios.

Posteriormente, no Capítulo 5 são apresentados os resultados e análises sobre a construção do equipamento de medição de trilhamento e erosão, assim como os resultados obtidos a partir de alguns ensaios realizados. Além disso, serão apresentadas também algumas análises estatísticas dos resultados dos ensaios.

Para finalizar, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões desta pesquisa e as propostas de trabalhos futuros.

Nos Anexos são apresentados alguns conceitos das análises estatísticas utilizadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão descritas a fundamentação teórica sobre isolamento elétrico e Arduino. Na seção sobre isolamento elétrico serão enfatizados os isolamentos poliméricos, destacando as suas vantagens e processos de envelhecimento. Já na seção de Arduino são destacadas as principais características da plataforma, na qual serão implementados os códigos do trabalho.

### 2.1 ISOLAMENTO ELÉTRICO

Com a crescente demanda de geração, transmissão e distribuição de energia, tem-se a necessidade de um sistema elétrico que funcione de maneira eficiente. É necessário então o monitoramento dos equipamentos que o compõe, evitando possíveis falhas, de modo a garantir a continuidade no fornecimento de energia aos consumidores.

Segundo Bezerra (2004), as falhas em isolamentos elétricos são as principais causas das interrupções no fornecimento de energia elétrica aos diversos consumidores supridos por um sistema de potência. Estas descontinuidades acarretam grandes prejuízos para consumidores e concessionárias de energia. A falha no isolamento de um transformador, por exemplo, pode resultar na queima do equipamento e na sua retirada do sistema elétrico. Outro exemplo é a falha em uma linha de transmissão, pois com a ruptura no isolamento externo de uma cadeia de isoladores ocorre o desligamento transitório ou permanente no sistema, embora não cause danos permanentes à cadeia de isoladores.

Então, com o intuito de minimizar as interrupções no sistema elétrico, é necessário o conhecimento dos elementos que fazem parte de sua constituição. O estudo do isolamento do sistema é fundamental, pois os materiais que o compõe são responsáveis pela redução de perdas, proporcionando a transmissão com tensão elevada.

Com os níveis de tensão no sistema de energia cada vez mais altos, há uma crescente melhoria nos isolantes elétricos. Surgem a cada dia novos materiais que trazem avanços aos sistemas elétricos. Em contrapartida, podem também apresentar fragilidades e deficiências não diagnosticadas facilmente como nos materiais já utilizados, nos quais o conhecimento elétrico e mecânico é consolidado. É o caso dos materiais poliméricos, eles apresentam

vantagens frente aos isolamentos de vidro e porcelana, mas carecem de técnicas confiáveis de diagnóstico.

Há a necessidade de se diferenciar o comportamento dos materiais isolantes, pois o efeito das sobretensões sobre os isolamentos dos sistemas elétricos e equipamentos depende basicamente das características de suportabilidade e de regeneração da isolação.

### 2.1.1 ISOLAMENTOS POLIMÉRICOS

Os materiais normalmente empregados em isolamentos poliméricos são borrachas de silicone, de monômero de etileno propileno (EPM), de monômero de etileno-dieno-propileno (EPDM), de epóxi cicloalifática (CE), de acetato de vinil-etileno (EVA) e de politetrafluoretileno (PTFE). Ao contrário dos isolamentos tradicionalmente empregados, vidro e porcelana, estes materiais apresentam um comportamento distinto e carecem de técnicas confiáveis de diagnóstico.

Apesar de apresentarem diversas vantagens em relação aos isolamentos cerâmicos, os isolamentos poliméricos requerem mais atenção quanto à manutenção preditiva (YAMAMOTO, ZHU, *et al.*, 2005). A utilização dos isolantes poliméricos é de grande interesse para aplicações em alta tensão, devido à vantagens como resistência ao vandalismo, baixo peso, baixo custo e hidrofobicidade.

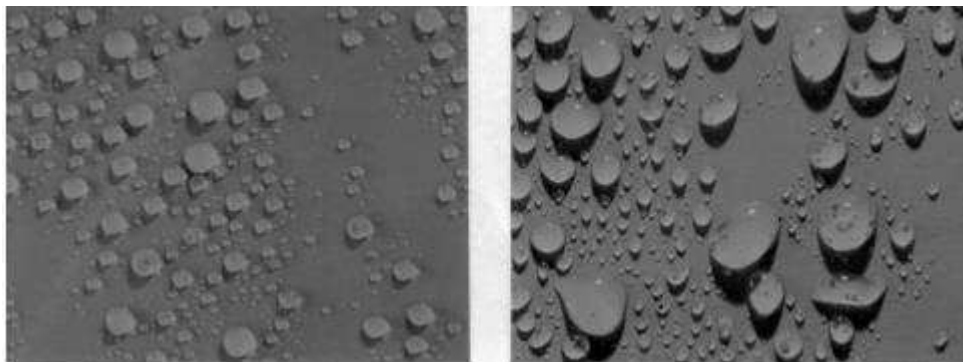
Diversos trabalhos experimentais vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo, com o objetivo de melhor caracterizar o comportamento dos materiais poliméricos e estabelecer os modelos teóricos que melhor represente o desempenho desse tipo de isolamento. Para isso, são realizados ensaios de verificação da suportabilidade elétrica, caracterização física, verificação da homogeneidade, teor de impurezas, comportamento térmico, mecânico e químico dos materiais poliméricos (PINHEIRO, 2008).

No Brasil, o isolamento polimérico tem sido bastante empregado, pois permite a construção de redes elétricas compactas. As redes compactas constituem uma solução técnica e economicamente viável para aumentar a confiabilidade e segurança dos sistemas de distribuição (SCHNEIDER, HALL, *et al.*, 1989), além de apresentarem vantagens específicas, dentre elas a sua hidrofobicidade em relação aos materiais cerâmicos comumente empregados.

A hidrofobicidade é uma propriedade que o material tem de repelir um filme de água sobre sua superfície. Quando um material hidrofóbico é molhado, a água não se espalha, forma apenas algumas gotas discretas, o que pode ser observado na Figura 1. Materiais com

alta hidrofobicidade não permitem à formação de películas de água, conseqüentemente, diminuem as intensidades das correntes de fuga no isolamento polimérico, evitando assim a formação de bandas secas. Quando a propriedade da hidrofobicidade é reduzida a níveis baixos, ocorrem os fenômenos de trilhamento e erosão nos isolamentos.

Figura 1. Superfícies hidrofóbicas.



Fonte: IEC TS 62073, 2003.

Quando se analisa os revestimentos mais empregados em isolamentos poliméricos encontram-se o EPDM e o silicone, observa-se uma tendência maior ao uso do silicone devido as suas propriedades hidrofóbicas.

O polímero base da borracha de silicone aplicada a isolamentos poliméricos é o polidimetilsiloxano (PDMS), o qual possui grupamentos hidrocarbônicos que são hidrófobos, sendo responsáveis pela repelência de água.

A borracha de silicone, devido a sua composição, é um material sensível à umidade, formando gotas em uma área mínima da sua superfície, minimizando o desenvolvimento de correntes de fuga. No entanto, se o material polimérico é exposto a uma tensão aplicada e a uma atmosfera poluída a repelência de água é temporariamente perdida, formando temporariamente um filme de água, e como conseqüência o aumento de correntes de fuga.

Entende-se como “atmosfera poluída”, do ponto de vista elétrico, uma atmosfera que, num certo período de tempo, propicia a formação, sobre a superfície isolante, de uma camada constituída por soluções condutoras. Por outro lado, a densidade de corrente de fuga sobre a superfície do material isolante não é uniforme e depende da distribuição da poluição e da umidade. Ademais, se a corrente for suficientemente concentrada, ela promoverá a evaporação do filme de água devido ao efeito Joule, formando as bandas secas (OLIVEIRA, 2008 & GOIS, ROSSI, *et al*, 2007).

Segundo Gonzalez, Sens, *et al* (2001), as bandas secas são pontos de elevada resistência elétrica e que por isto concentram praticamente toda a tensão aplicada. O elevado

nível de campo elétrico favorece a ocorrência de descargas pelo ar, ocorrendo os denominados arcos de banda seca, os quais são capazes de produzir elevadas temperaturas superficiais, na faixa de 240 a 400°C.

Os altos campos elétricos nas bandas secas provocam descargas elétricas que produzem ozônio e óxidos de nitrogênio; que combinados com a água formam ácido nítrico que, juntos com o ozônio atacam a superfície isolante. Este efeito provocado pelas descargas e arcos de superfície, conduz à ocorrência dos fenômenos de trilhamento e erosão.

As principais causas de defeitos que proporcionam o envelhecimento de materiais poliméricos, para uso em redes elétricas, são a degradação por trilhamento e por erosão. Os fenômenos de trilhamento e erosão causam mudanças irreversíveis das características isolantes do material e acontecem devido às solicitações elétricas, mecânicas, térmicas e químicas.

O processo de trilhamento elétrico é definido como um mecanismo de envelhecimento superficial do dielétrico devido à formação de um caminho condutor permanente, resultante da degradação devido à ação das descargas elétricas superficiais (SILVA, 2014; SILVA, MUNARO, *et al.*, 2007). Quando essas descargas se apresentam de forma localizada numa região do material polimérico, acontece o fenômeno de erosão que é descrito como a perda de massa do material. Os processos naturais de umidificação, oxidação e contaminação nas superfícies dos isolantes elétricos, contribuem para a diminuição da resistividade elétrica do material, contribuindo assim para os processos de trilhamento e erosão (SILVA, 2014).

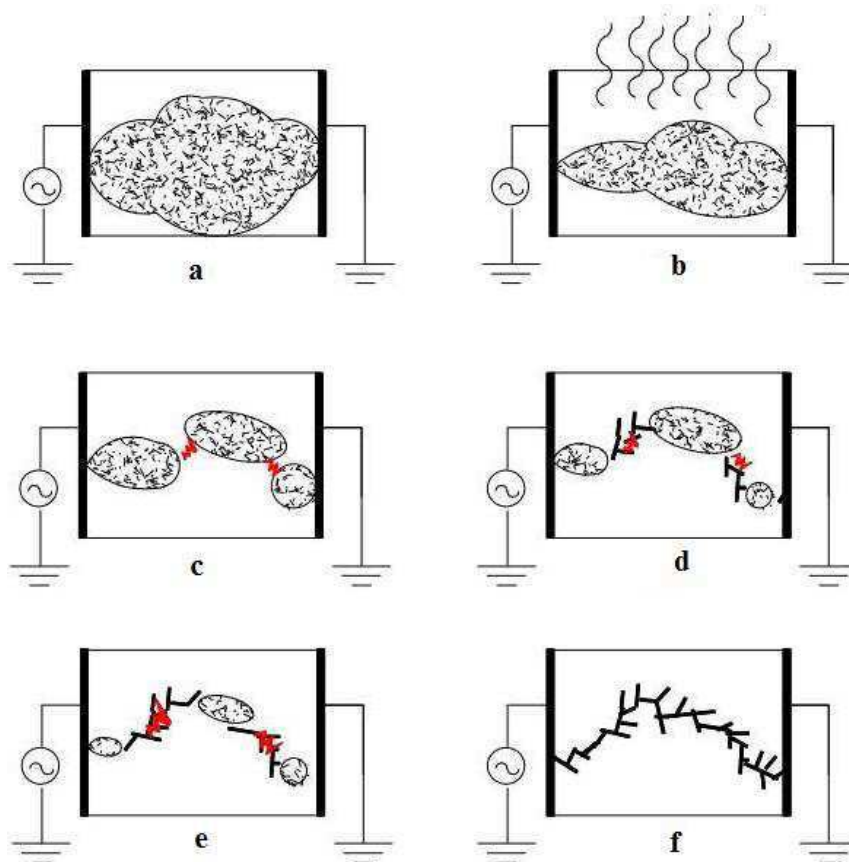
Segundo Salama e Sallam (1992), os fatores que afetam a resistência do material isolante ao trilhamento podem ser classificados em três categorias:

- i. Fatores dependentes das características químico-físicas do material, tais como a força da ligação química, o peso molecular e a resistividade térmica.
- ii. Condições ambientais como contaminação, névoa, chuva e luz ultravioleta.
- iii. Tensão aplicada e campo elétrico a que o material é submetido. Ao se aplicar uma determinada tensão no material isolante, pode ocorrer um aumento no campo elétrico, intensificando as descargas superficiais podendo provocar a degradação do material.

Segundo Tomczak (2000) e Silva, R. (2014), o processo de trilhamento elétrico pode ser visualizado na Figura 2.

- Contaminação e umedecimento da superfície do material, formando uma camada condutora com baixa resistividade superficial;
- Passagem de uma corrente superficial por meio da solução úmida contaminante, com alta dissipação de calor, causando perda de massa do fluido contaminante, favorecendo a formação de bandas secas;
- 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;
- Devido às 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;
- Propagação e aumento do resíduo carbonáceo condutor;
- Ruptura completa da superfície do material isolante, fazendo com que o material se comporte como um condutor de eletricidade.

Figura 2. Processo de trilhamento elétrico.



Fonte: TOMCZAK, 2000.



O trilhamento elétrico pode causar a erosão, que é a perda localizada e gradual de massa que ocorre pela ação de descargas superficiais.

## 2.2 ARDUINO

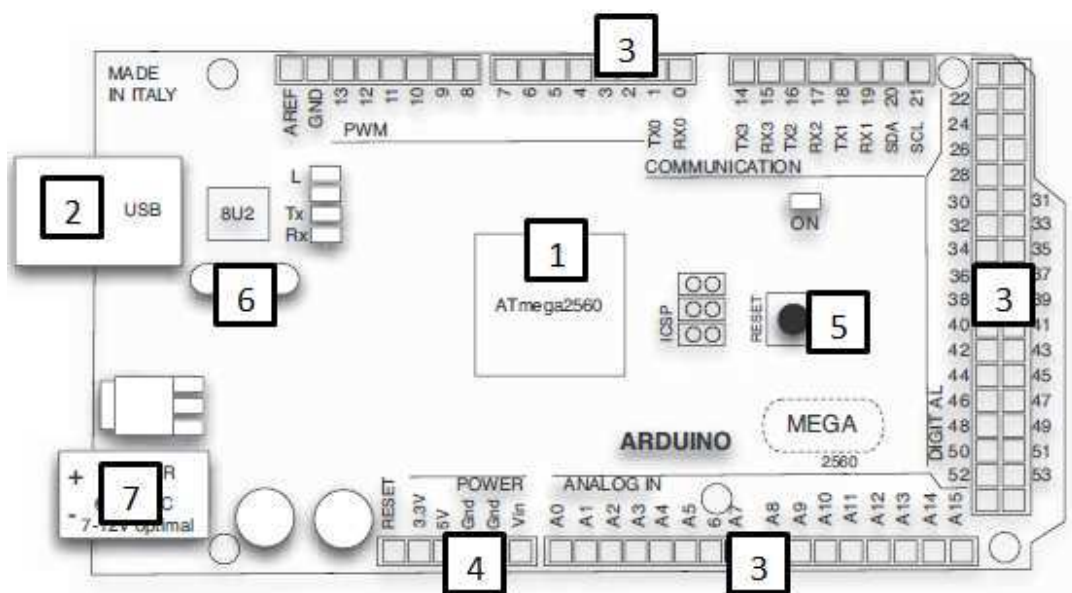
A plataforma Arduino surgiu na Itália em 2005, com objetivo de criar um dispositivo que fosse utilizado em projetos eletrônicos de maneira mais barata e de fácil manuseio para iniciantes que não possuíssem experiência com desenvolvimento de software. De forma geral, esta plataforma pode ser considerada um pequeno computador no qual é realizada uma programação de modo a processar informações entre entradas e saídas do dispositivo e os componentes conectados a ele (MCROBERTS, 2011).

O Arduino é uma plataforma de computação física que pode ser usado para desenvolver objetos interativos, tomando como entrada uma variedade de sensores e chaves e controlando uma variedade de luzes, motores e outras saídas físicas. Essa plataforma pode ser utilizada para desenvolver objetos interativos independentes ou também pode ser conectada a um computador, a uma rede ou também à internet (MARGOLIS, 2011). Ao se conectar a internet, o Arduino pode enviar dados, obtidos por sensores, para um sítio eletrônico em que poderão ser exibidos.

A plataforma Arduino é composta por duas partes, sendo uma placa eletrônica (*hardware*) e um ambiente de desenvolvimento (*software*) para criação de projetos. O seu diferencial é ser um dispositivo que trabalha na filosofia *open-source* em que a documentação para elaboração do hardware e o código fonte do ambiente de desenvolvimento são disponíveis para os usuários.

A placa do Arduino é composta por um microprocessador, um cristal ou oscilador e um regulador linear de 5 volts. Além desses elementos principais, pode conter também uma saída USB a qual vai conectá-lo a um computador para *upload* ou recuperação de dados. Nessa placa ficam expostos os pinos de entrada/saída do microcontrolador para que seja possível a conexão de outros circuitos ou sensores. Um exemplo de placa do Arduino pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3. Placa do Arduino.



Fonte: EVANS, NOBLE e HOCHENBAUM, 2013.

Em que cada item enumerado representa:

1. O microcontrolador: dispositivo programável que efetua o carregamento do código a ser enviado para a placa;
2. O conector USB: meio de comunicação entre o Arduino e o computador com auxílio de um cabo USB;
3. Pinos de entrada e saída: programados para que o Arduino interaja com o meio externo;
4. Pinos de alimentação: fornecem diversos valores de tensão que podem ser utilizados para energizar os componentes do projeto. Devem ser usados com cuidado para que não sejam forçados a fornecer valores de corrente superiores ao suportado pela placa;
5. Botão de reset: botão que reinicia a placa Arduino;
6. Oscilador: relógio simples que envia pulsos de tempo em uma frequência especificada para permitir a operação do Arduino na velocidade correta;
7. Conector de alimentação: responsável por receber a energia de alimentação externa, que pode ter uma tensão de no mínimo 7 V e no máximo 20 V e uma corrente mínima de 300 mA.

A programação do Arduino é realizada utilizando o seu *Integrated Development Environment* (IDE), que é o ambiente em que será escrito o código, baseado na linguagem de programação C. Um bloco de códigos escritos no Arduino é conhecido como sketch. O IDE do Arduino apresenta basicamente três funções, permitir o desenvolvimento do software, enviá-lo à placa para que possa ser executado e interagir com a placa Arduino. O IDE do Arduino é mostrado Figura 4.

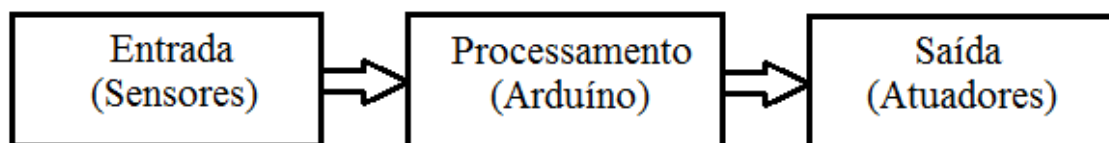
Figura 4. IDE do Arduino.



Fonte: própria autora.

O Arduino é uma plataforma capaz de processar computacionalmente variáveis do ambiente externo, transformadas em um sinal elétrico correspondente, utilizando sensores ligados aos seus terminais de entrada. Além disso, o Arduino pode também atuar no controle de algum outro elemento eletro-eletrônico conectado ao terminal de saída (RENNA, BRASIL, *et al.*, 2013). Na Figura 5 pode ser visto um diagrama de blocos de uma cadeia de processamento utilizando o Arduino.

Figura 5. Diagrama de blocos de processamento utilizando o Arduino.



Fonte: RENNA, 2013.

Existem diversos modelos de placas eletrônicas do Arduino no mercado, cada qual com características que a diferem das demais, como velocidade, memórias, pinagem de entrada e saída, entre outras características. Apesar dessas diferenças, uma característica comum entre as várias versões é o custo relativamente baixo e a flexibilidade (GOMES e TAVARES, 2013).

Com o crescimento do mercado e novas exigências surgindo, a fim de aumentar as funcionalidades do Arduino, várias empresas de hardware desenvolveram placas eletrônicas adicionais para a conexão nos terminais desta plataforma. Estas placas eletrônicas adicionais são denominadas *Shields* e acrescentam várias funções específicas ao Arduino, desde controle de motores até sistemas de rede sem fio (PINTO, 2011).

Neste capítulo foi realizada uma fundamentação teórica sobre isolamento elétrico e o microcontrolador utilizado. Na seção sobre isolamento elétrico foram destacados os isolamentos poliméricos, ressaltando as suas vantagens e processos de envelhecimento. Já na seção de Arduino foram destacadas as principais características da plataforma, na qual serão implementados os códigos do trabalho. No próximo capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais ensaios de trilhamento e erosão em materiais isolantes e trabalhos que utilizaram a norma IEC 60587 (2007) para estudos de trilhamento e erosão em materiais isolantes elétricos.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais estudos reportados na bibliografia que abordam os ensaios de trilhamento e erosão em materiais isolantes. Além disso, será realizada também uma revisão bibliográfica sobre trabalhos que utilizaram a norma IEC 60587 (2007) para os estudos sobre trilhamento e erosão em materiais isolantes elétricos, do período de 2008 a 2015.

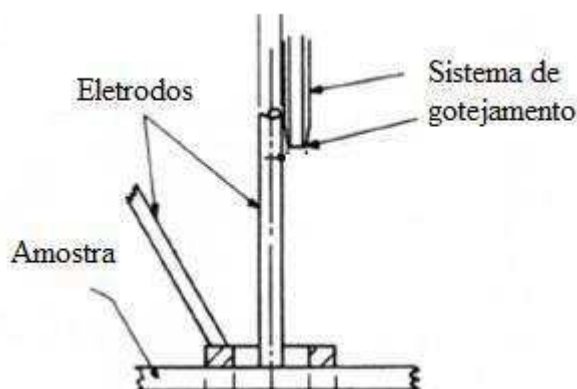
### 3.1 PRINCIPAIS ENSAIOS DE TRILHAMENTO E EROSÃO EM MATERIAIS ISOLANTES

Para a realização dos ensaios de trilhamento e erosão, a maioria dos testes existentes utilizam a técnica de gotejamento sobre as amostras e as submetem a um determinado nível de tensão.

Os primeiros ensaios que utilizavam o gotejamento aconteceram nos anos de 1930 e 1935, na França, Suíça e nos Estados Unidos. Segundo Yarsley e Ives (1953), o ensaio era chamado de “*Detroit – Edison*” e consistia na aplicação de um arco na superfície de um material isolante. O número total de segundos de aplicação do arco antes da amostra falhar indicava a classificação do material e a falha era indicada por uma lâmpada incandescente que iluminava o caminho entre os eletrodos na superfície do material.

Segundo Albright e Starr (1956), o teste do “*Admiralty*” foi utilizado pela marinha britânica e modificado por Yarsley em 1950, sua configuração é mostrada na Figura 6. O teste consiste no gotejamento de um contaminante a uma frequência de 60 ciclos por segundo sobre a superfície horizontal de um material isolante, em que são fixados os eletrodos e aplicada uma tensão até ocorrer a ruptura do material.

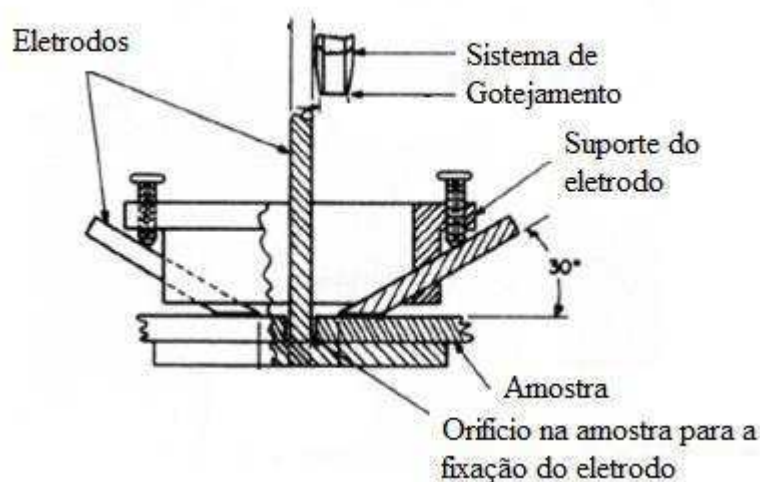
Figura 6. Configuração do teste “Admiralty”.



Fonte: ALBRIGHT e STARR, 1956.

Com a tentativa de melhorar o teste do “Admiralty”, o *General Engineering Laboratory* redesenhou o sistema apresentando os eletrodos em uma nova disposição, como é mostrado na Figura 7. O eletrodo de “Admiralty” é substituído por três eletrodos de haste, montados num ângulo de 30 graus com a horizontal.

Figura 7. Sistema “Admiralty” modificado.



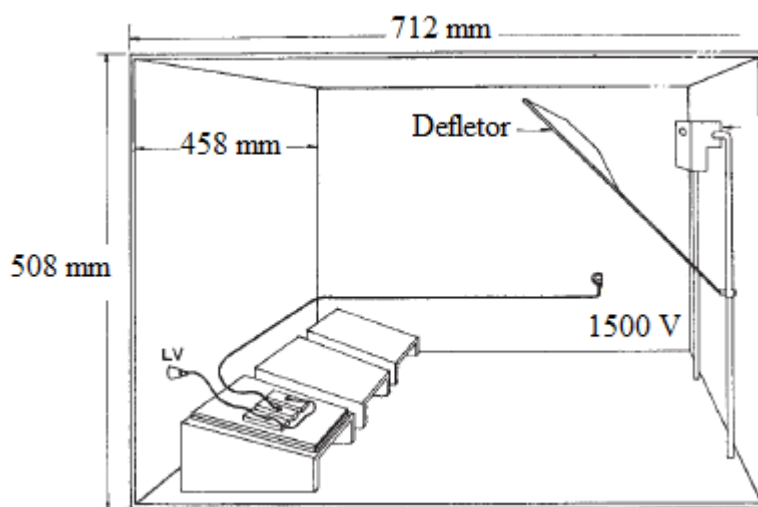
Fonte: ALBRIGHT e STARR, 1956.

No ano de 1959, foi introduzido o critério de avaliação do término do ensaio de ruptura em materiais isolantes pelo norueguês Poppe (SILVA, 2014). O ensaio teria fim com a tensão atingida no momento da ruptura após a queda de 50 gotas da solução contaminante de cloreto de amônio a 0,1%, em intervalos de 30 segundos. O ensaio utilizando esse critério foi mais tarde normatizado como a Norma IEC 60112 (2003).

Em 1956, Albright e Star propuseram o ensaio denominado de “*Dust-and-Fog-Test*”. Os autores concluíram que a umidade e a poeira acumulada numa amostra formam uma

película superficial com baixa resistividade elétrica. Em 1960, Sommemam realizou algumas modificações no “*Dust-and-Fog-Test*”, constituindo então o método recomendado pela ASTM 2132. O ensaio agora consistia em utilizar uma amostra do material a ser testado, polvilhado com uma poeira sintética, com o objetivo de representar a poeira que pode ser encontrada em um sistema elétrico real. A amostra ficava localizada numa câmara com injeção contínua de uma névoa de água conforme imagem mostrada na Figura 8.

Figura 8. Câmara de ensaio “*Dust-and-Fog-Test*”.



Fonte: LAMPMAN, 2003.

Em 1961, Mathes e Mc Gowan desenvolveram um método de ensaio em que se colocava a amostra do material inclinada em relação a horizontal e, se escorria um líquido contaminante na superfície inferior do corpo de prova, a partir do eletrodo superior. A metodologia na qual é baseado esse ensaio é a base para o ensaio atualmente padronizado utilizando a norma IEC 60587 (2007).

### 3.2 ESTUDOS SOBRE TRILHAMENTO E EROÇÃO SEGUNDO A NORMA IEC 60587 (2007)

O trilhamento e a erosão são alguns dos principais problemas em estruturas de isolamento elétrico, logo, é de fundamental importância se estudar os materiais que compõem esses sistemas, de modo a reduzir as falhas elétricas. A norma IEC 60587 (2007) trata dos fenômenos de trilhamento e erosão, e serviu como base para vários trabalhos desenvolvidos na área.

Krivda (2008) desenvolveu um trabalho cujo principal objetivo foi resumir experiências utilizando o teste de trilhamento e erosão de acordo com a norma IEC 60587 e discutir possíveis melhorias no teste. Primeiramente, foi discutido a utilização dos eletrodos e visto que a norma deveria especificar um método de fabricação deles além do número de ensaios em que podem ser utilizados.

Para garantir um resultado estatisticamente significativo, Krivda (2008) sugere que sejam testadas pelo menos quinze amostras para garantir o desempenho confiável do material. Em relação aos ensaios, o trabalho concluiu que ao se aplicar a tensão de 4,5 kV se chegavam aos maiores arcos voltaicos e esses se concentravam apenas em um ou dois pontos causando danos locais sob a forma de erosão extensiva. Já ao se aplicar 6 kV, os arcos moviam-se sobre a superfície do material, causando apenas danos locais limitados e os materiais passavam no teste do nível de 6 kV.

Em relação ao teste de erosão, Krivda (2008) discute a falta de um critério de limite de profundidade e sugere que sejam criados critérios para medir a profundidade de erosão, como por exemplo, utilizando imagens estereoscópicas.

Guastavino (2009) desenvolveu um trabalho de investigação dedicado ao estudo de uma nova classe de compósitos nanoestruturados de polímeros de epóxi cicloalifáticos. Submetendo as amostras aos testes de trilhamento e erosão propostos por IEC 60587 (2007), concluiu que os novos compósitos nanoestruturados mostraram uma melhor resistência de trilhamento e erosão em relação ao polímero puro, aos compósitos convencionais e aos nanocompósitos.

O autor atribuiu esse resultado à presença de camadas de argila esfoliada que agiram como uma barreira limitando a degradação do material.

Como resultado das análises realizadas, Guastavino (2009) verificou que o composto nanoestruturado preparado com uma menor quantidade de nanoargila mostrou uma melhor resistência ao trilhamento e erosão sob as condições estabelecidas para o ensaio de plano inclinado. Em contrapartida, os materiais preparados com uma maior quantidade de argila falharam no teste provavelmente devido ao aumento da viscosidade da resina.

No trabalho produzido por Bruce, Rowland, et al (2010), foi desenvolvido um sistema capaz de analisar o desempenho elétrico de diferentes materiais à testes de trilhamento e erosão. Foram testadas três diferentes tipos de amostras de borracha de silicone produzidas comercialmente. O material A foi uma variação do B, tendo um incremento na sua condutividade elétrica. As amostras em questão foram ensaiadas com uma tensão constante.



Os materiais utilizados por Bruce, Rowland, et al (2010) foram submetidos a três níveis de tensão e observou-se que a erosão das amostras se deu sempre do eletrodo de terra em direção ao eletrodo de alta tensão. Aplicando-se a tensão sobre as diferentes amostras, observou-se diferentes resultados referentes ao trilhamento e a perda de massa pela erosão. Como resultado, foi relatado que as diferentes propriedades dos materiais podem afetar a tensão elétrica no teste de tal modo que mudam a natureza das descargas superficiais. Além disso, concluiu-se também que a forma, o volume de filamentos condutores na superfície e o comportamento do contaminante também são fatores que contribuíram para os diferentes resultados encontrados.

Almirall, Bezerra, *et al* (2012) realizaram o estudo sobre a influência que se tem ao agregar cargas como nanosílica à borracha de silicone. No teste de resistência a erosão utilizou-se uma tensão constante de 3,5 kV e se chegou à conclusão que a nanosílica aumenta a resistência a erosão, indicando a vantagem de seu uso.

Almirall (2013), na sua tese, realizou o estudo de erosão utilizando borracha de silicone pura e com cargas de nanosílica e Alumina tri-hidratada (ATH) em sete tipos de concentrações diferentes. Ele chegou à conclusão que com baixas concentrações de carga, o silicone é completamente exposto aos efeitos da erosão. Além disso, as amostras que falharam não apresentaram nenhuma carga de ATH, demonstrando a grande influência desse elemento na propriedade de resistência à erosão.

Em Kannan, Sivakumar, *et al* (2015), foi estudada a resistência de trilhamento e erosão do composto de borracha de silicone preenchido com hidróxido de alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ). Os ensaios foram realizados utilizando-se tensão de DC e com diferentes concentrações de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Em concentração acima de 10% de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  nenhuma amostra falhou, concluindo que o enchimento utilizado é eficaz porque reage fisicamente e/ou quimicamente com o polímero de silicone para remover a degradação por produtos formados pelos arcos elétricos, originados devido às bandas secas na superfície do material e, portanto, a nanocarga de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ajuda na prevenção da degradação total do material. Em relação à erosão das amostras a conclusão foi que à medida que se aumentou a concentração do nanocomposto, diminuiu-se o volume de erosão.

Em Nóbrega (2016), foi avaliado o desempenho de revestimentos poliméricos compostos por borracha de silicone vulcanizável a temperatura ambiente acrescida de partículas de ATH e uma nova carga em diferentes proporções mássicas. A nova carga foi caracterizada eletricamente pela medição da sua constante dielétrica e tangente de perdas. As amostras de isoladores revestidos com as várias composições foram submetidas a ensaios

cíclicos de névoa salina com o objetivo de degradar o isolamento. O desempenho dos revestimentos foi avaliado a partir de medições da corrente de fuga, análise harmônica e monitoramento da recuperação da hidrofobicidade. De forma geral, os melhores resultados foram verificados para os revestimentos que continham 5% em peso da nova carga.

Nóbrega (2016) almejava realizar testes de trilhamento e erosão para avaliação dos revestimentos, o que não foi feito devido à falta do equipamento nas dependências do LAT da UFCG.

De forma sumarizada, são apresentadas na Tabela 1 as principais contribuições das pesquisas supracitadas, com relação ao tema abordado nesta seção.

*Tabela 1. Síntese da revisão bibliográfica.*

<b>Ano</b>	<b>Pesquisadores</b>	<b>Resumo da Pesquisa</b>
<b>2008</b>	Krivda <i>et al</i>	Discutiram o uso dos eletrodos, a quantidade de amostras a serem ensaiadas, critérios de limite de erosão e aplicação de diferentes níveis de tensão.
<b>2009</b>	Guastavino <i>et al</i>	Investigaram uma nova classe de compósitos nanoestruturados utilizando argila e chegou à conclusão que eles mostraram uma melhor resistência de trilhamento e erosão em relação ao polímero de silicone puro, aos compósitos convencionais e aos nanocompósitos.
<b>2010</b>	Bruce <i>et al</i>	Estudaram três tipos de amostras de silicone e relatou que as diferentes propriedades dos materiais podem afetar a tensão elétrica no teste de tal modo que mudam a natureza das descargas superficiais.
<b>2012</b>	Almirall <i>et al</i>	Estudaram a influência de se adicionar cargas de nanosílica à borracha de silicone concluindo que essa carga aumenta a resistência a erosão do material.
<b>2013</b>	Almirall	Utilizou borracha de silicone com cargas de nanosílica e ATH para o estudo da erosão nesses materiais e constatou a influência do ATH na propriedade de resistência à erosão.
<b>2015</b>	Kannan <i>et al</i>	Estudaram a resistência de trilhamento e erosão do composto de borracha de silicone preenchido com hidróxido de alumínio (Al(OH) <sub>3</sub> ) e constatou que a nanocarga ajuda na prevenção da degradação total do material.
<b>2016</b>	Nóbrega	Avaliou o desempenho de revestimentos poliméricos a base de silicone acrescida de partículas de ATH e uma nova carga em diferentes proporções mássicas e verificou melhores resultados nas amostras que apresentaram uma concentração de 5% da nova carga.

Fonte: própria autora.

Neste capítulo foram apresentados os principais estudos que abordam os ensaios de trilhamento e erosão em materiais isolantes. Além disso, foi realizada também uma revisão bibliográfica sobre trabalhos que utilizaram a norma IEC 60587 (2007) para os estudos sobre trilhamento e erosão em materiais isolantes elétricos do período de 2008 a 2015. O próximo capítulo vai descrever o material e os métodos aplicados para a construção do equipamento para ensaio de trilhamento e erosão de acordo com a norma IEC 60587 (2007).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos o material e os métodos empregados na construção do equipamento protótipo para ensaio de trilhamento e erosão de acordo com a norma IEC 60587 (2007).

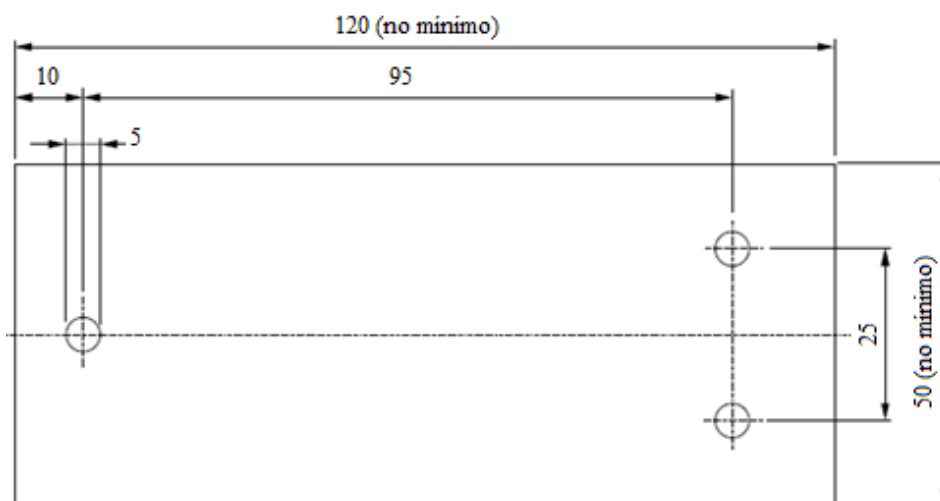
### 4.1 MATERIAL

Para a construção do equipamento e realização dos ensaios, foram utilizados diversos componentes.

Primeiramente, foi construída a estrutura mecânica do equipamento a qual possuía um sistema de gotejamento, uma base em que as amostras foram fixadas para a realização dos testes, entre outras partes. Essa estrutura reuniu os seguintes componentes:

- Chapas de acrílico: foram utilizadas para a construção da base para a fixação das amostras.
- Amostras: as amostras a serem ensaiadas eram planas, cortadas na dimensão de 50 mm x 120 mm e apresentavam uma espessura de aproximadamente 6 mm. De acordo com a norma IEC 60587 (2007), elas foram perfuradas nos pontos indicados na Figura 9, para a fixação dos eletrodos. Foram utilizadas cinco tipos de amostras, sendo elas compostas de silicone puro, silicone com ATH e silicone com nanosílica em diferentes concentrações:
  - Silicone puro;
  - 5% Nanosílica e 95% Silicone;
  - 20% Alumina Trihidratada e 80% Silicone;
  - 50% Alumina Trihidratada e 50% Silicone;
  - 3% Nanosílica, 20% Alumina Trihidratada e 75% Silicone.

Figura 9. Amostra para ensaio com perfurações para a fixação dos eletrodos; todas as grandezas em milímetros.



Fonte: traduzido de IEC 60587, 2007.

- Bureta graduada: foi utilizada para controlar o fluxo de contaminante direcionado à amostra durante o ensaio. Na Figura 10 está ilustrada a bureta graduada utilizada.

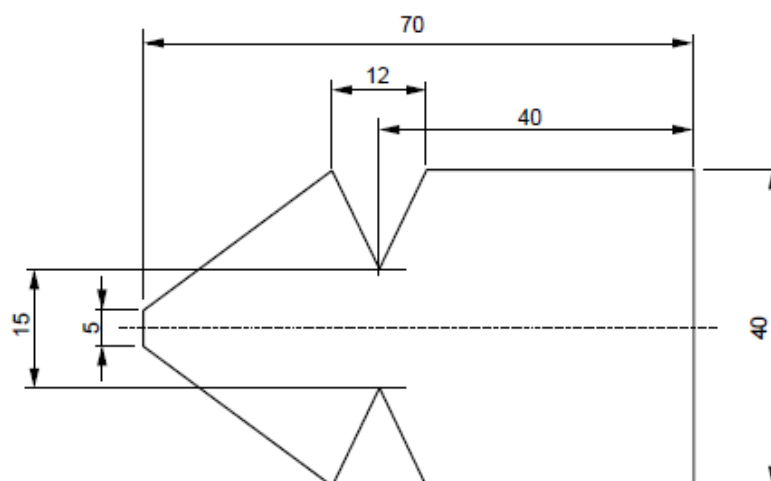
Figura 10. Bureta graduada.



Fonte: própria autora.

- Torneira e mangueira: foram utilizadas para compor o sistema de gotejamento.
- Filtros de Papel: foram utilizados para atuar como um reservatório do líquido contaminante. A Figura 11 mostra a forma do filtro de papel empregado e suas dimensões em milímetros. A espessura do filtro de papel foi de  $(0,2 \pm 0,02)$  mm.

Figura 11. Filtro de papel; todas as dimensões em milímetros.



Fonte: IEC 60587, 2007.

A segunda parte da elaboração do equipamento foi referente à construção da estrutura elétrica. A estrutura elétrica possui os seguintes equipamentos:

- Transformador: foi utilizado para fornecer a tensão requerida nos ensaios. O modelo utilizado está ilustrado na Figura 12.

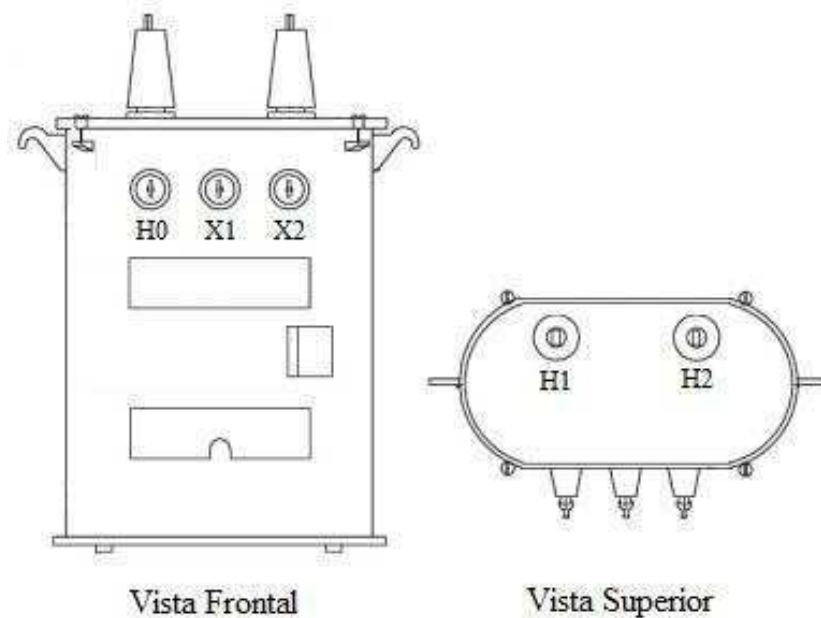
Figura 12. Transformador.



Fonte: própria autora.

Na Figura 13 estão ilustradas as vistas frontal e superior do transformador de modo a identificar as buchas de alta e de baixa tensão.

Figura 13. Vistas frontal e superior do transformador.



Fonte: adaptado de AMPLA, 2012.

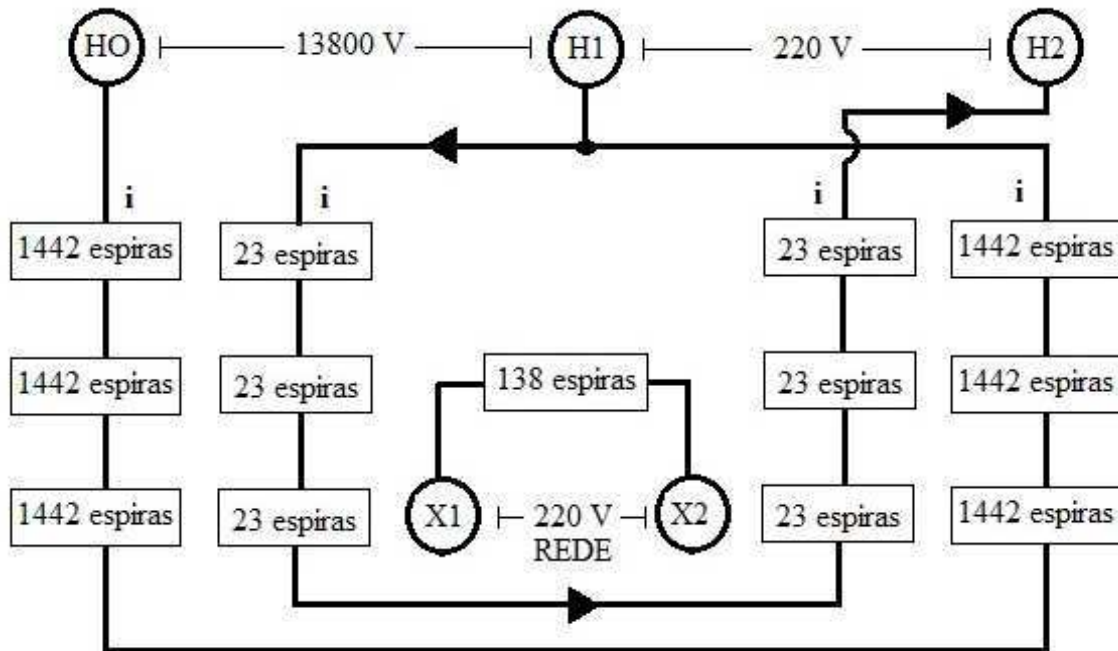
Em que:

- HO representa a referência;

- X1 e X2 representam as buchas de baixa tensão que vão ser conectadas à rede;
- H1 e H2 representam as buchas de alta tensão.

O esquemático dos enrolamentos do transformador, contendo o número de espiras de cada ligação, pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14. Esquema dos enrolamentos do transformador.



Fonte: própria autora.

Como observado na Figura 14, entre as buchas de alta há uma tensão de 220 V quando o transformador está energizado na tensão nominal, o que permite a conexão de um segundo transformador, em cascata.

- Autotransformador variável de operação manual: conhecido popularmente como “variac”, foi utilizado para regular a tensão do primário do transformador no nível requerido no ensaio. O variac utilizado está mostrado na Figura 15.



Figura 15. Variac.



Fonte: própria autora.

- Contator: foi utilizado pra energizar e interromper o circuito e é do tipo normalmente fechado. O contator utilizado pode ser visto na Figura 16.

Figura 16. Contator



Fonte: própria autora.

- Resistores: foram utilizados resistores de 200 W com tolerância de aproximadamente 10% em série com a amostra no lado de alta tensão da fonte de alimentação. Além desses, foi utilizado também um resistor shunt de modo a medir a corrente de fuga, ligado em série, entre a amostra e o referencial de terra. Os resistores utilizados podem ser vistos na Figura 17.

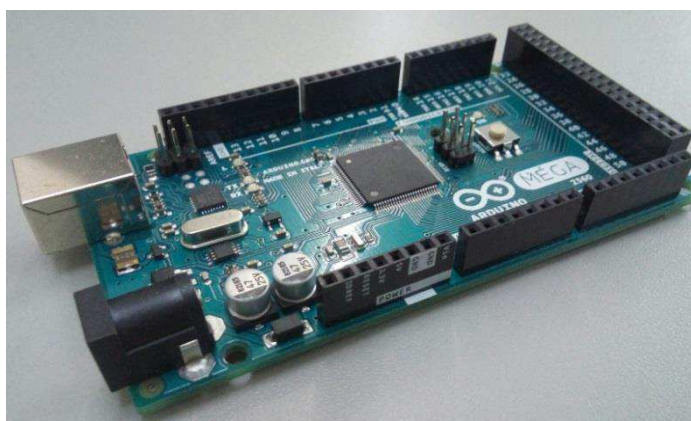
Figura 17. Resistores utilizados.



Fonte: própria autora.

- Microcontrolador: o modelo escolhido foi o Arduino Mega 2560, baseado no microcontrolador ATmega2560, possuindo 54 pinos de entradas e saídas digitais, dos quais, 15 destes podem ser utilizados como saídas PWM. Possui 16 entradas analógicas e 4 portas de comunicação serial (HALMEMAN, 2014). Essa escolha foi feita primeiramente devido ao seu baixo custo. O Arduino escolhido possui muitos pinos de entradas e saídas além de memória de programa com maior capacidade que outros modelos, e é programado com base na linguagem C++, que é amplamente difundida no meio científico. Uma fotografia de uma placa do microcontrolador utilizado é mostrada na Figura 18.

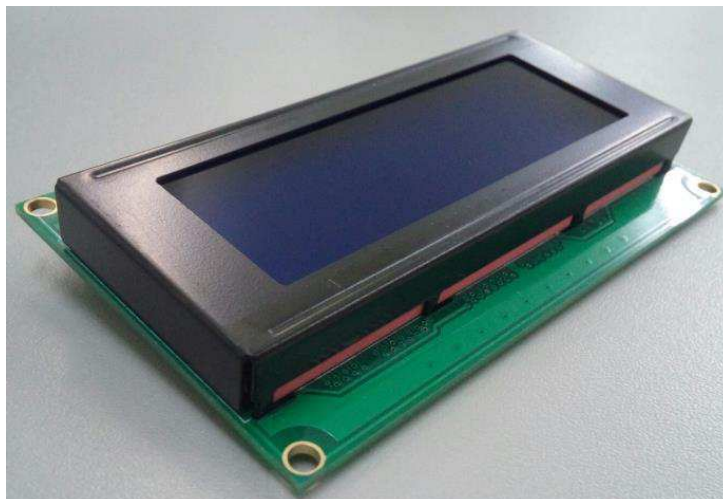
Figura 18. Placa do microcontrolador utilizado.



Fonte: própria autora.

- Display LCD: foi utilizado para mostrar a corrente instantânea no circuito e o tempo de ensaio. O display escolhido é do tipo 20 x 4 e foi concebida pelo fabricante para funcionar de maneira otimizada com o microcontrolador escolhido. Na Figura 19 é apresentado o modelo do display que foi utilizado.

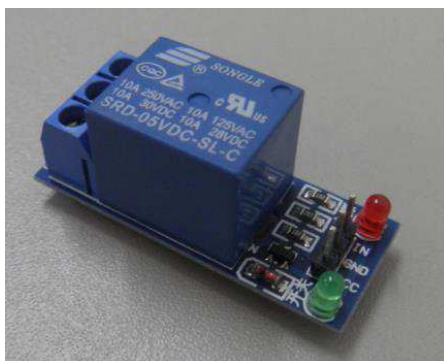
Figura 19. Display LCD.



Fonte: própria autora.

- Relé: foi utilizado para comandar o contator. O relé utilizado na construção do equipamento é mostrado na Figura 20 e foi escolhido devido a sua disponibilidade no LAT. A vantagem do uso do relé é de possuir uma interface própria para o microcontrolador, além de não ser necessário o uso de proteção. No trabalho realizado, poderia ser empregado também um transistor como driver para controlar a bobina do contator.

Figura 20. Relé.



Fonte: própria autora.

Por fim, a terceira etapa da construção do equipamento foi referente à confecção dos eletrodos e necessitou de:

- Chapas de Aço: o material das chapas foi o aço inoxidável. As chapas foram cortadas e dobradas para a confecção dos eletrodos de alta tensão e de terra.

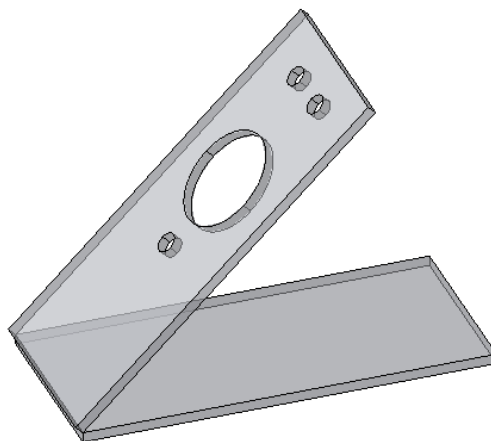
## 4.2 MÉTODOS

A construção do equipamento foi realizada nas dependências do Laboratório de Alta Tensão (LAT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Para a construção do equipamento, foram necessárias três etapas. A primeira etapa se referiu à construção da estrutura mecânica do equipamento. A segunda etapa, à construção da estrutura elétrica do equipamento. E a terceira etapa, a confecção dos eletrodos para a realização dos ensaios.

### 4.2.1 ESTRUTURA MECÂNICA

Para a realização dos ensaios foi necessário primeiramente a construção de uma base em que a amostra foi fixada. A base foi construída em acrílico e sua configuração pode ser vista na Figura 21.

Figura 21. Modelo 3D da base em acrílico empregada como suporte das amostras nos ensaios.



Fonte: própria autora.

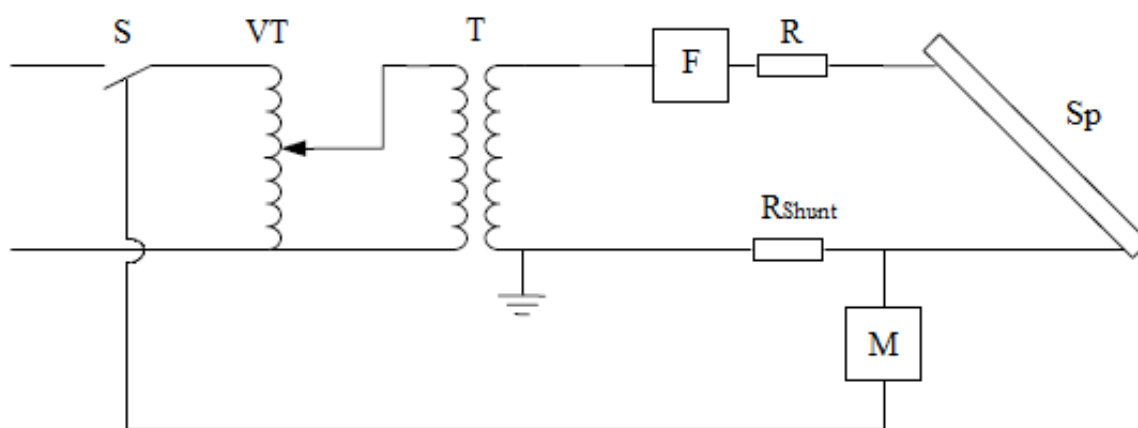
O sistema de gotejamento possui um tanque para o armazenamento do líquido contaminante cuja resistividade elétrica foi de  $(3,95 \pm 0,05) \Omega\text{m}$  a  $23^\circ\text{C}$ . O tanque dispõe de uma torneira, que estava ligada a uma bureta graduada para a realização do controle de gotejamento.

Todo o equipamento foi montado respeitando as distâncias de isolamento para manter a segurança da estrutura e das pessoas que irão realizar os ensaios. A estrutura foi montada em um local ventilado, o que permitiu um escape do vapor e produtos gasosos da decomposição durante o ensaio. A ventilação foi moderada e constante para evitar a condensação permanente de água e foi feita por meio de um ventilador industrial.

#### 4.2.2 ESTRUTURA ELÉTRICA

O circuito elétrico equivalente do equipamento de ensaio é representado na Figura 22.

Figura 22. Diagrama esquemático do circuito.



Fonte: adaptado de IEC 60587, 2007.

Em que:

S – representa o interruptor de alimentação de energia;

VT – representa o transformador com tensão regulável;

T – representa o transformador;

F – representa o fusível;

R – representa o resistor;

Sp – representa a amostra;

$R_{shunt}$  – representa o resistor;

M – representa o microcontrolador;

De acordo com a IEC 60587 (2007), a parte elétrica construída reuniu todos os materiais explicados anteriormente numa estrutura aterrada. A essa estrutura foi anexada à amostra a ser ensaiada.

A estrutura montada foi empregada para realização dos ensaios de uma amostra de material isolante elétrico por vez. A amostra foi submetida a dois valores de tensão, sendo eles, 2,5 kV e 3,5 kV.

De acordo com o nível de tensão escolhido, foi selecionado o resistor equivalente e a taxa de fluxo de contaminante a qual a amostra foi submetida, de acordo com a Tabela 2.

*Tabela 2. Parâmetros de ensaio.*

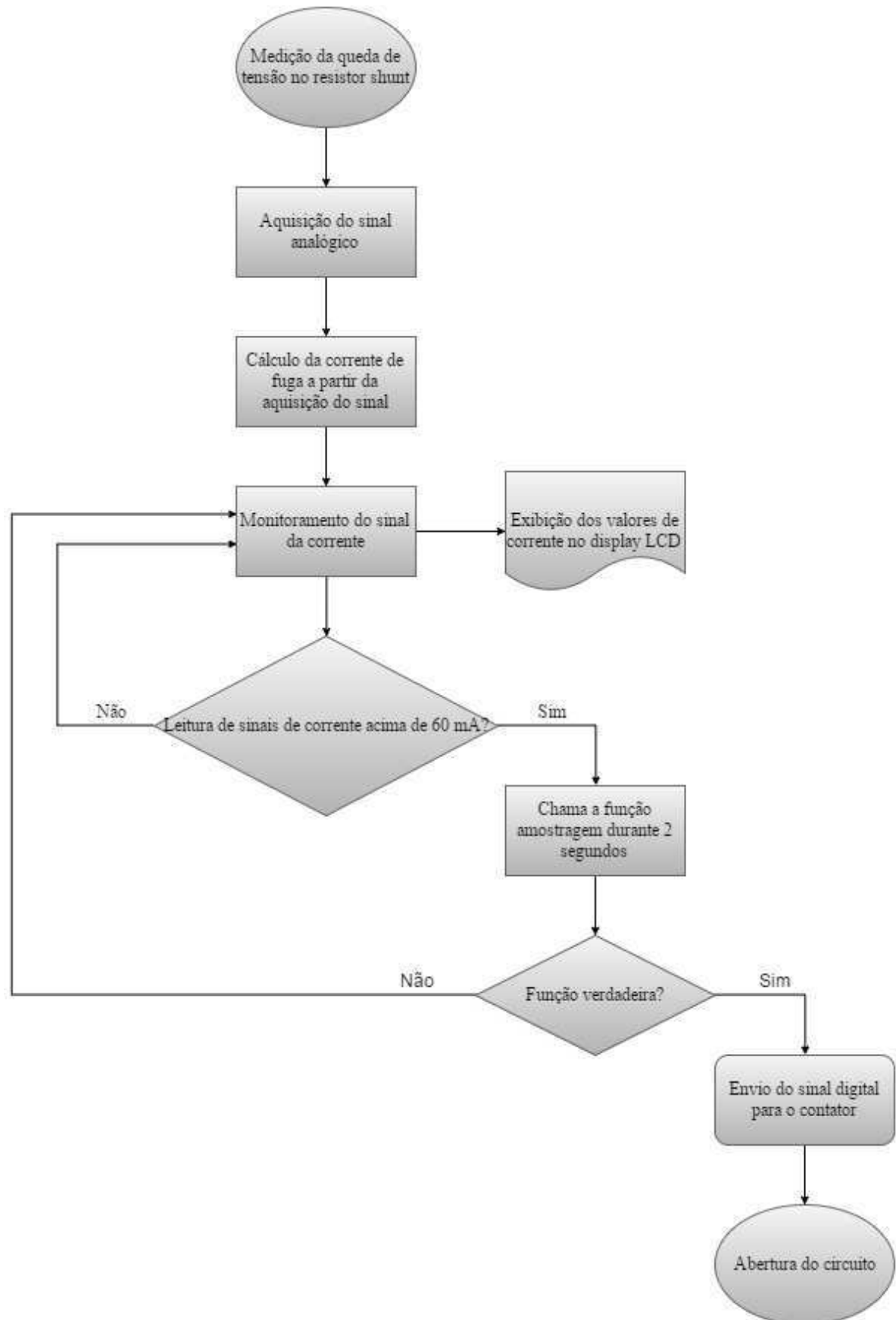
Tensões de Ensaio (kV)	Taxa de Fluxo de Contaminantes (ml/min)	Resistência do Resistor em Série (k $\Omega$ )
2,5	0,15	10
3,5	0,3	22

Fonte: IEC 60587, 2007.

Como pode ser visto na Figura 22, a medição da corrente de fuga durante os ensaios foi realizada indiretamente a partir da queda de tensão no resistor *shunt*. O arranjo disponibilizou sinais analógicos de 0 à 5 V para o conversor analógico-digital do microcontrolador, com resolução de 12 bits, a fim de manter uma sensibilidade necessária para a aquisição do sinal.

O microcontrolador, ao quantificar em seu conversor A/D a tensão equivalente à corrente de 60 mA presente na amostra, deve enviar um sinal digital para o relé, o qual ativa a bobina do contator, realizando a abertura do circuito de alimentação do primário do transformador de alta tensão. Um diagrama de blocos da rotina de monitoramento da corrente de fuga pode ser visto na Figura 23.

Figura 23. Diagrama de blocos da rotina de monitoramento da corrente de fuga.

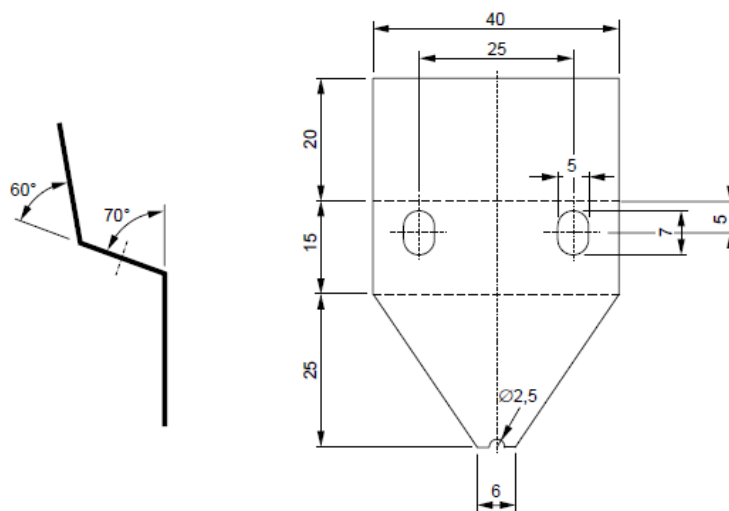


Fonte: própria autora.

### 4.2.3 CONFECÇÃO DOS ELETRODOS

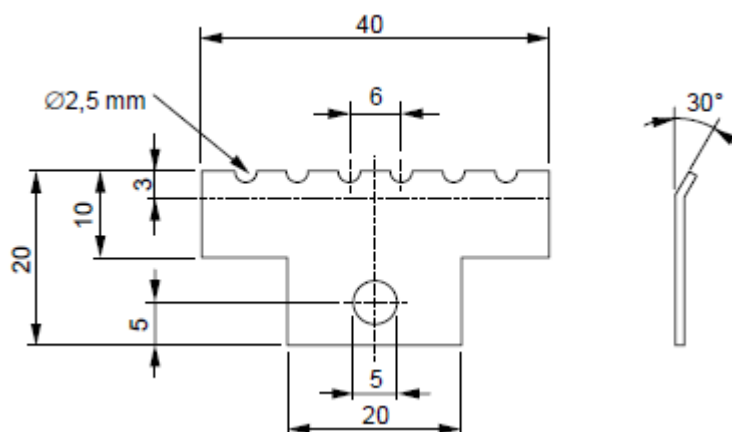
Os eletrodos foram confeccionados em chapas de aço inoxidável com espessura de aproximadamente 0,5 mm. Além dos eletrodos, todos os dispositivos elétricos e elementos de montagem associados a eles, como exemplo parafusos, também são constituídos de aço inoxidável. Os eletrodos foram fabricados seguindo as especificações mostradas nas Figuras 24 e 25, e suas dimensões são apresentadas em milímetros.

Figura 24. Eletrodo superior, de alta tensão; todas as dimensões em milímetros.



Fonte: IEC 60587, 2007.

Figura 25. Eletrodo inferior, de terra; todas as dimensões em milímetros.



Fonte: IEC 60587, 2007.

Com o objetivo de avaliar os procedimentos, os materiais aplicados e a construção do equipamento segundo a norma IEC 60587 (2007), as amostras de materiais poliméricos foram ensaiadas.



#### 4.2.4 MÉTODOS DE ENSAIO

O equipamento construído permitiu a realização de ensaios para a avaliação de materiais isolantes elétricos por medição da resistência de trilhamento e erosão, usando um líquido contaminante. O ensaio foi realizado com um controle constante de tensão.

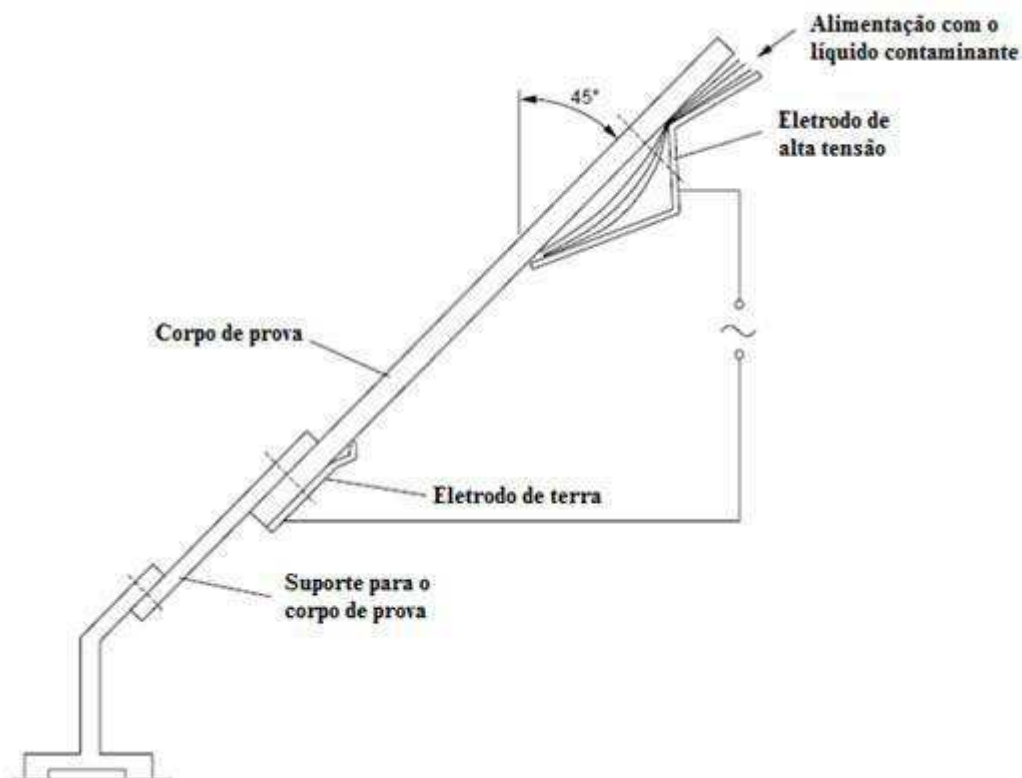
Para a realização dos ensaios, as amostras foram lavadas com álcool isopropílico, para a remoção de impurezas, e enxaguadas com água destilada.

A solução contaminante utilizada no ensaio apresentou uma resistividade elétrica de  $(3,95 \pm 0,05) \Omega\text{m}$  a  $23^\circ\text{C}$ , como especificado pela norma IEC 60587 (2007).

Oito camadas de filtro de papel foram utilizadas para formar o reservatório em que foi colocado o contaminante. O fluxo do contaminante foi mantido uniforme entre os eletrodos, e foi injetado antes da aplicação da tensão. A taxa de aplicação do contaminante dependeu do nível de tensão aplicado, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Os ensaios foram realizados a uma temperatura ambiente entre  $23^\circ\text{C}$  e  $25^\circ\text{C}$ . Os corpos de prova foram montados com a superfície plana a ser ensaiada voltada para baixo e inclinada  $45^\circ$  em relação a horizontal, com os eletrodos separados a uma distância de 50 mm, como ilustrado na Figura 26.

Figura 26. Esquema do equipamento de ensaio.



Fonte: IEC 60587, 2007.

Após a amostra ser devidamente posicionada, o arranjo totalmente interligado e o fluxo de contaminante ser normalizado de acordo com a tensão a ser escolhida, foi possível então iniciar o ensaio.

Para dar início ao método de ensaio realizado, primeiramente selecionou-se uma das tensões de teste de acordo com a Tabela 2. A tensão escolhida teve que ser alcançada no prazo máximo de 10 s e permaneceu inalterada durante 6 h.

A tensão constante de trilhamento foi a tensão mais elevada, suportada pelo corpo de prova, sem ocorrência de falha, durante 6 h. Os pontos finais para o ensaio foram: quando o valor da corrente no circuito excedeu 60 mA e persistiu por mais de 2 s; quando uma amostra apresentou uma perfuração devido à erosão ou quando a amostra inflamou.

Neste capítulo foram descritos o material e métodos empregados na construção do equipamento protótipo para ensaio de trilhamento e erosão de acordo com a norma IEC 60587 (2007). No próximo capítulo serão discutidos os resultados e análises sobre a construção do equipamento, ensaios executados e análises estatísticas realizadas.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises sobre a construção do equipamento, bem como alguns ensaios de trilhamento e erosão realizados com diferentes tipos de materiais isolantes elétricos. Serão apresentadas também algumas análises estatísticas dos resultados dos ensaios.

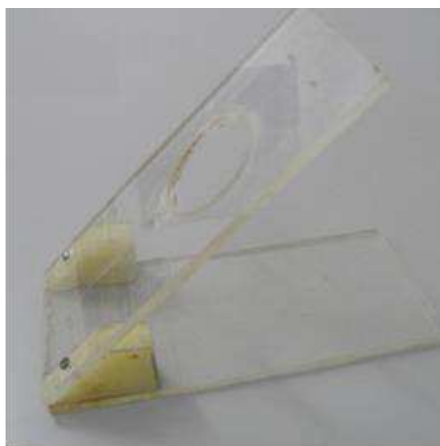
### 5.1 CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

#### 5.1.1 ESTRUTURA MECÂNICA

A base criada para a fixação da amostra de material isolante elétrico foi produzida em acrílico. De acordo com IEC 60587 (2007), a base de suporte das amostras deve apresentar uma inclinação de  $45^\circ$  em relação a horizontal, de maneira a permitir o escoamento do líquido contaminante. Sua construção seguiu o modelo mostrado na Figura 21.

Para a fixação dos eletrodos juntamente com a amostra, a base apresentou quatro orifícios. Dois orifícios são encontrados na parte superior, os quais servirão como encaixe do eletrodo de alta tensão. O terceiro orifício teve como objetivo a fixação do eletrodo de terra. O último orifício, o maior, se encontra no meio da base e foi feito com o intuito de diminuir a área de contato da base com a amostra a ser ensaiada. A base confeccionada pode ser vista na Figura 27.

Figura 27. Base confeccionada.

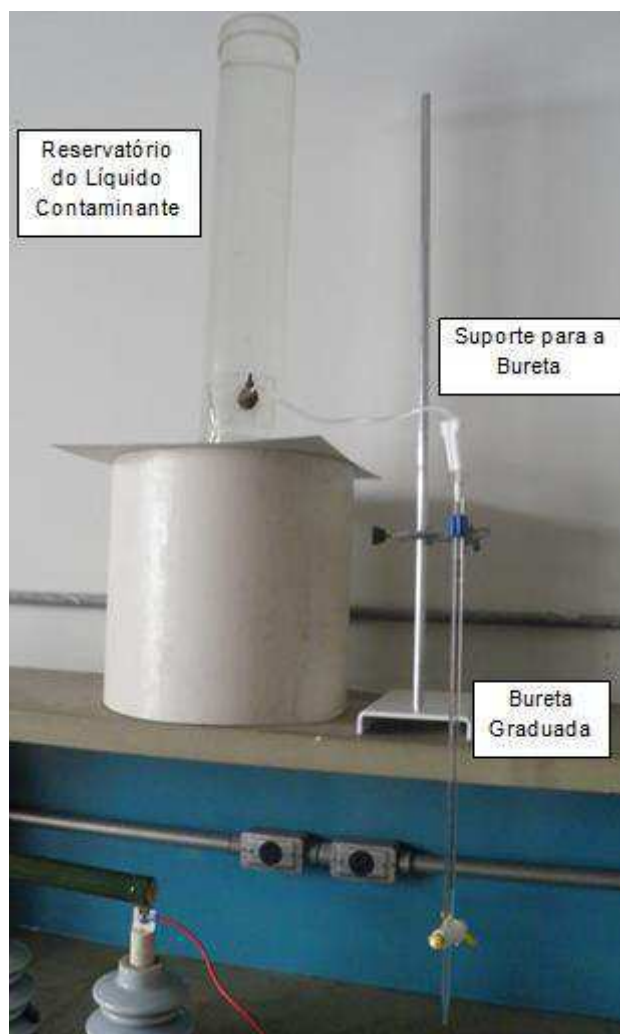


Fonte: própria autora.

A base apresentou dimensões das superfícies planas de 200 x 90 mm. A fixação dos eletrodos na base construída foi realizada utilizando parafusos de aço inoxidável.

O sistema de gotejamento construído possui um tanque em formato cilíndrico, feito de acrílico, com uma altura suficiente para permitir uma vazão sempre constante. Na parte inferior do reservatório foi colocada uma torneira para realizar a conexão entre o tanque e a bureta graduada, a qual foi utilizada para o controle de fluxo do contaminante de acordo com a tensão de ensaio. O sistema de gotejamento construído pode ser visto na Figura 28.

Figura 28. Sistema de gotejamento.



Fonte: própria autora.

Seguindo as especificações contidas em IEC 60587 (2007), a estrutura foi montada em um local com uma ventilação constante que assegurou o escape dos vapores da decomposição durante o ensaio. A ventilação foi proporcionada pelo uso de um ventilador industrial, mostrado na Figura 29.

Figura 29. Ventilador industrial.

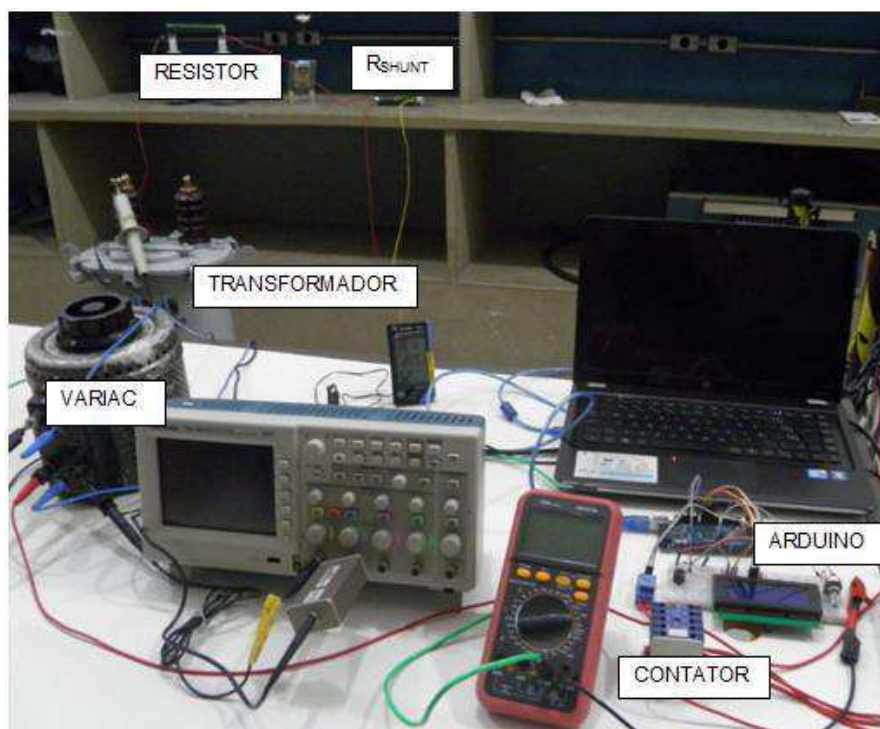


Fonte: própria autora.

### 5.1.2 ESTRUTURA ELÉTRICA

Como resultado do circuito apresentado na Figura 22, a montagem da estrutura elétrica foi realizada e está representada na Figura 30.

Figura 30. Montagem da estrutura elétrica.



Fonte: própria autora.

A partir de estrutura montada, foi possível a realização de ensaios com dois níveis diferentes de tensão. Para a realização dos testes de trilhamento e erosão utilizando a tensão de 2,5 kV utilizou-se o resistor de 10 k $\Omega$ , conforme recomendado pela IEC 60587 (2007).

Para a proteção de retaguarda do circuito de alta tensão, foi acrescentado ao arranjo um fusível com corrente de abertura de 125 mA, o qual se localizou entre o secundário do transformador e o resistor de alta potência. O fusível utilizado entre o transformador e o resistor pode ser visto na Figura 31.

Figura 31. Fusível para proteção.



Fonte: própria autora.

Para os ensaios utilizando 3,5 kV, a mudança necessária à estrutura foi a troca do resistor por outro de valor 22 k $\Omega$ .

O resistor *shunt* utilizado, também possui proteção de retaguarda constituída de um *gap* com a tensão de abertura de 600V. Tal dispositivo de proteção foi utilizado para evitar sobretensões sobre o  $R_{shunt}$ . A proteção utilizando o *gap* pode ser vista na Figura 32.

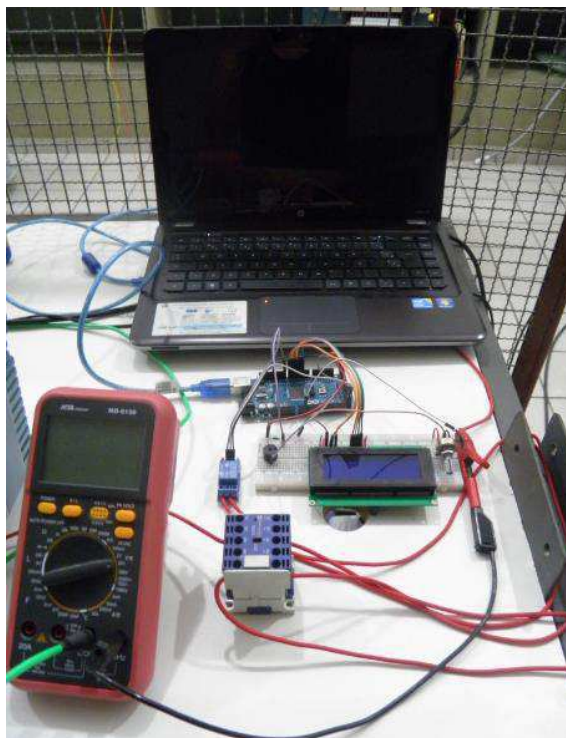
Figura 32. Resistor shunt com gap de proteção.



Fonte: própria autora.

A proteção principal do circuito foi realizada através da leitura da corrente de fuga no isolamento, utilizando-se o microcontrolador. A partir de uma leitura de corrente de 60 mA, o microcontrolador comanda o contator que é responsável pela abertura do circuito. Uma fotografia do esquema descrito está representado na Figura 33.

Figura 33. Montagem para abertura do circuito.



Fonte: própria autora.

### 5.1.3 CONFECÇÃO DOS ELETRODOS

Os eletrodos produzidos para a fixação das amostras de materiais isolantes elétricos na base acrílica foram confeccionados utilizando-se chapas de aço inoxidável. Tais eletrodos têm uma espessura de 0,5 mm e suas dimensões podem ser vistas nas Figuras 24 e 25.

Para ser realizado o corte dos eletrodos nas chapas de aço inoxidável foi utilizada uma máquina de corte a laser dotada de tecnologia de Comando Numérico Computadorizado (CNC). Essa tecnologia se refere ao controle de máquinas/ferramentas programáveis por computador e, para a aplicação em tela, proporciona um corte praticamente instantâneo, produzindo uma deformação mínima da peça de trabalho. Esse fato é de grande importância, pois os eletrodos não podem apresentar saliências, evitando assim o efeito das pontas e o acúmulo de cargas elétricas.

A máquina dotada de CNC também foi utilizada para a realização das dobras dos eletrodos devido à necessidade de elevada exatidão no trabalho. Pode-se visualizar os eletrodos prontos para uso nas Figuras 34 e 35.

Figura 34. Eletrodo de alta tensão.



Fonte: própria autora.

Figura 35. Eletrodo de terra.



Fonte: própria autora.

A cada ensaio realizado, os eletrodos de alta tensão e de aterramento foram trocados. Isso se deve ao fato de ambos os eletrodos sofrerem degradação durante os ensaios. A degradação dos eletrodos durante os testes pode ser visualizada nas Figuras 36 e 37.

Figura 36. Eletrodo de alta tensão degradado a 3,5 kV.



Fonte: própria autora.



Figura 37. Eletrodo de terra degradado a 3,5 kV.



Fonte: própria autora.

A utilização dos eletrodos degradados implicaria em uma mudança do campo elétrico em torno deles, logo, o emprego de novos eletrodos a cada teste garante resultados mais relevantes nos ensaios realizados.

## 5.2 ENSAIOS DE TRILHAMENTO E EROSÃO

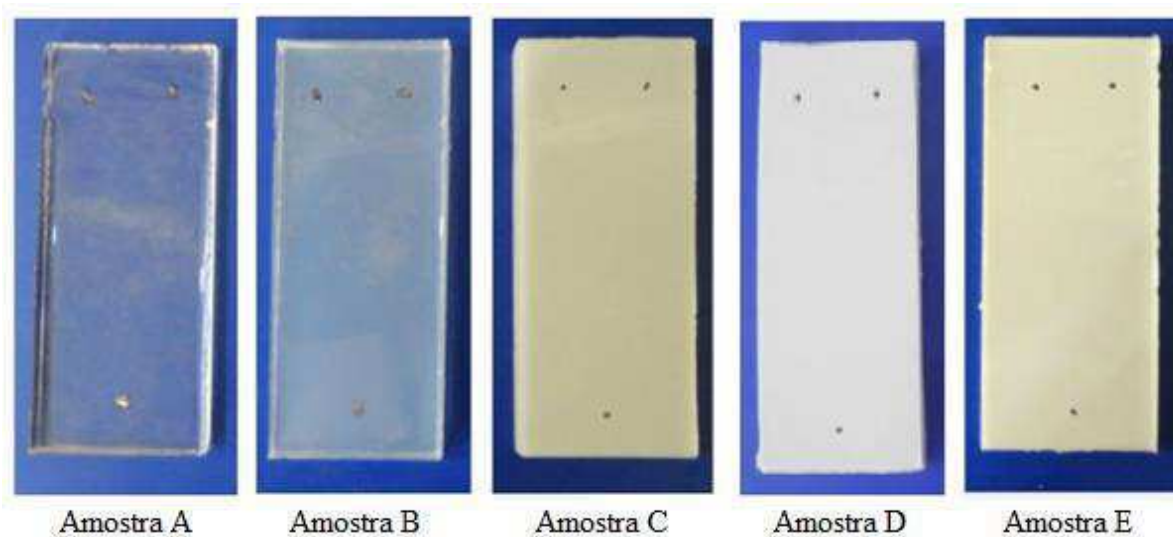
Após a construção do equipamento, foram realizados alguns ensaios com o objetivo de testar o seu funcionamento. As amostras utilizadas nos ensaios foram de cinco tipos diferentes. Para a realização dos ensaios tomou-se como base a borracha de silicone, amplamente empregada como base em isolamentos poliméricos. Como cargas, foram utilizados os compostos de nanosílica e ATH. Todas as amostras utilizadas nos ensaios foram preparadas no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) associado à Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da UFCG.

Para facilitar o trabalho com as análises, as amostras foram denominadas da seguinte maneira:

- Amostra A: Silicone puro;
- Amostra B: 5% Nanosílica e 95% Silicone;
- Amostra C: 20% Alumina Trihidratada e 80% Silicone;
- Amostra D: 50% Alumina Trihidratada e 50% Silicone;
- Amostra E: 3% Nanosílica, 20% Alumina Trihidratada e 75% Silicone.

As amostras a serem utilizadas nos ensaios estão ilustradas na Figura 38.

Figura 38. Amostras antes da realização dos ensaios.



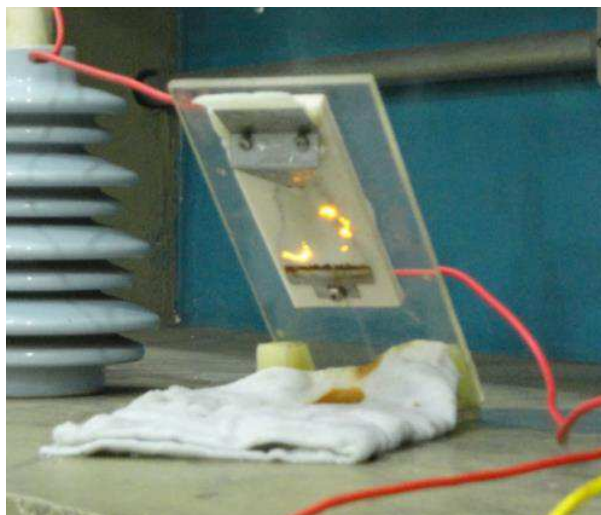
Fonte: própria autora.

Os ensaios de trilhamento e erosão empregando o equipamento construído foram realizados segundo a norma IEC 60587 (2007). Essa norma expõe que utilizando-se um controle constante de tensão, os melhores níveis a serem empregados são de 2,5 kV, 3,5 kV e 4,5 kV.

De acordo com os níveis de tensão sugeridos pela norma IEC 60587 (2007), os ensaios de trilhamento e erosão foram divididos em duas etapas. Primeiramente, foi realizada a etapa de ensaios em que as cinco amostras foram submetidas à tensão de 2,5 kV. Num segundo momento foram testadas mais cinco amostras dos mesmos materiais com uma tensão de 3,5 kV.

Nos dois ensaios, com 2,5 kV e com 3,5 kV, as descargas elétricas surgiram entre os eletrodos por meio do filamento do contaminante condutivo. Devido ao efeito Joule, o aquecimento do contaminante resultou em um aumento da temperatura média da superfície, fazendo com que as descargas produzissem um aquecimento localizado, podendo dar origem ao trilhamento e a erosão. Um exemplo do efeito das descargas elétricas sobre a superfície de uma das amostras pode ser visualizado na Figura 39.

Figura 39. Efeito das descargas elétricas sobre a superfície de uma das amostras.



Fonte: própria autora.

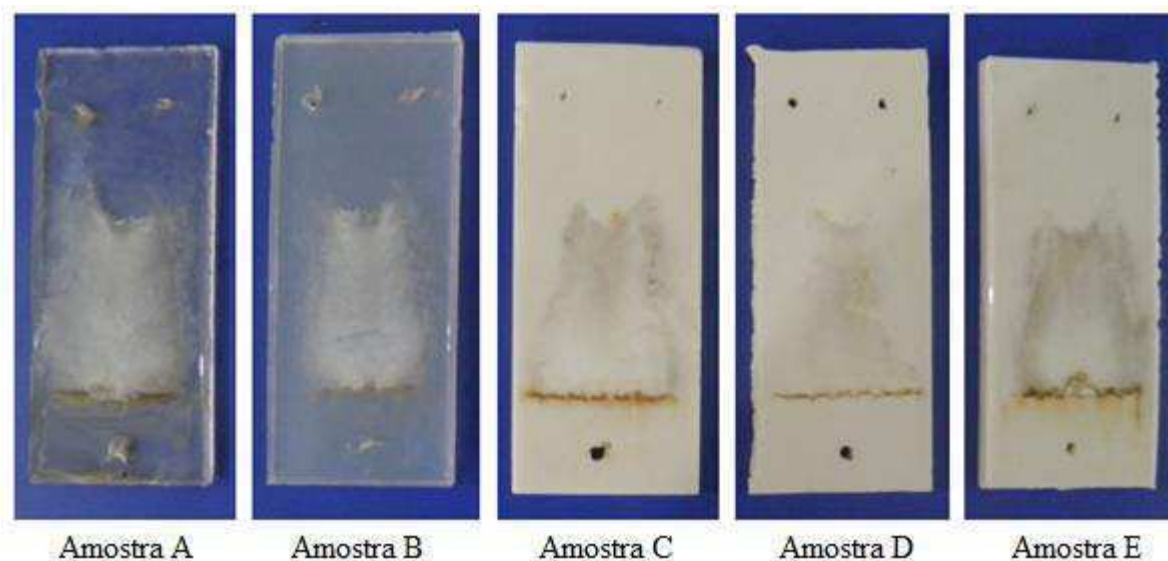
O aquecimento da superfície das amostras provocou diferentes manifestações:

- i. Formação de um filamento contínuo condutor sobre a superfície da amostra e o aquecimento desse local;
- ii. Formação de bandas secas no filamento condutor e a formação de arcos elétricos nas regiões, os quais podem ser extintos com uma nova passagem de contaminante ou por baixos valores de campo elétrico no local;
- iii. Um aumento no campo elétrico, intensificando as descargas elétricas e levando o material a uma gradual degradação.

### 5.2.1 ENSAIOS À TENSÃO DE 2,5 kV

A primeira etapa de ensaios realizados utilizou a tensão de 2,5 kV. Com a tensão aplicada, todas as cinco amostras testadas suportaram o ensaio durante as seis horas. Uma fotografia das amostras após os ensaios pode ser visualizada na Figura 40.

Figura 40. Amostras após os ensaios à tensão de 2,5 kV.



Fonte: própria autora.

De acordo com os ensaios realizados, foi montada uma tabela com os valores de trilhamento máximo alcançado, de profundidade da erosão e da massa perdida das cinco amostras testadas. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de trilhamento, erosão e massa perdida à 2,5 kV.

	Amostras				
	A	B	C	D	E
Trilhamento (mm)	4,68	4,09	3,07	3,50	8,17
Profundidade de Erosão (mm)	2,23	0,43	0,41	0,49	1,37
Massa Perdida (mg)	66,90	55,60	44,30	52,10	196,40

Fonte: própria autora.

As medidas de trilhamento máximo e profundidades de erosão foram alcançadas com o uso de um paquímetro. Já para obter os valores de massa perdida utilizou-se uma balança de precisão.

Com a aplicação da tensão de 2,5 kV, a amostra que manifestou uma melhor resistência ao trilhamento foi a amostra C, apresentando um trilhamento de 3,07 mm. Em contrapartida, o pior desempenho foi detectado na amostra E, na qual a tensão aplicada formou um caminho carbonizado de 8,17 mm.

Em relação à profundidade de erosão, apesar de todas as amostras apresentarem valores muito próximos, a amostra C novamente foi a que apresentou um melhor resultado.

Ela apresentou uma profundidade de erosão de 0,41 mm. O pior desempenho em relação à erosão foi obtido pela amostra *A* que apresentou uma profundidade de 2,23 mm.

Já em relação à massa perdida, a amostra *C* foi a que apresentou menor desgaste, ao contrário da amostra *E*, que apresentou a maior perda de massa.

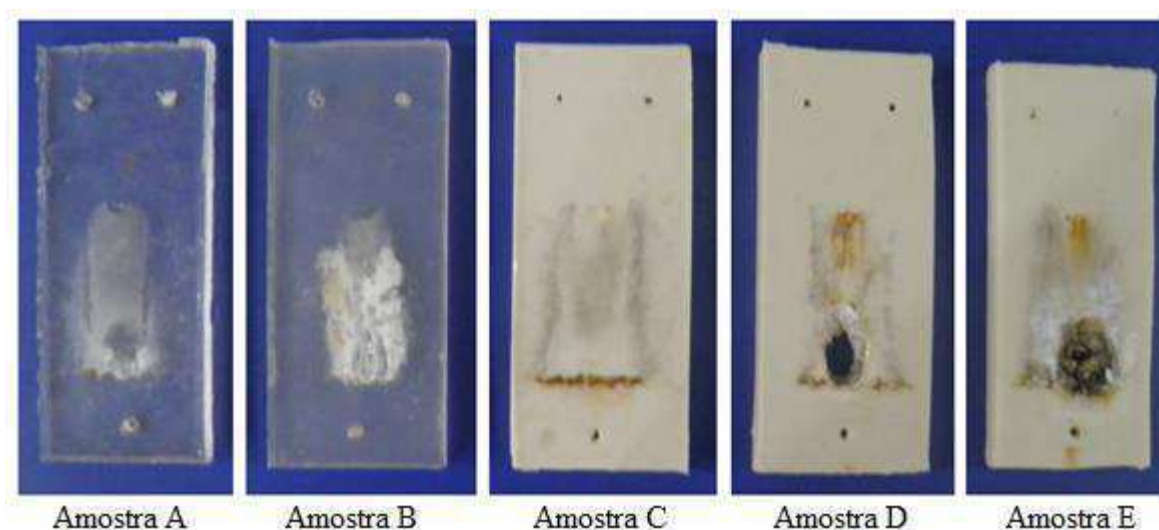
De um modo geral, a amostra *C* foi a que apresentou o melhor desempenho. Ela obteve os melhores resultados em relação ao trilhamento, erosão e massa perdida.

Apesar de todas as amostras resistirem aos testes, a que demonstrou um pior comportamento foi a amostra *E*, apresentando os maiores valores de distância de trilhamento e perda de massa. Era esperado que essa amostra apresentasse um melhor comportamento devido as cargas em sua composição, logo, para obter melhores resultados seria necessário que fossem testadas mais amostras com a mesma composição.

### 5.2.2 ENSAIOS À TENSÃO DE 3,5 kV

A segunda etapa de ensaios realizados foi utilizando a tensão de 3,5 kV. Com a tensão aplicada, todas as cinco amostras testadas falharam devido a algum critério de parada. As amostras após os ensaios podem ser visualizadas na Figura 41.

Figura 41. Amostras após os ensaios à tensão de 3,5 kV.



Fonte: própria autora.

Os tempos de duração dos ensaios das amostras podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4. Tempo de duração dos ensaios.

Amostras	Tempo de Ensaio
A	42min
B	30min
C	2h10min
D	2h26min
E	4h38min

Fonte: própria autora.

As amostras *A*, *B* e *C* falharam devido ao valor da corrente no circuito exceder 60 mA e persistir por mais de 2 s. A amostra *D* apresentou falha devido ocorrência de perfuração provocada pela erosão do material. Já a amostra *E* inflamou durante o ensaio.

Ao comparar o desempenho das amostras as diferentes tensões aplicadas, pode-se classificá-las quanto à tensão de trilhamento. Como todas as amostras falharam a tensão de 3,5 kV e sabendo-se que a tensão de trilhamento é a tensão máxima suportada durante os ensaios, a tensão de trilhamento das amostras estudadas é de 2,5 kV.

De acordo com os ensaios realizados, foi montada uma tabela com os valores de trilhamento máximo alcançado, de erosão e também de massa perdida das cinco amostras testadas. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de trilhamento, erosão e massa perdida à 3,5 kV.

	Amostras				
	A	B	C	D	E
Trilhamento (mm)	7,45	30,80	4,74	24,83	27,18
Profundidade de Erosão (mm)	3,05	2,45	0,70	6,00	6,00
Massa Perdida (mg)	89,70	257,90	92,80	2074,10	3211,50

Fonte: própria autora.

Ao contrário das análises realizadas com a tensão de 2,5 kV, nessa etapa não irão ser comparados os valores de distância de trilhamento, erosão e massa perdida. Os estudos comparativos não irão ser realizados devido ao fato das amostras terem sido submetidas a tensão de 3,5 kV por períodos diferentes de tempo.

Finalizando a análise dos ensaios a tensão de 3,5 kV, chega-se a conclusão que, apesar de apresentar os piores resultados na Tabela 5, a amostra *E* apresenta o melhor desempenho ao trilhamento e erosão devido a sua maior resistência.

De forma análoga, apesar de apresentar menores valores de trilhamento, erosão e massa perdida, em comparação a outras amostras, a amostra *B* foi a que falhou mais rapidamente, apresentando assim, o pior desempenho entre as amostras ensaiadas.

Como já discutido anteriormente, nos ensaios utilizando a tensão de 2,5 kV, a amostra que apresentou melhores resultados foi a amostra *C*, já nos ensaios com a tensão de 3,5 kV, os melhores resultados foram obtidos pela amostra *E*. Tal fato pode ser explicado pela maior quantidade de carga na amostra *E*, ou seja, melhores resultados em tensões mais elevadas são obtidos com uma maior adição de cargas ao polímero base. Um exemplo de resultado que corrobora com a afirmação de que o uso de maiores quantidades de cargas favorecem ao aumento da resistência do polímero base aos fenômenos de trilhamento e erosão é encontrado em Almirall (2013).

### 5.2.3 RESULTADOS GERAIS DOS ENSAIOS

Observando-se todos os ensaios, um dos pontos em comum encontrados foi o padrão de degradação da superfície das amostras. O desgaste começou sempre no eletrodo de terra e se espalhou para o eletrodo superior de alta tensão.

Outro ponto em comum encontrado foi o aumento da corrente de fuga, a qual provocava centelhamentos sobre a amostra. Inicialmente, a corrente apresentava valores baixos que aumentavam conforme o ensaio acontecia, dando início à degradação das amostras.

De uma forma geral, os ensaios nas amostras mostraram que, ao serem adicionadas cargas ao polímero base de silicone, tem-se como resultado um aumento da resistência ao trilhamento e à erosão. Isso ocorre porque as cargas agregadas possuem características específicas que proporcionam um melhor desempenho da borracha de silicone. Dentre essas propriedades, a adição de nanosílica proporciona uma maior resistência, dureza e tenacidade à borracha de silicone. Já a adição de ATH fornece uma melhor condutividade térmica às amostras.

## 5.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS ENSAIOS

Nessa subseção irão ser discutidos os resultados encontrados empregando dois diferentes tipos de análises. A primeira análise empregada é a análise de variância, logo após, será estudada a correlação entre os objetos de estudo. Para ambos os métodos estatísticos, foi utilizada uma pequena base de dados obtidos através dos ensaios realizados,

o que pode implicar em resultados com menor precisão do que se houvessem mais amostras testadas.

### 5.3.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O TRILHAMENTO

Ao realizar os ensaios, verificou-se que existem variações no trilhamento das amostras, em função do emprego de diferentes tensões. Logo, tornou-se necessária uma análise estatística para verificar tais variações. Para a realização da análise de variância (ANOVA), os valores obtidos de trilhamento para as tensões de ensaio foram reunidos na Tabela 6.

*Tabela 6. Valores de trilhamentos medidos nos ensaios.*

Amostras	Trilhamento (mm)	
	2,5 kV	3,5 kV
A	4,68	7,45
B	4,09	30,80
C	3,07	4,74
D	3,50	24,83
E	8,17	27,18

Fonte: própria autora.

A análise estatística foi realizada de modo a saber se a variação das características das amostras (por exemplo tipo e concentração das cargas) influencia no trilhamento das mesmas. Na análise de variância foi utilizada uma dupla entrada, ou seja, foram considerados dois tipos de tratamentos: as amostras e os níveis de tensão.

Atendendo as especificações da análise de variância e a fim de tomar decisões sobre as diferenças observadas nos valores de trilhamento, foram estabelecidas as seguintes hipóteses:

- Para as amostras
  - $H_{0A}$  – Equivale a dizer que todos os possíveis contrastes entre médias de trilhamentos, são estatisticamente nulos, em relação às amostras, ao nível de probabilidade que foi executado o teste;
  - $H_{1A}$  – Equivale a dizer que existe, pelo menos, um contraste entre médias de trilhamento, em relação às amostras, estatisticamente diferente de zero, ao nível de probabilidade que foi executado o teste.



- Para as tensões
  - $H_{0T}$  – Equivale a dizer que todos os possíveis contrastes entre médias de trilhamentos, em relação as tensões, são estatisticamente nulos ao nível de probabilidade que foi executado o teste;
  - $H_{1T}$  – Equivale a dizer que existe, pelo menos, um contraste entre médias de trilhamento, em relação as tensões, estatisticamente, diferente de zero, ao nível de probabilidade que foi executado o teste.

Os resultados da aplicação da ANOVA sobre os diferentes valores de trilhamento e tensões de aplicação podem ser vistos na Tabela 7.

*Tabela 7. ANOVA para valores de trilhamento.*

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F calculado	valor-P	F crítico (1%)	F crítico (5%)
Amostra	334,37	4	83,59	1,29	0,41	15,98	6,39
Tensão	511,08	1	511,08	7,89	0,05	21,20	7,71
Erro	259,04	4	64,76				
Total	1104,48	9					

Fonte: própria autora.

A Tabela 7, com os valores da ANOVA para trilhamento, apresenta dois valores de  $F_{\text{crítico}}$ , sendo o primeiro para um nível de significância de 1% e outro com um nível de 5%.

Realizando-se a análise da Tabela 7, considerando as amostras como fonte de variação, pode-se verificar que os valores encontrados para  $F_{\text{calculado}}$  são inferiores aos valores de  $F_{\text{crítico}}$ . Dessa maneira, não se pode rejeitar, estatisticamente, a hipótese de nulidade  $H_{0A}$ .

Analisando-se a Tabela 7, considerando como fonte de variação as tensões aplicadas e para um nível de significância de 5%, o valor de  $F_{\text{calculado}}$  é superior ao valor de  $F_{\text{crítico}}$ . Desse modo, a hipótese  $H_{0T}$  é rejeitada, como esperado, e a hipótese  $H_{1T}$  é aceita com um grau de confiança de 95%. Tal resultado significa que os diferentes níveis de tensão aplicados nas amostras, provocam diferentes comportamentos nas medidas de distância de trilhamento.

### 5.3.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA A EROSÃO

Para a realização da ANOVA em relação à erosão, os valores obtidos nos ensaios, para as diferentes tensões foram reunidos na Tabela 8.

*Tabela 8. Valores de erosão medidos nos ensaios.*

Amostras	Erosão (mm)	
	2,5 kV	3,5 kV
A	2,23	3,05
B	0,43	2,45
C	0,41	0,70
D	0,49	6,00
E	1,37	6,00

Fonte: própria autora.

A ANOVA foi novamente empregada de modo agora a estudar a influência da variação das características das amostras no processo de erosão. Na análise de variância foi utilizada novamente uma dupla entrada, sendo considerados como fontes de variação, as amostras e os níveis de tensão.

Atendendo as especificações da análise de variância e a fim de tomar decisões sobre as diferenças observadas nos valores de erosão, foram estabelecidas as seguintes hipóteses:

- Para as amostras
  - $H_{0A}$  – Equivale a dizer que todos os possíveis contrastes entre médias de profundidade de erosão, em relação às amostras, são estatisticamente nulos ao nível de probabilidade que foi executado o teste;
  - $H_{1A}$  – Equivale a dizer que existe, pelo menos, um contraste entre médias de profundidade de erosão, em relação às amostras, estatisticamente, diferente de zero, ao nível de probabilidade que foi executado o teste.
  
- Para as tensões
  - $H_{0T}$  – Equivale a dizer que todos os possíveis contrastes entre médias de profundidade de erosão, em relação as tensões, são estatisticamente nulos ao nível de probabilidade que foi executado o teste;

- $H_{1T}$  – Equivale a dizer que existe, pelo menos, um contraste entre médias de profundidade de erosão, em relação as tensões, estatisticamente, diferente de zero, ao nível de probabilidade que foi executado o teste.

Os resultados da aplicação da ANOVA sobre os diferentes valores de erosão e tensões de aplicação podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9. ANOVA para valores de erosão.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F calculado	valor-P	F crítico (5%)	F crítico (7%)
Amostra	13,42	4	3,36	1,25	0,42	6,39	5,18
Tensão	17,61	1	17,61	6,58	0,06	7,71	6,03
Erro	10,71	4	2,68				
Total	41,74	9					

Fonte: própria autora.

Assim como na análise para o trilhamento, a Tabela 9 mostra os valores da ANOVA para erosão e apresenta dois valores de  $F_{\text{crítico}}$ , sendo o primeiro para um nível de significância de 5% e outro com um nível de 7%.

Analisando-se a Tabela 9 para ambos os valores de significância, os valores de  $F_{\text{calculado}}$  são inferiores aos valores de  $F_{\text{crítico}}$ . Desse modo, não se pode rejeitar estatisticamente a hipótese de nulidade  $H_{0A}$ .

Analisando-se a Tabela 9 considerando como fonte de variação as tensões aplicadas e para um nível de significância de 7%, o valor de  $F_{\text{calculado}}$  é superior ao valor de  $F_{\text{crítico}}$ . Desse modo, a hipótese  $H_{0T}$  é rejeitada, como esperado, e a hipótese  $H_{1T}$  é aceita com um grau de confiança de 93%. O resultado significa que os diferentes níveis de tensão aplicados nas amostras provocam diferentes comportamentos nas profundidades de erosão medidas após os testes.

### 5.3.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO A TENSÃO DE 2,5 kV

O objetivo desta subseção é realizar uma avaliação do grau de relacionamento entre as variáveis em estudo, de modo a descobrir o quanto uma variável interfere no resultado da outra. Para esse fim, resolveu-se empregar a técnica de análise de correlação. As variáveis analisadas foram:

- Quantidade de carga empregada nas amostras (q);
- Distância de trilhamento após a aplicação da tensão (t);
- Profundidade de erosão após a aplicação da tensão (e);
- Massa perdida após o fim dos ensaios (m).

Os valores correspondentes as variáveis foram reunidos na Tabela 10.

Tabela 10. Valores correspondentes as variáveis de análise submetidas à tensão de 2,5 kV.

q (%)	t (mm)	e (mm)	m (mg)
0	4,68	2,23	66,90
5	4,09	0,43	55,60
20	3,07	0,41	44,30
50	3,50	0,49	52,10
23	8,17	1,37	196,40

Fonte: própria autora.

A quantidade de carga empregada (q) corresponde ao volume total de enchimentos utilizados em cada amostra, ou seja, o somatório de nanosílica e alumina trihidratada contida em cada material que foi ensaiado.

De acordo com os valores da Tabela 10, foi realizado o cálculo dos coeficientes de Pearson. O resultado encontrado será mostrado na forma da matriz  $\rho$  a seguir.

$$\rho = \begin{bmatrix} q x q & q x t & q x e & q x m \\ t x q & t x t & t x e & t x m \\ e x q & e x t & e x e & e x m \\ m x q & m x t & m x e & m x m \end{bmatrix}$$

Aplicando a fórmula do coeficiente de correlação de Pearson, contida no Anexo 2, se obtém os seguintes valores como resposta:

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & -0,10 & -0,48 & 0,03 \\ -0,10 & 1 & 0,49 & 0,98 \\ -0,48 & 0,49 & 1 & 0,37 \\ 0,03 & 0,98 & 0,37 & 1 \end{bmatrix}$$

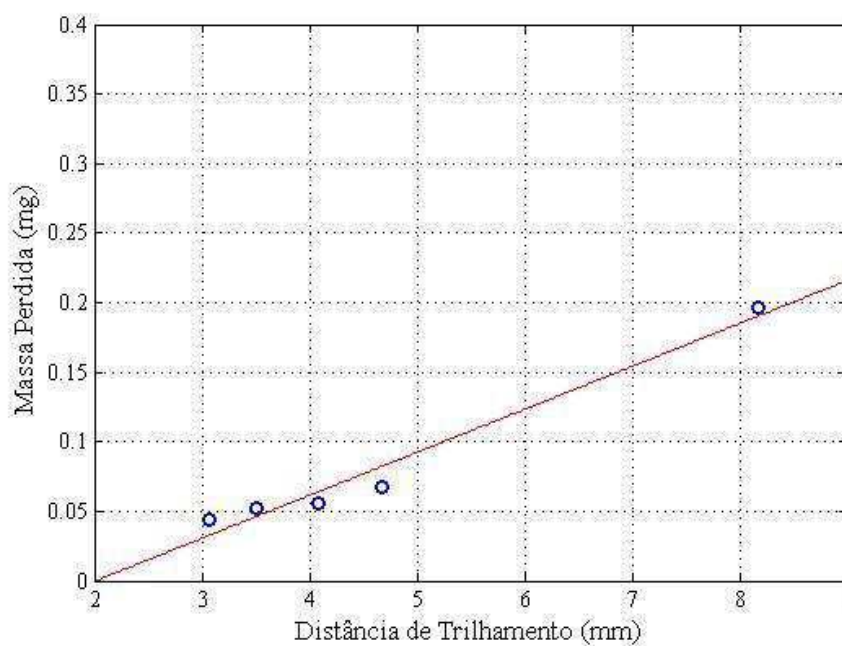
Sabendo-se que o coeficiente de correlação está isento de unidades e da ordem de grandeza das variáveis, este assume valores entre -1 e 1. Quando a correlação entre as grandezas for perfeita, o coeficiente  $\rho$ , tomará o valor 1. Já quando a relação entre as

grandezas for difusa ou não linear, o coeficiente  $\rho$  será igual a 0. Valores intermediários entre -1 e 1 são interpretados como indicado na Tabela 13, Anexo 2.

Analisando-se os valores encontrados após os cálculos e de acordo com a Tabela 13, a correlação que se apresentou mais forte foi entre as grandezas  $t$  e  $m$ . Essas grandezas apresentaram um coeficiente de correlação de 0,98, sendo classificado como correlação muito forte. Devido ao valor positivo encontrado, as grandezas em questão são diretamente proporcionais, o que significa que quanto maior for o caminho percorrido pelo trilhamento, mais massa a amostra vai perder.

De modo a reforçar o resultado obtido, foi gerado um gráfico de dispersão entre as grandezas  $t$  e  $m$  e comprovou-se que elas apresentam uma tendência linear. O gráfico gerado pode ser visualizado na Figura 42.

Figura 42. Gráfico gerado para comprovar a correlação 'forte' entre as grandezas ' $t$  x  $m$ '.

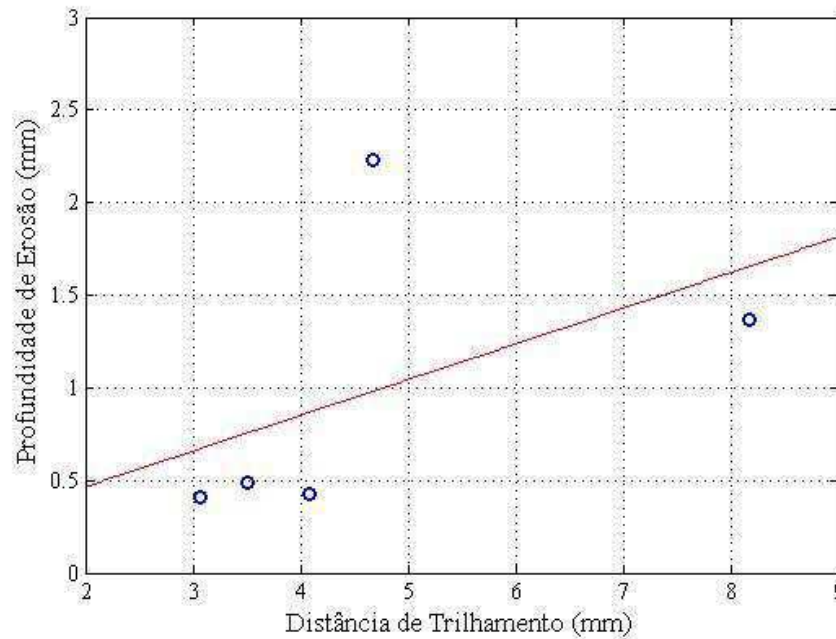


Fonte: própria autora.

De acordo com os valores calculados e, segundo a Tabela 13, os pares de grandezas ' $t$  x  $e$ ' e ' $q$  x  $e$ ' apresentaram correlações moderadas, sendo seus valores de 0,49 e - 0,48. Como o valor da correlação entre ' $t$  x  $e$ ' é positivo, ao ser gerado o gráfico de dispersão, a tendência linear formada foi crescente, o que mostra que as grandezas são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior for o caminho percorrido pelo trilhamento, maior será o efeito da erosão nas amostras. Resultado contrário foi obtido com as grandezas ' $q$  x  $e$ ', as quais resultaram em um gráfico de tendência linear negativa, o que mostra que as variáveis

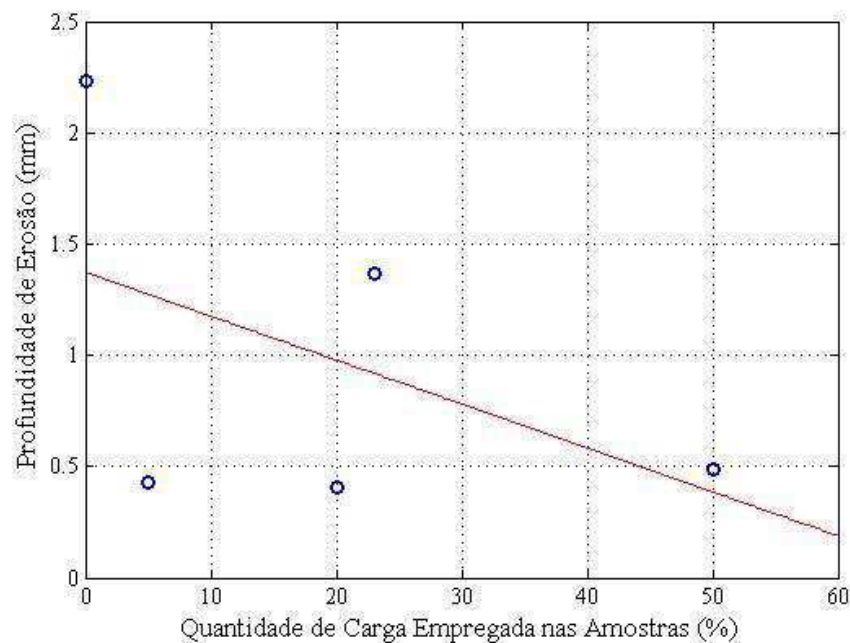
são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior for a quantidade de carga utilizada na composição das amostras, menor será o efeito da erosão. Os gráficos gerados para essas análises de ' $t \times e$ ' e ' $q \times e$ ' estão ilustrados nas Figuras 43 e 44.

Figura 43. Gráfico gerado mostrando a correlação 'moderada' entre as grandezas ' $t \times e$ '.



Fonte: própria autora.

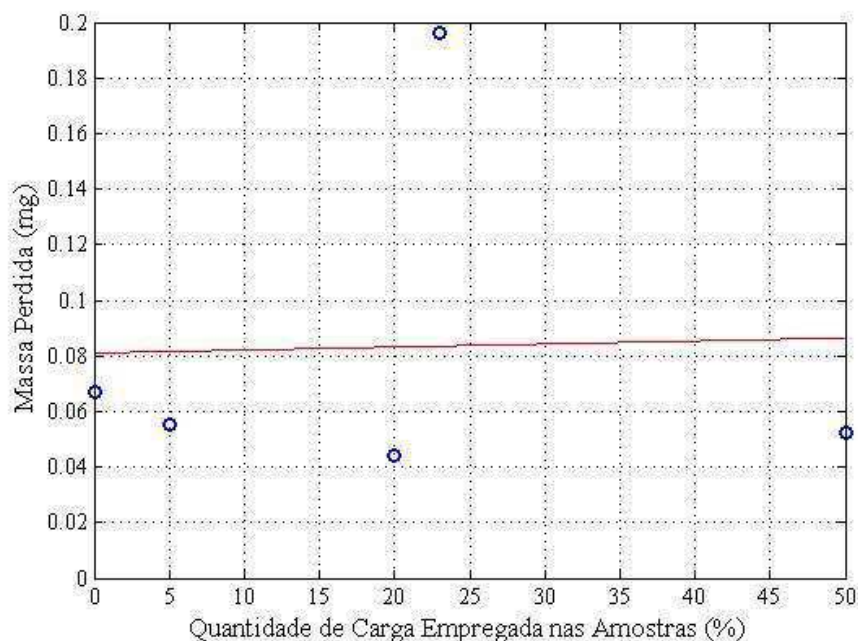
Figura 44. Gráfico gerado mostrando a correlação 'moderada' entre as grandezas ' $q \times e$ '.



Fonte: própria autora.

Finalizando-se a análise de correlação entre as grandezas nos ensaios utilizando a tensão de 2,5 kV, a correlação entre  $q \times m$  foi a pior, sendo de 0,03 e classificada como muito fraca. Essa classificação pode ser comprovada de acordo com o gráfico de dispersão na Figura 45.

Figura 45. Gráfico gerado mostrando a correlação ‘muito fraca’ entre as grandezas ' $q \times m$ '.



Fonte: própria autora.

De acordo com a Figura 45 conclui-se que não há um padrão linear entre os pontos, eles se distribuem de maneira aleatória. Logo, não há correlação entre a quantidade de carga empregada nas amostras e a massa perdida nos ensaios.

A correlação entre  $q \times t$  apresentou um valor de - 0,10, sendo classificada também como muito fraca. Já o par de grandeza  $e \times m$  teve a correlação classificada como fraca, com um valor de 0,37.

#### 5.3.4 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO A TENSÃO DE 3,5 kV

O objetivo dessa subseção, assim como o da anterior, é de avaliar do grau de relacionamento entre as variáveis em estudo, de modo a descobrir o quanto uma variável interfere no resultado da outra.

As variáveis analisadas foram:

- Quantidade de carga empregada nas amostras (q);
- Distância de trilhamento após a aplicação da tensão (t);

- Profundidade de erosão após a aplicação da tensão (e);
- Massa perdida após o fim dos ensaios (m);
- Tempo de ensaio (T).

Os valores correspondentes as variáveis foram reunidos na Tabela 11.

Tabela 11. Valores correspondentes as variáveis de análise submetidas à tensão de 3,5kV.

q (%)	t (mm)	e (mm)	m (mg)	T (min)
0	7,45	3,05	89,70	42
5	30,80	2,45	257,90	30
20	4,74	0,70	92,80	130
50	24,83	6,00	2074,10	146
23	27,18	6,00	3211,50	278

Fonte: própria autora.

De acordo com os valores da Tabela 11, foi realizado o cálculo dos coeficientes de Pearson. O resultado encontrado será mostrado na forma da matriz  $\rho$  a seguir.

$$\rho = \begin{bmatrix} q \times q & q \times t & q \times e & q \times m & q \times T \\ t \times q & t \times t & t \times e & t \times m & t \times T \\ e \times q & e \times t & e \times e & e \times m & e \times T \\ m \times q & m \times t & m \times e & m \times m & m \times T \\ T \times q & T \times t & T \times e & T \times m & T \times T \end{bmatrix}$$

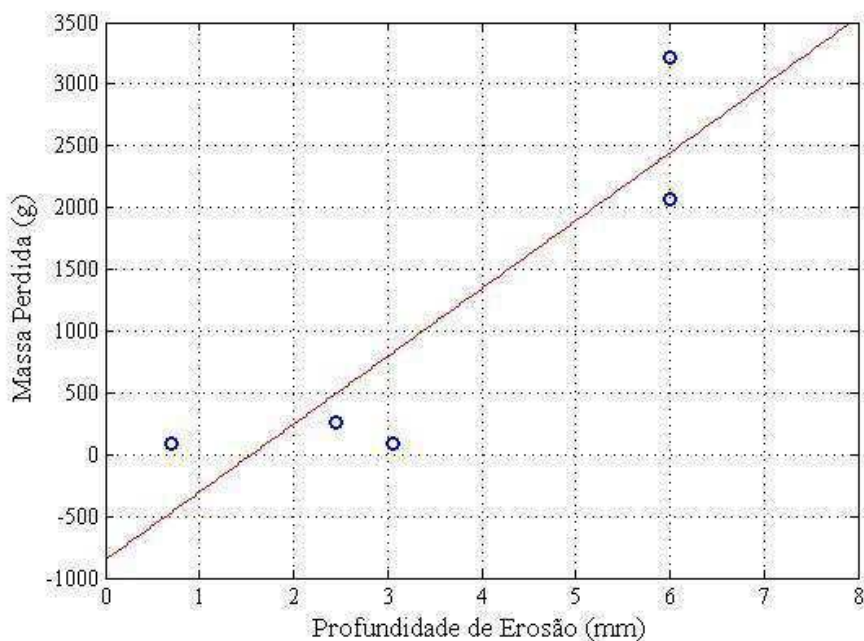
Aplicando a fórmula do coeficiente de correlação de Pearson, contida no Anexo 2, se obtém os seguintes valores como resposta:

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0,27 & 0,59 & 0,61 & 0,53 \\ 0,27 & 1 & 0,61 & 0,57 & 0,24 \\ 0,59 & 0,61 & 1 & 0,89 & 0,60 \\ 0,61 & 0,57 & 0,89 & 1 & 0,88 \\ 0,53 & 0,24 & 0,60 & 0,88 & 1 \end{bmatrix}$$

De acordo com os resultados encontrados realizando-se os cálculos, as grandezas que mais se correlacionaram foram a profundidade de erosão e a massa perdida. O resultado encontrado para ' $e \times m$ ' foi de 0,89, sendo classificada como correlação forte. Como o valor encontrado foi positivo, mostra que as grandezas são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior for a profundidade de erosão, maior será a quantidade de massa perdida. O gráfico de dispersão entre as grandezas ' $e \times m$ ' pode ser visualizado na Figura 46.



Figura 46. Gráfico gerado para comprovar a correlação 'forte' entre as grandezas 'e x m'.



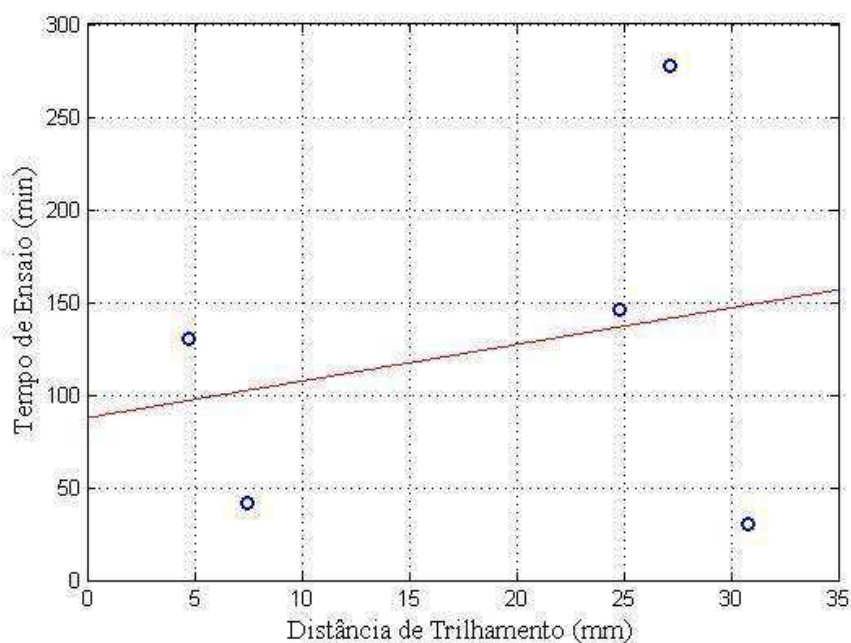
Fonte: própria autora.

A correlação entre 'm x T' também foi classificada como forte, com um valor de  $\rho = 0,8840$ , ou seja, quanto maior for o caminho percorrido pelo trilhamento, maior será a quantidade de massa perdida pelas amostras.

As correlações entre 'q x e', 'q x m', 'q x T', 't x e', 't x m' e 'e x T' apresentaram valores muito próximos e foram classificadas como correlações moderadas.

Em relação à tensão de 3,5 kV, a correlação classificada como mais fraca foi entre as grandezas 't x T', apresentando um valor de 0,24. O valor positivo dessa correlação implica que essas grandezas são diretamente proporcionais. O gráfico de dispersão entre as grandezas 't x T' pode ser visualizado na Figura 47.

Figura 47. Gráfico gerado para comprovar a correlação ‘fraca’ entre as grandezas  $t$  x  $T'$ .



Fonte: própria autora.

Finalizando as análises de correlação, concluiu-se que em comparação a totalidade dos ensaios, as grandezas que mais se correlacionaram foram a distância de trilhamento e a perda de massa, com uma tensão aplicada de 2,5 kV. Em contrapartida, a pior correlação encontrada nas análises foi entre quantidade de carga e perda de massa, com a aplicação de 2,5 kV.

Neste capítulo, foram apresentados os resultados e análises sobre a construção do equipamento, bem como alguns ensaios de trilhamento e erosão realizados com diferentes tipos de materiais isolantes elétricos. A partir dos resultados dos ensaios, foram apresentadas também algumas análises estatísticas. No próximo capítulo vão ser apresentadas as conclusões do trabalho.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvido um equipamento para a realização de ensaios de trilhamento e erosão no Laboratório de Alta Tensão da UFCG. Para essa construção, seguiram-se as instruções contidas na IEC 60587 (2007). O esquema montado permitiu que fossem comparados diferentes materiais sob tensões controladas a fim de estudar as suas características, mostrando-se uma ferramenta valiosa para a avaliação e comparação das amostras em estudo.

A metodologia empregada para a construção do equipamento além de se mostrar útil para a avaliação dos fenômenos de trilhamento e erosão poderá servir como modelo para a construção de equipamentos que realizem outros tipos de ensaios.

Os estudos realizados utilizaram silicone como polímero base e a ele foram adicionadas cargas de nanosílica e ATH em diferentes composições.

A partir da análise dos ensaios realizados a diferentes níveis de tensão, chegou-se à conclusão que as cargas adicionadas ao silicone aumentam sua resistência aos fenômenos de trilhamento e erosão. Levando em conta os estudos desenvolvidos e as análises feitas sobre os fenômenos de trilhamento e erosão, foi possível internalizar e sedimentar no grupo de pesquisa conhecimentos referentes a esses fenômenos.

Além dessas avaliações, foi efetuada também uma análise estatística, o que contribui de forma significativa para o trabalho realizado já que essa etapa não é prevista pela norma IEC 60587 (2007).

Primeiramente foi realizada uma análise de variância. Aplicando-se a ANOVA, foi comprovado estatisticamente que utilizando diferentes quantidades de cargas nas composições das amostras, as medidas das distâncias de trilhamento e as medidas de profundidade de erosão apresentam diferentes comportamentos quando as amostras são expostas a diferentes níveis de tensão. Logo, equivale a dizer que quanto maior for a tensão aplicada nas amostras, mais elas vão sofrer os fenômenos de trilhamento e erosão, o que pode ser comprovado estatisticamente e visualmente.

Com relação às análises estatísticas desenvolvidas sobre os coeficientes de correlação, o melhor resultado encontrado foi entre as grandezas de distância de trilhamento e massa perdida, ao se aplicar a tensão de 2,5 kV. As grandezas apresentaram a correlação

de 0,98, o que significa que são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior for o caminho percorrido pelo trilhamento, mais massa a amostra perde.

Ainda sobre a análise dos coeficientes de correlação, o pior resultado encontrado se refere às grandezas de quantidade de carga utilizada e massa perdida durante os ensaios com a tensão de 2,5 kV. De acordo com os cálculos,  $\rho = 0,03$ , o que implica que as grandezas  $q$  e  $m$  não apresentam correlação.

No contexto geral, o equipamento construído atende adequadamente as diretrizes apresentadas na IEC 60587 (2007) e dispõe de potencial para avaliar materiais já existentes e novos materiais.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação ao trabalho realizado, propõe-se:

- Aprimorar o equipamento de modo a realizar ensaios simultâneos de mais amostras no mesmo equipamento;
- Realizar o estudo da degradação dos eletrodos, objetivando saber se com algum tratamento podem ser reutilizados;
- Desenvolver um sistema de contaminação automático de modo a obter uma maior precisão de fluxo de contaminante;
- Desenvolver um sistema de monitoramento e armazenamento dos sinais de corrente de fuga;
- Realizar estudos de análises estatísticas com um maior número de amostras;
- Realizar estudos de trilhamento e erosão com a aplicação de diferentes níveis de tensão controlada;
- Realizar estudos de trilhamento e erosão com a aplicação de controle variável de tensão.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 14724 - Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]: ABNT. 30 dez. 2005. p. 9.

ALBRIGHT, M. W.; STARR, W. T. **Tracking Resistance Test Methods**. [S.l.]: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, v. 3, n. 75, 1956.

ALMIRALL, I. P.; BEZERRA, D. C.; FERNÁNDEZ, M. C.; GUEDES, E. C.; GERMANO, A. D. **Nanosílice como carga en la RTV SR usada para cubrir aisladores**. Ingeniería Energética, v. 33, n. 1, p. 9-15, 2012.

ALMIRALL, I. P. **Empleo Conjunto de Cargas Micrométricas y Nanométricas para Mejorar el Desempeño de la Silicona Vulcanizada a Temperatura Ambiente Empleada para Recubrir el Aislamiento Externo**. Tese de Doutorado. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana. 2013.

AMPLA. **Transformador de Distribuição Monofásico, Bifásico e Trifásico**. Norma Técnica D1844/2012 R-10. 2012.

ARDUINO, 2015. Disponível em: <<http://www.Arduino.cc/en/Main/Products>>. Acesso em: Junho 2015.

ASSIS, P. D. K. B. **Microcontrolador**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Presidente Antônio Carlos. Barbacena. 2004.

ASTM 2132. **Standard Test Method for Dust-and-Fog Tracking and Erosion Resistance of Electrical Insulating Materials**. ASTM International. [S.l.]. 1999.

BALESTRO. Disponível em: <[http://www.balestro.com/\\_web/cases/default.asp?id=4](http://www.balestro.com/_web/cases/default.asp?id=4)>. Acesso em: Maio 2015.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação Agrícola**. Jaboticabal: Funep. 4 ed. 2006.

BEZERRA, D. C. **Revestimento de Isoladores Elétricos Utilizando Borracha de Silicone/Alumina Trihiidratada/Nanosílica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2014.

BRUCE, G. P.; ROWLAND, S. M.; KRIVDA, A. **Performance of Silicone Rubber in DC Inclined Plane Tracking Tests**. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 17, n. 2, 2010.

CAETANO, E. R. R. **Análise de Variância Utilizando Modelos Autorregressivos em Experimentos com Dependência Espacial**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG. 2013.

COHEN, J., COHEN, P., WEST, S. G., & AIKEN, L. S. **Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences**. Routledge. 2013.

DESHMUKH, A. V. **Microcontrollers: Theory and Applications**. Tata McGraw-Hill Education. [S.l.]. 2005.

EVANS, M.; NOBLE, J. H. J. **Arduino em Ação**. Novatec. São Paulo. 2013.

FERREIRA, T. V. **Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2007.

FIGUEIREDO, D. B.; JÚNIOR, J. A. S. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. Revista Política Hoje, v. 18, n. 1, 2010.

FILHO, B. A. C. C. **Microcontroladores - Básico PIC - Microchip**. [S.l.]. 2007.

GERMANO, A. D. **Análise da Degradação de Isolamentos Poliméricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2010.

GÓIS, N. C.; ROSSI, J. A. D.; NALLIN, F. E.; PETRACHIM, J. A.; ANGELINI, J. M. G. **Aplicação de Sensor para Monitoramento da Degradação de Isoladores Poliméricos de EPDM na COELBA.XIX SNPTEE** (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica). Rio de Janeiro, RJ. 2007

GOMES, E. L. B.; TAVARES, L. A. **Uma Solução com Arduino para Controlar e Monitorar Processos Industriais**. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Nacional de Telecomunicações. [S.l.]. 2013.

GOMES, P. G. **Curso de Estatística Experimental**. 13 ed. Nobel. 1990.

GONZALES, E. G. C.; SENS, M. A.; VISCONTE, L. Y.; NUNES, R. C. R. **Propriedades Dielétricas de Composições de Silicone para uso em Isoladores de Linhas de Transmissão.XVI SNPTEE** (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica). Campinas, SP. 2001.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. **Outdoor Insulators**. Ravi S. Gorur. [S.l.]. 1999.

GUASTAVINO, F.; THELAKKADAN, A. S.; COLETTI, G.; RATTO, A. **Electrical Tracking in Cycloaliphatic Epoxy Based Nano Structured Composites**. In: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2009. CEIDP'09. IEEE Conference on. IEEE, 2009.

HALL, J. F. **History and Bibliography of Polymeric Insulators of Outdoor Applications**. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 8, 1993.

HALMEMAN, R. J. **Desenvolvimento de um Sistema para Monitoramento Remoto em Centrais de Microgeração Fotovoltáica**. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP. Botucatu, SP. 2014.

IEC 60112. **Method for the Determination of the Proof and the Comparative Tracking Indices of Solid Insulating Materials**. [S.l.]. 2003.

IEC 60587. **Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion**. [S.l.]: [s.n.]. 2007.

IEC TS 62073. **Technical Specification - Guidance on the Measurement of Wettability**. [S.l.]. 2003.

KANNAN, P.; SIVAKUMAR, M.; MEKALA, K.; CHANDRASEKAR, S. **Tracking/Erosion Resistance Analysis of Nano-Al (OH) 3 Filled Silicone Rubber Insulating Materials for High Voltage DC Applications**. Journal of Electrical Engineering & Technology, v. 10, n. 1, 2015.

KRIVDA, A.; SCHMIDT, L. E.; KORNMANN, X.; HILLBORG, H.; GHORBANI, H.; GHORBANDAEIPOUR, A.; ERIKSSON, M. **Inclined-Plane Tracking and Erosion Test according to the IEC 60587 Standard**. In: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008. Annual Report Conference on. IEEE, 2008.

LAMPMAN, S. **Characterization and Failure Analysis of Plastics**. ASM International. [S.l.]. 2003.

LIRA, S. A. **Análise de Correlação: Abordagem Teórica e de Construção Dos Coeficientes Com Aplicações**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Paraná. 2004.

MARGOLIS, Michael. **Arduino Cookbook**. " O'Reilly Media, Inc.", 2011.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. Novatec Editora, 2011.

MELEAR, Charles. **Integrated memory elements on microcontroller devices**. In: WESCON/94. Idea/Microelectronics. Conference Record. IEEE, 1994.

MORA, N. D.; LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A. **Apostila de Materiais Elétricos**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu. 2010.

NERI, M. G. G. et al. **Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos**. Encuentro de Potência, Instrumentations y Medidas (6.: nov. 2005: Montevideu). Anais. Montevideu. 2005.

NETO, B. B. O.; MONTEIRO, P. F.; QUEIROGA, S. L. M. **Aplicabilidade dos Microcontroladores em Inovações Tecnológicas**. VII CONNEPI - Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas, TO. 2012.

OLIVEIRA, S. C. **Sistema de Detecção Óptica de Descargas Parciais em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão de Alta Tensão**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2008.

PINHEIRO, W. **A Corrente de Fuga como Parâmetro Indicativo do Estado de Degradação de Materiais Poliméricos de Rede Compacta de Média Tensão, Instalados em Ambientes Agressivos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

PINTO, M. C. **Aplicação De Arquitetura Pedagógica Em Curso De Robótica Educacional Com Hardware Livre**. Dssertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2011.

PORTELLA, K. F. et al. **Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador**. Quim. Nova, v. 31, n. 2. [S.l.]. 2008.

RENNA, R. B. et al. **Introdução ao Kit de Desenvolvimento Arduino**. Tutoriais PET - Tele. Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ. 2013.

SALAMA, M. M. A.; SALLAM, M. M. **A Mathematical Model for Tracking Time Calculation for Polymeric Materials**. Electrical Insulation, Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on. IEEE. [S.l.]. 1992.

SCHNEIDER, H. M. et al. **Nonceramic Insulators for Transmission Lines**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, n.4. [S.l.]. 1989.

SILVA, G. C. et al. **Desenvolvimento de Nova Metodologia para Avaliação de Equipamentos e Acessórios de Redes Compactas Protegidas sob Condições de Multiestressamento**. [S.l.]. 2007.

SILVA, G. C. et al. **Desenvolvimento de Nova Metodologia para Avaliação de Equipamentos e Acessórios de Redes Compactas Protegidas sob Condições de Multiestressamento**. [S.l.].



SILVA, L. T. **Uma Proposta De Automação Residencial Utilizando A Plataforma De Prototipagem Eletrônica Arduino**. Monografia apresentada ao Curso de Sistemas de Informação. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Betim. 2013.

SILVA, M. O. Teleco - Seção: **Tutoriais Redes Ópticas. Redes Ópticas I: Degradação Óptica Imposta aos Cabos ADSS em Linhas de Transmissão, 2014**. Disponível em: <[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrotrans1/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrotrans1/pagina_3.asp)>. Acesso em: Maio 2015.

SILVA, R. F. **Trilhamento Elétrico sobre Materiais Poliméricos pela Análise da Energia Absorvida Devido as Descargas Elétricas Superficiais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2014.

SOUSA, R. O. **Uma Nova Técnica de Lavagem de Isoladores da Rede Elétrica de Distribuição**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. 2010.

TOMCZAK, F. **Correlação entre Ensaio de Resistência ao Trilhamento Elétrico**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2000.

TULCIDÁS, G. **Contador de Energia Elétrica Inteligente**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. [S.l.]. 2010.

WFWFWF. **Electrical Insulation**, Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on. [S.l.]: [s.n.]. 1992.

WILMSHURST, Tim. **Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers: Principles and Applications**. Newnes, 2006.

YAMAMOTO, H. et al. **IEC 5000h Multi-Stress Test on Polymeric Insulators**. Electrical Insulating Materials, 2005.(ISEIM 2005). Proceedings of 2005 International Symposium on. IEEE. [S.l.]. 2005.

YARSLEY, V. E.; IVES, G. C. **Testing Insulating Materials for Susceptibility to Tracking**. [S.l.]. 1953.

# ANEXOS

## 1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância (ANOVA) é um procedimento utilizado para avaliar se duas ou mais amostras diferem significativamente com relação a alguma variável. Ela é essencialmente um processo baseado na decomposição da variância total existente entre uma série de observações, em partes que podem ser atribuídas a causas conhecidas e numa parte devida a causas desconhecidas ou não suscetíveis de controle (GOMES, 1990).

Os métodos de análise de dados como a ANOVA são amplamente utilizados na avaliação de resultados experimentais. Na análise de variância são separadas e estimadas as diferentes causas de variabilidade de modo a verificar se a diferença entre suas magnitudes é significativa.

Ao se analisar experimentos, toda a variabilidade que não pode ser controlada é atribuída ao erro experimental. Logo, para a redução desse erro, são necessárias algumas técnicas e procedimentos tais como: a escolha de técnicas refinadas, a seleção das unidades experimentais e a escolha do delineamento a ser utilizado.

Como exemplos de delineamentos experimentais, é possível citar: delineamento inteiramente casualizado (DIC), em blocos casualizados (DBC) e em quadrado latino. O DBC o mais utilizado em experimentos (BANZATOO, KRONKA. 2006).

A Tabela 12 apresenta o modelo da estrutura de análise de variância para o delineamento em blocos casualizados.

Tabela 12. Análise de variância para um delineamento em blocos casualizados.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico (tabelado)
Tratamento	SQtrat	(t - 1)	$\frac{SQ_{trat}}{(t - 1)}$	$\frac{QM_{trat}}{QM_{res}}$	-----	F(gl <sub>trat</sub> , gl <sub>res</sub> )
Blocos	SQbloc	(b - 1)	$\frac{SQ_{bloc}}{(b - 1)}$	$\frac{QM_{bloc}}{QM_{res}}$	-----	F(gl <sub>bloc</sub> , gl <sub>res</sub> )
Resíduo	SQres	(t - 1)(b - 1)	$\frac{SQ_{res}}{(t - 1)(b - 1)}$			
Total	SQtotal	(n - 1)				

Fonte: adaptado de CAETANO, 2013.

Em que:

SQ – representa a soma dos quadrados dos desvios calculados para cada fonte de variação;

gl – representa o grau de liberdade calculados para cada fonte de variação;

QM – representa os quadrados médios;

F – Representa o valor estatístico de Fisher;

Valor-p – representa a probabilidade de significância;

t – representa o número de tratamentos;

b – representa o número de blocos;

n – representa o número total de amostras.

Na ANOVA existem os testes de hipóteses que servem para a retirada de conclusões sobre uma ou mais populações. Eles são utilizados por pesquisadores para decidir a aceitação ou rejeição acerca dos parâmetros de uma ou mais populações. Em análises estatísticas geralmente são consideradas as seguintes hipóteses:

- $H_0$  (Hipótese de nulidade) – Equivale a dizer que todos os possíveis contrastes entre médias de tratamentos são estatisticamente nulos ao nível de probabilidade que foi executado o teste.
- $H_1$  (Hipótese alternativa) – Equivale a dizer que existe pelo menos um contraste entre médias, estatisticamente diferente de zero, ao nível de probabilidade que foi executado o teste.

Segundo Caetano (2013), para realizar a análise e verificar se os tratamentos são significativos, pode-se utilizar a estatística F.

- Se  $F_{\text{Calculado}} \geq F_{\text{Crítico}}$ : O teste é significativo ao nível  $\alpha$  e, assim, deve-se rejeitar a hipótese  $H_0$ . Logo, existem diferenças significativas entre os efeitos dos tratamentos, não podendo ser atribuídas ao acaso.
- Se  $F_{\text{Calculado}} \leq F_{\text{Crítico}}$ : O teste não é significativo ao nível  $\alpha$  e, assim, não se deve rejeitar a hipótese  $H_0$ . Neste caso, não existem diferenças significativas entre os efeitos dos tratamentos e as diferenças observadas podem ser atribuídas ao acaso.

## 2 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

A análise de correlação é um método estatístico amplamente utilizado para estudar o grau de relacionamento entre variáveis. Essa análise também é conhecida como medida de associação ou de interdependência entre as variáveis.

O método mais utilizado para medir a correlação entre duas variáveis é o coeficiente de correlação de Pearson. Segundo Figueiredo e Silva (2010), esse método é utilizado quando se deseja verificar a existência de associação linear entre duas variáveis quantitativas, X e Y. O coeficiente linear entre X e Y é calculado por:

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Esse coeficiente resulta sempre em um valor entre  $-1$  e  $1$  e sua interpretação depende do seu valor numérico e do seu sinal. Quanto mais próximo de  $-1$  e  $1$ , mais forte é o grau de relação linear existente entre X e Y. Por outro lado, quanto mais próximo de  $0$ , mais fraco é o grau desta relação. Uma correlação linear negativa indica que quando o valor de uma variável aumenta, o valor da outra diminui. Por outro lado, uma correlação linear positiva, indica que quando o valor de uma variável aumenta, ocorre o mesmo com o valor da outra.

Segundo Cohen (2013), a interpretação dos coeficientes de correlação pode ser feita de acordo com a Tabela 13.

*Tabela 13. Interpretação dos coeficientes de correlação.*

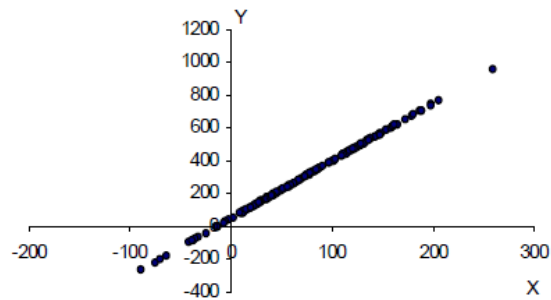
Valor de $\rho$ (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: COHEN, 2013.

Uma forma simples de verificar o tipo de correlação existente entre duas variáveis é utilizando o gráfico chamado diagrama de dispersão. Nesse diagrama são representados os pares  $(X_i, Y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , em que,  $n$  = número total de observações. As Figuras 46, 47 e 48 representam diferentes tipos de diagrama de dispersão entre as variáveis X e Y. A Figura 48

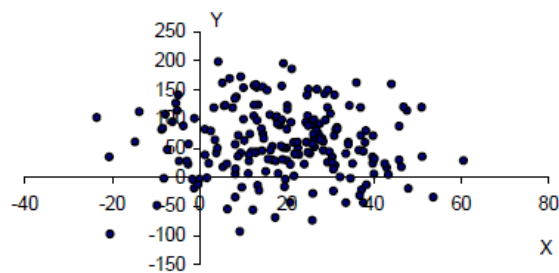
mostra um diagrama de relação entre X e Y com correlação igual a 1, ou seja, uma correlação positiva perfeita. A Figura 49 a correlação entre as variáveis X e Y é igual a 0, sendo uma correlação difusa ou não linear. Já na Figura 50 o coeficiente de correlação entre X e Y é igual a -1, mostrando uma correlação negativa perfeita.

Figura 48. Correlação linear com  $\rho = 1$  entre as variáveis X e Y.



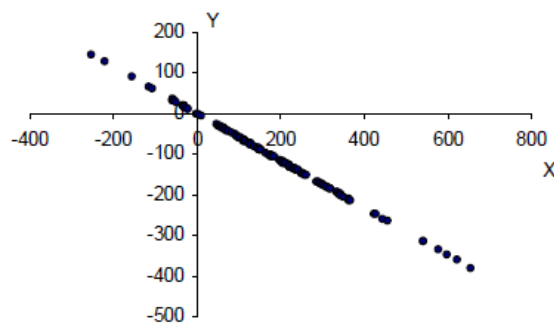
Fonte: LIRA, 2004.

Figura 49. Correlação linear com  $\rho = 0$  entre as variáveis X e Y.



Fonte: LIRA, 2004.

Figura 50. Correlação linear com  $\rho = -1$  entre as variáveis X e Y.



Fonte: LIRA, 2004.