

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALISON BAENA DE OLIVEIRA MONTEIRO

**ISOLADORES PARA ALTA TENSÃO: ESTUDOS SOBRE POLUIÇÃO ARTIFICIAL
PARA ENSAIOS ELÉTRICOS DE SUPORTABILIDADE E PARA AUXÍLIO A
PREDIÇÃO DE INTERVENÇÕES**

CURITIBA

2024

ALISON BAENA DE OLIVEIRA MONTEIRO

**ISOLADORES PARA ALTA TENSÃO: ESTUDOS SOBRE POLUIÇÃO ARTIFICIAL
PARA ENSAIOS ELÉTRICOS DE SUPORTABILIDADE E PARA AUXÍLIO A
PREDIÇÃO DE INTERVENÇÕES**

**HIGH VOLTAGE INSULATORS: STUDIES ON ARTIFICIAL POLLUTION FOR
ELECTRICAL SUPPORTABILITY TESTS AND TO HELP PREDICT
INTERVENTIONS**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



ALISON BAENA DE OLIVEIRA MONTEIRO

ISOLADORES PARA ALTA TENSÃO: ESTUDOS SOBRE POLUIÇÃO ARTIFICIAL PARA ENSAIOS ELÉTRICOS DE SUPORTABILIDADE E PARA AUXÍLIO A PREDIÇÃO DE INTERVENÇÕES

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.

Data de aprovação: 29 de Julho de 2024

Dr. Paulo Cicero Fritzen, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Eduardo Kazumi Yamakawa, Doutorado - Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento (Lactec)

Dr. Raphael Augusto De Souza Benedito, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 22/08/2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, de forma profunda e sincera, ao professor Paulo Cícero Fritzen pela confiança, oportunidade, orientação e amizade concedidas ao longo de toda a minha formação. Expresso também minha gratidão ao LACTEC, em especial ao gerente Guilherme Cunha da Silva, cujo apoio e ensinamentos foram inestimáveis, e ao Eduardo Massashi Yamao pelo apoio e amizade durante o desenvolvimento do projeto de pesquisa. Agradeço igualmente a todos os funcionários, pesquisadores e técnicos com quem tive o privilégio de interagir e que tanto me permitiram aprender.

Aos estimados amigos e colegas Matheus B. Rosseto, Rafael P. Machado e Edemir Luiz Kowalski, expresso minha mais profunda gratidão pelas valiosas conversas, pelas ricas trocas de conhecimento e pelo irrestrito apoio e auxílio oferecidos ao longo deste percurso. Vocês não apenas orientaram meus passos como pesquisador, mas também serviram como exemplares de conduta profissional e pessoal, sendo fundamentais para o êxito deste trabalho.

Gostaria de expressar minha imensa gratidão à minha família, que nunca mediu esforços e apoio para minha formação, e à minha esposa, Estéfane Mayer, cujo incentivo e carinho constantes me fortaleceram a perseverar. Vocês foram essenciais para a concretização deste objetivo.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, registro aqui minha eterna gratidão.

Reconheço e agradeço a colaboração do grupo Neoenergia Elektro, representado pelo gerente Laudemir Caritá e sua excelente equipe, bem como a ANEEL, que fomentaram o projeto 00385-0073/2020 - Sistema inteligente para lavagem de isoladores da rede de distribuição, que permitiu a elaboração deste trabalho.

Certifica-te de que és um fator de soma na vida
das pessoas de quem participas.
Marco Túlio Cícero (106–43 a.C.).
Ichi go Ichi e – Pensamento da cultura japonesa
que pode ser compreendido como: cada encontro
é único, cada momento é único.

RESUMO

A utilização de isoladores no Sistema Elétrico de Potência (SEP) é essencial para garantir a funcionalidade desses sistemas em diversos climas, condições ambientais e biomas, desempenhando um papel fundamental tanto elétrica quanto mecanicamente. Falhas de isolamento, frequentemente causadas pela poluição local que incide sobre os isoladores, são um dos principais fatores de faltas parciais ou permanentes no sistema. Depósitos de materiais como sal e partículas não solúveis podem gerar correntes de fuga, descargas superficiais, degradação de materiais e descargas disruptivas (flashovers), comprometendo a integridade do SEP. A origem desses depósitos pode ser natural ou antrópica, exigindo que o dimensionamento e a seleção dos isoladores considerem as condições ambientais e a suportabilidade elétrica adequada para a região de instalação. A análise da poluição é realizada pela coleta e estudo dos depósitos acumulados nos isoladores, determinando a intensidade e a severidade por meio da quantidade de partículas solúveis e insolúveis. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de métodos de poluição artificial para condicionar isoladores de porcelana ou vidro, replicando com precisão os níveis de poluição definidos pela norma ABNT IEC 60815. A pesquisa incluiu medições de impedância por espectroscopia de varredura em frequência e medições de resistividade superficial sob condições controladas de temperatura e umidade, em câmara climática. Os resultados demonstraram a relação entre os níveis de poluição, temperatura e umidade, culminando na elaboração de curvas de resistividade superficial para diferentes climas e no desenvolvimento de uma escala *fuzzy* para indicar a intensidade de poluição instantânea. Em síntese, o trabalho contribui significativamente ao fornecer uma metodologia robusta de poluição artificial aplicável à ensaios elétricos e ao disponibilizar dados que subsidiam o desenvolvimento de técnicas de medição instantânea, possibilitando intervenções preditivas em equipamentos do SEP e fortalecendo a confiabilidade e a durabilidade dos sistemas elétricos de potência.

Palavras-chave: Resistividade superficial; Suportabilidade Elétrica; Espectroscopia de impedância; *Flashover*.

ABSTRACT

The use of insulators in the Power Electric System (PES) is essential to ensure the functionality of these systems across various climates, environmental conditions, and biomes, playing a fundamental role both electrically and mechanically. Insulation failures, often caused by local pollution accumulating on insulators, are among the main factors leading to partial or permanent system faults. Deposits of materials such as salt and insoluble particles can generate leakage currents, surface discharges, material degradation, and disruptive discharges (flashovers), compromising the integrity of the PES. The origin of these deposits can be natural or anthropogenic, requiring that the design and selection of insulators consider the environmental conditions and adequate electrical withstand capacity for the installation region. Pollution analysis is performed by collecting and studying the deposits accumulated on the insulators, determining the intensity and severity through the amount of soluble and insoluble particles. This study presents the development of artificial pollution methods to condition porcelain or glass insulators, accurately replicating the pollution levels defined by the ABNT IEC 60815 standard. The research included impedance measurements using frequency sweep spectroscopy and surface resistivity measurements under controlled temperature and humidity conditions in a climate chamber. The results demonstrated the relationship between pollution levels, temperature, and humidity, culminating in the creation of surface resistivity curves for different climates and the development of a fuzzy scale to indicate instant pollution intensity. In summary, the study significantly contributes by providing a robust artificial pollution methodology applicable to electrical testing and by offering data that support the development of instant measurement techniques, enabling predictive interventions in PES equipment and strengthening the reliability and durability of power systems.

Keywords: Surface resistivity; Electrical supportability; Impedance spectroscopy; Flashover.

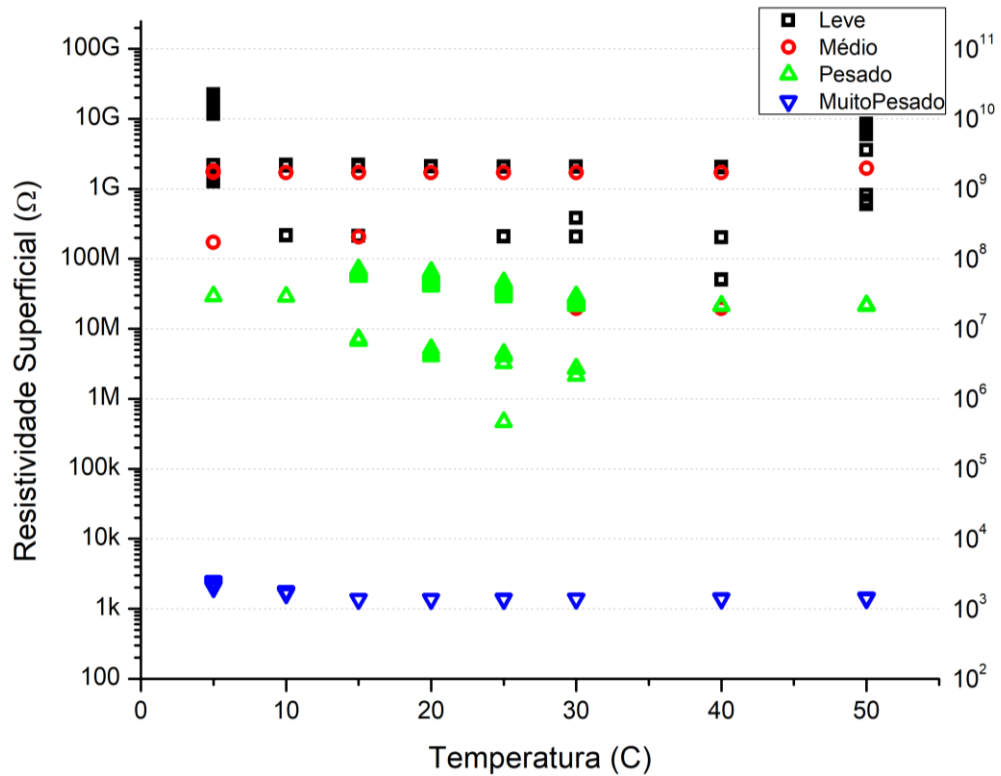
LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Falha em espaçador polimérico: trincas e não uniformidade do material...	22
Figura 2: Exemplo de descarga superficial (a) e erosão em isoladores poliméricos de ancoragem (b) (esquerda: ensaio de roda de trilhamento; direita: ensaio de compatibilidade dielétrica).	23
Figura 3: Exemplo de corrosão branca em pino de isolador de disco de vidro.	25
Figura 4: Simulação de distribuição de linhas de campo elétrico entre cabo coberto e isolador polimérico, sob condição limpa.	26
Figura 5: Simulação de distribuição de campo elétrico em cabo protegido: (a) cabo limpo; (b) cabo com gota d'água; (c) detalhe – vista aproximada em ponto crítico.	27
Figura 6: Ensaio de Compatibilidade Elétrica (intensificação de campo elétrico – a, aquecimento – b; trilhamento intensificado pelo acúmulo de poluição – c).	29
Figura 7: Demonstração do processo de formação de <i>flashover</i> por ação de poluição.	30
Figura 8: Demonstração da ação de gotas d'água distorcendo o campo elétrico na borda do isolador.	31
Figura 9: Ensaio de suportabilidade elétrica sob chuva: processo de abertura de arco elétrico.	31
Figura 10: Comparação da intensidade de I_f para poluições com KCl e NaCl.	32
Figura 11: Comparação da tensão suportável para poluições com KCl e NaCl.	32
Figura 12: Comparação de tensão crítica entre distribuição uniforme e não uniforme de poluentes sobre o isolador.	33
Figura 13: Modelos de circuitos equivalente para dielétricos.	34
Figura 14: Circuito equivalente para a superfície de um dielétrico poluído.	34
Figura 15: Efeitos elétricos da poluição na corrente de fuga (esquerda: alterações na forma de onda; direita: amplitude de correntes harmônicas).	35
Figura 16: Tensão máxima de ruptura, para diferentes cenários de distribuição de poluição.	36
Figura 17: Estudo de deposição de poluentes em isolador em função das relações entre velocidade e tamanho das partículas.	37
Figura 18: Estudo de dinâmica de ventos em uma cadeia de isoladores.	38
Figura 19: Relação de deposição de poluição artificial em razão da pressão de aspersão.	39
Figura 20: Coleta em cadeia de isoladores: enumeração dos isoladores para coleta de amostras.	42
Figura 21: Coleta de poluentes, face superior do isolador.	43
Figura 22: Medição de condutividades em solução, após uniformização (500 ml).	44
Figura 23: Exemplo de estruturas de coleta de poluentes em campo, pelo método do CDDP.	45
Figura 24: Processo de coleta de amostras de poluentes em campo, a partir de CDDPs.	45

Figura 25: Filtros após filtragem e secagem.....	48
Figura 26: Severidade de poluição tipo A (DDSE x DDNS), para isoladores de disco de vidro.....	51
Figura 27: Severidade de poluição tipo A (DDSE x DDNS), para isoladores do tipo bastão.....	51
Figura 28: Índice de severidade de poluição local para poluição tipo B	53
Figura 29: ISCoM: curva de registros e indicação de eventos elétricos -1.....	55
Figura 31: Aplicação do sensor FBG para determinação de DDSE	56
Figura 32: Relação DDSE e variação de onda.....	57
Figura 33: Fluxograma: definição de método de ensaio e tipo de poluentes.	60
Figura 34: Modelagem obtida para o Isolador disco de vidro modelo U120 utilizando o software CAD.	63
Figura 35: Isolador padrão (modelo U120) durante (a), e após (b) o processo de imersão e secagem (c) utilizando a solução 1.....	64
Figura 36: Foto do pulverizador manual.	65
Figura 37: Isolador padrão (disco de vidro modelo U120) antes (a) e após (b) a deposição da solução 1 pelo processo de aspersão.	66
Figura 38: Aspersão por pistola de pintura (jateamento pressurizado). Em (a) tem-se a pistola para pintura e em (b) o recipiente da pistola recebendo a solução de terra diatomácea e SiO ₂ para ser aplicada aos isoladores.	67
Figura 39: Equipamento de controle de exposição à aplicação de poluição artificial.	68
Figura 40: Controlador de poluição: componentes internos	68
Figura 41: Comparativo dos valores DDSE para a solução 2 (terra diatomácea e SiO ₂).	72
Figura 42: Comparativo dos valores DDNS para a solução 1 (terra diatomácea e SiO ₂).	72
Figura 43: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por imersão utilizando a solução 1 (terra diatomácea e SiO ₂).	73
Figura 44: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por aspersão, com uma única camada, utilizando a solução 1 (terra diatomácea e SiO ₂).	74
Figura 45: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por aspersão, com deposição de duas e quatros camadas, utilizando a solução 1 (terra diatomácea e SiO ₂).	74
Figura 46: Comparativo dos valores DDSE para a solução 2 (caulim).	77
Figura 47: Comparativo dos valores DDNS para a solução 2 (caulim).	78
Figura 48: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por imersão utilizando a solução 2 (caulim).	79
Figura 49: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por aspersão, com uma única camada, utilizando a solução 2 (caulim).	79
Figura 50: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por aspersão, com deposição de duas e quatros camadas, utilizando a solução 2 (caulim).	80
Figura 51: Comparativo dos valores DDSE para as soluções 1 a 3.....	82

Figura 52: Correlação entre a massa de NaCl em solução e o DDSE	82
Figura 53: Comparativo dos valores DDNS para as soluções 1 a 3.....	83
Figura 54: Classificação da SPL para o isolador poluído com a solução 1.	84
Figura 55: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 2.	84
Figura 56: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 3.	85
Figura 57: Comparativo dos valores DDSE para as soluções 4 a 5.....	86
Figura 58: Comparativo dos valores DDNS para as soluções 4 a 5.....	87
Figura 59: Classificação da SPL para o isolador poluído com a solução 4.	87
Figura 60: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 5.	88
Figura 61: Comparativo dos valores DDNS para as soluções 6 a 7.....	89
Figura 62: Comparativo dos valores DDSE para as soluções 6 a 7.....	90
Figura 63: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 6.	90
Figura 64: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 7.	91
Figura 65: Confeção de placas de vidro para medições de espectroscopia de varredura.	92
Figura 66: Analisador de impedância marca Solartron (a) e processo de leituras em placas de vidro (b).	93
Figura 67: Diagrama fasorial da impedância elétrica.	93
Figura 68: Corpo de Prova preparado para medição (esquerda: sem fita; direita: com fita)	95
Figura 69: Processo de medição da lâmina de alumínio, com micrómetro.	95
Figura 70: Resposta em frequência do ângulo de fase - Solartron a vazio, vidro limpo e vidro poluído (poluição leve).....	98
Figura 71: Resposta em frequência do módulo da impedância - Solartron a Vazio, vidro limpo e vidro poluído (poluição leve).	99
Figura 72: Caracterização do comportamento das placas limpas por espectrometria de impedância (esquerda - impedância total; direita - ângulo de fase). .	100
Figura 73: Corrente de fuga em isoladores de potência.....	101
Figura 74: Câmara Climática ESPEC.....	102
Figura 75: Setup de ensaio na câmara climática.....	102
Figura 76: Metodologia de ensaio com temperatura variável - rampa de temperatura.	103
Figura 77: Metodologia de ensaio com umidade variável - rampa de umidade.....	104
Figura 78: Climatologia das estações climáticas da região Sul e Sudeste.....	105
Figura 79: Coletas em isoladores aplicados à medição de resistividade superficial	105
Figura 80: Índice de classificação das formulações apresentadas na Tabela 23. ...	108
Figura 81: Ângulo de fase - comparativo entre substrato limpo e poluído artificialmente.	109
Figura 82: Impedância - comparativo entre substrato limpo e poluído artificialmente.	109
Figura 83: Espectroscopia aplicada a avaliação de produtos de limpeza pra isoladores elétricos.....	111

Figura 84: Gráfico da Resistividade Superficial – Umidade fixa e variação de temperatura.



..... 112

Figura 85: Gráfico da Resistividade Superficial - Temperatura fixa e umidade variável.

..... 113

Figura 86: Curvas Médias para Resistividade Superficial com Variação de Temperatura.

..... 114

Figura 87: Curvas Médias para Resistividade Superficial com Variação de Umidade.

..... 114

Figura 88: Faixas de Variação da Resistividade Superficial por Nível de Poluição.

Figura 89: Valores de Resistividade Superficial Definidos para escala fuzzy. 116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre ambiente e agentes poluentes.	40
Tabela 2: Classificação da SPL para CDDPS	52
Tabela 3: Relação Entre Severidade de Poluição e Condutividade Superficial	54
Tabela 4: Referência do grau de poluição - Poluente 1.	61
Tabela 5: Referência do grau de poluição - Poluente 2.	62
Tabela 6: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente por imersão com a solução 1 (terra diatomácea e SiO ₂). .	70
Tabela 7: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente por aspersão com uma camada da solução 1 (terra diatomácea e SiO ₂).	70
Tabela 8: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente por aspersão com 2 camadas da solução 1 (terra diatomácea e SiO ₂).	71
Tabela 9: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente por aspersão com 4 camadas da solução 1 (terra diatomácea e SiO ₂).	71
Tabela 10: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente pelo método de imersão com a solução 2 (caulim).	75
Tabela 11: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente pelo método de aspersão com 1 camada da solução 2 (caulim).....	75
Tabela 12: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente pelo método de aspersão com 2 camadas da solução 2 (caulim).....	76
Tabela 13: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente pelo método de aspersão com 4 camadas da solução 2 (caulim).....	76
Tabela 14: Soluções de contaminação utilizadas para produção de poluições de nível pesado à muito pesado em 500 g de água.	81
Tabela 15: Testes de poluição artificial com sais.	81
Tabela 16: Soluções de contaminação utilizadas para produção de poluições de nível médio para 500 g de água.	85
Tabela 17: Testes de poluição artificial para a solução 4.	86
Tabela 18: Soluções de contaminação utilizadas para produção de poluições de nível pesado para 1000 g de água.	89
Tabela 19: Testes de poluição artificial para a soluções 6 e 7.	89
Tabela 20: Valores de permissividade relativa de materiais comuns.	94
Tabela 21: Parâmetros dos corpos de prova: espessuras do substrato e do eletrodo.	96
Tabela 22: Câmara Climática ESPEC – Características Principais.....	101
Tabela 23: Soluções de poluição artificial para cada nível de poluição normatizado.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$|Z|$. *módulo da impedância total*

A. *Área da Superfície de Coleta (cm²)*

ABNT. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

A_{inf} . *área da parte inferior (cm²)*

A_{sup} . *área da parte superior (cm²)*

A_{tot} . *área total do isolador, somadas superfícies superior e inferior*

b. *fator de correção a temperatura de Θ °C*

c. *Comprimento dos eletrodos*

CDDP. *Coletor de Depósito Direcional de Poeira*

DDNS. *Densidade de Depósito Não Solúvel*

DDSE. *Densidade de Depósito de Sal Equivalente*

$DDSE_{inf}$. *DDSE da área inferior*

$DDSE_{sup}$. *DDSE da parte superior*

d_e . *Distância entre os eletrodos*

D_M . *Número de dias secos (precipitações menores que 20 mm)*

f. *Frequência (Hz)*

FBG. *Fiber Bragg Grating*

F_d . *Número de dias de nevoeiro por ano (visibilidade horizontal inferior a 1000 m)*

Fe. *Ferro*

HDPE. *High Density Polyethylene (Polietileno de Alta Densidade)*

IEC. *International Electrotechnical Commission*

I_f . *Corrente de Fuga*

ISCoM. *Insulator Surface Conductivity Monitor (monitor de condutividade superficial)*

KCl. *Cloreto de Potássio*

LACTEC. *Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento*

LDPE. *Low Density Polyethylene (Polietileno de Baixa Densidade)*

l_e . *largura do eletrodo*

LT. *Linha de Transmissão*

N. *Número de dias de coleta*

NaCl. *Cloreto de Sódio*

Θ . *Temperatura de uma solução*

O_3 . *Ozônio*

psi. *Pound-force per Square Inch (Libra-força por polegada quadrada)*

RD. *Rede de Distribuição*

RPM. *Rotações por minuto*

S_a . *salinidade da solução (kg/m³)*

SEL. *Salinidade Equivalente Local*

SEP. *Sistema Elétrico de Potência*

SiO₂. *Dióxido de silício*

SPL. *Severidade da Poluição Local*

UR. *Umidade relativa do ar*

V. *Volume (L)*

X_c. *Reatância capacitiva*

XLPE. *Cross-linked polyethylene (Polietileno Reticulado)*

Zn. *Zinco*

ϵ_0 . *permissividade relativa do vácuo*

ϵ_r . *permissividade relativa do material*

σ . *condutividade normalizada*

σ_{20} . *condutividade da solução a 20°C (S/m)*

σ_{Norte} . *C Condutividade normalizada para a direção Norte [$\mu\text{S/cm}$]*

σ_θ . *condutividade da solução a θ °C (S/m)*

Φ . *ângulo de fase*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação e Justificativa	16
1.2	Objetivos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Poluição e suas caracterizações - Tipos	20
2.1.1	Tipos de poluentes	20
2.1.2	Efeitos da poluição em isoladores para alta tensão	21
<u>2.1.2.1</u>	<u>Descargas Superficiais</u>	<u>22</u>
<u>2.1.2.2</u>	<u>Corrosão em isoladores colaborado pela poluição</u>	<u>24</u>
<u>2.1.2.3</u>	<u>Trilhamento (isoladores compostos e materiais poliméricos)</u>	<u>25</u>
<u>2.1.2.4</u>	<u>Descarga disruptiva (<i>flashover</i>)</u>	<u>29</u>
2.1.3	Circuitos equivalentes para isoladores	33
2.1.4	Dinâmica de deposição de poluição em isoladores	35
2.2	Caracterização dos ambientes e seus respectivos agentes	39
2.3	Método normatizado de medição e classificação da poluição local	40
2.3.1	Procedimentos de coleta – Cadeia de isoladores.....	42
2.3.2	Procedimentos de coleta – CDDP	44
2.3.3	Determinação da densidade de sal equivalente (DDSE).....	46
2.3.4	Determinação da densidade de depósitos não-solúveis (DDNS).....	47
2.3.5	Determinação da condutividade média (CDDP)	48
2.4	Classificação da intensidade de poluição	50
2.4.1	SPL a partir de Cadeia de isoladores padrão	50
2.4.2	SPL a partir do CDDPs.....	52
2.4.3	Metodologias de classificação para poluição do tipo B	52
2.5	Métodos de monitoramento de poluição não normatizados	53
2.6	Ensaio elétrico com poluição artificial	57
3	DESENVOLVIMENTO	59
3.1	Desenvolvimento de poluição artificial para testes elétricos.....	59
3.1.1	Desenvolvimento de formulação/solução de poluição artificial.....	60
3.2	Métodos de aplicação	63
3.2.1	Contaminação por Imersão em solução	64
3.2.2	Aspersão – Manual e Pressurizada.....	65
<u>3.2.2.1</u>	<u>Controlador de contaminação artificial</u>	<u>67</u>

3.2.3	Testes de Formulações de Contaminação Artificial.....	69
<u>3.2.3.1</u>	<u>Solução 1 - terra diatomácea e dióxido de silício (SiO₂).....</u>	<u>69</u>
<u>3.2.3.2</u>	<u>Solução 2 - caulim.....</u>	<u>75</u>
3.2.4	Testes de soluções com adição de NaCl – variação do DDSE	80
3.3	Caracterização elétrica da poluição.....	91
3.3.1	Espectroscopia de varredura: medição de impedância de corpos de prova poluídos	91
<u>3.3.1.1</u>	<u>Estimativa teórica da capacitância das placas de vidro.....</u>	<u>94</u>
<u>3.3.1.2</u>	<u>Validação da técnica de varredura</u>	<u>97</u>
<u>3.3.1.3</u>	<u>Caracterização dos corpos de prova: limpos.....</u>	<u>99</u>
3.3.2	Resistividade superficial: medições sob variação de temperatura e variação de umidade	100
<u>3.3.2.1</u>	<u>Metodologia de Ensaio</u>	<u>103</u>
4	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	106
4.1	Métodos de aplicação e soluções poluentes	106
4.2	Espectroscopia de impedância	108
4.2.1	Exemplo de aplicação da técnica de espectroscopia com uso da poluição artificial	110
4.3	Medições de resistividade superficial	111
<u>4.3.1.1</u>	<u>Resistividade Superficial - Valores Médios.....</u>	<u>113</u>
<u>4.3.1.2</u>	<u>Resistividade Superficial – Faixas de Variação</u>	<u>115</u>
4.4	Considerações finais	117
5	CONCLUSÃO	119
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	120

1 INTRODUÇÃO

As características ambientais das regiões que Redes de Distribuição (RD) e Linhas de Transmissão (LT) percorrem, ou mesmo o local onde Subestações (SE) estão instaladas, são fatores cruciais para o sucesso de projetos elétricos, sobretudo dos sistemas de isolamento e das manutenções inerentes a eles. Grande parte do Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro é aéreo e não abrigado, por consequência, os equipamentos estão expostos à ação de intempéries e de agentes poluentes naturais ou antrópicos.

As influências do meio agem sobre os equipamentos, podem causar desligamentos forçados, perdas por fuga de energia, degradação acelerada de componentes e materiais, entre outras. Conforme Puchale (2019), em todo o SEP, aproximadamente 76,1% dos desligamentos em LT's ocorrem por falhas de isolação, sendo as descargas entre fase e terra as mais comuns.

Ao longo do tempo, há a deposição de materiais, solúveis e não solúveis, sobre a superfície dos isoladores. Quando secos, os poluentes pouco interferem no desempenho dos isoladores. Porém, quando há umidificação da superfície dos isoladores, estes poluentes criam uma solução condutora que favorece a ocorrência e intensificação de correntes de fuga e, em último caso, criam condições para a ocorrência de descargas disruptivas (*flashover*) (MELLO *et al.*, 2001). Desta forma, entende-se que para a execução de projetos adequados aos locais de instalação duas informações são fundamentais: a severidade da poluição local (SPL) e a seleção de isoladores com capacidade de suportabilidade à SPL. Por outro lado, no aspecto de ações preventivas, como a limpeza de isoladores, torna-se interessante para a programação assertiva a compreensão de quando é o melhor momento para a intervenção, isto é, quando se está próximo de alcançar o estado crítico do sistema isolante.

1.1 Motivação e Justificativa

As falhas de isolamento no SEP podem causar grande impacto social e financeiro aos consumidores, bem como às concessionárias de energia elétrica. O meio ambiente oferece grande influência, principalmente sobre os isoladores.

Uma vez que a deposição de poluentes, as chuvas, névoas e outros agentes alteram a suportabilidade elétrica dos isoladores (PORTELLA *et al.*, 2008). Neste sentido, conhecer como a poluição age, seus efeitos e alterações das características elétricas auxilia em diferentes momentos dos projetos, da escolha e seleção dos isoladores até a programação e planejamento de intervenções corretivas ou preditivas.

Uma das falhas que estão relacionadas à perda de suportabilidade elétrica, que por consequência causa do *flashover*, é a diminuição virtual da distância de escoamento. Naturalmente, a tensão crítica de isolamento é distinta para as condições a seco ou sob chuva, e a poluição diminui a magnitude da tensão crítica. Esta alteração pode ser temporária, como no caso da incidência de contaminantes que promovem a elevação da corrente de fuga (I_f), tais como: névoas; vapores; orvalho; formação de eletrólitos na superfície do isolador; ou permanentes, como quando há a quebra ou trinca em isoladores de vidro ou porcelana, ou mesmo danos em saias de isoladores poliméricos (VOSLOO *et al.*, 2007).

Durante o desenvolvimento de projetos de LT's, RD's ou SE's a norma "ABNT IEC/TS 60815-1: Seleção e dimensionamento de isoladores para alta tensão para uso sob condições de poluição: parte 1: definições, informações e princípios gerais" fornece informações para o dimensionamento e seleção de isoladores para diferentes condições de poluição (2014). Ademais, são classificados níveis de poluição e formas de coletas para classificação da severidade de poluição local. Ainda no âmbito normativo, há o ensaio de suportabilidade elétrica, presente na norma "ABNT NBR 10621: Isoladores utilizados em sistemas de alta-tensão em corrente alternada: ensaios de poluição artificial" (2017), que objetiva determinar a tensão máxima suportada por um modelo de isolador sob um nível definido de poluição salina ou também por meio da aplicação técnica de camada sólida de poluentes.

Portanto, a proposta deste trabalho é fornecer uma metodologia de condicionamento para ensaios em isoladores sob efeito de poluição, por meio de um documento fundamentado em experimentos regidos por normas técnicas, que subsidie informações de forma clara e confiável a fim de enriquecer discussões do ramo de avaliações de equipamentos isolantes, no que concerne o desempenho de suportabilidade para diferentes níveis de poluição, propondo

meio de aplicação e formulações de poluição artificial para ensaios elétricos. Além disso, por meio de avaliações das alterações de características elétricas também buscam fornecer informações que subsidiem a programação de intervenções no âmbito da manutenção preventiva.

1.2 Objetivos

Este trabalho objetivou efetuar o estudo da ação de poluentes artificiais destinados à execução de ensaios elétricos de alta tensão, em isoladores de porcelana e de vidro, caracterizando a ação desses poluentes com efeitos elétricos diversos, por meio de ensaios e medições elétricas.

Desta maneira, são definidos os seguintes objetivos específicos para este trabalho:

- a) Estudo e desenvolvimento de formulações de poluição artificial, bem como métodos de aplicação e pré condicionamento de isoladores para obtenção de diferentes níveis de poluição, conforme definições normatizadas;
- b) Estudo dos métodos de medição de poluição em isoladores que sirvam de alternativa à metodologia proposta pela norma ABNT IEC/TS 60815 (2014);
- c) Caracterização do comportamento elétrico da poluição artificial, utilizando-se de técnicas de varredura de impedância no domínio da frequência;
- d) Determinação, por meio de ensaios elétricos, da resistividade superficial de isoladores sob ação dos diferentes níveis de poluição;
- e) Estabelecer relação entre os níveis de poluição e os valores de resistividade superficial, por meio de medições em câmara climática, sob variação de umidade e temperatura, a fim de se obter curvas características.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As linhas de transmissão, subestações e redes de distribuição de energia elétrica possuem basicamente os cabos de energia elétrica elevados em relação ao solo e dispostos em torres, estruturas ou postes normalmente aterrados. Os isoladores elétricos que ficam solidários às estruturas aterradas garantem o isolamento entre os cabos energizados e estas estruturas, exercem também a função de suporte mecânico dos cabos (PUCHALE, 2019). Nestas estruturas podem, ainda, existir outros equipamentos elétricos, como para-raios e chaves seccionadoras, que também são confeccionados com materiais isolantes.

Os isoladores, buchas ou as cadeias de isoladores são projetados para atender às especificações técnicas necessárias para cada nível de tensão em que serão aplicados. O dimensionamento desses isoladores e cadeias deve atender a várias condições impostas pelas solicitações dielétricas e mecânicas em função das necessidades impostas pelo projeto. Quando se observam os principais problemas que muitas vezes causam o desligamento das LTs, SEs e RDs, encontra-se entre eles a falha nestes componentes isoladores. Entre os diversos modos de falhas possíveis retratados em artigos técnicos, destaca-se a poluição depositada sobre estes componentes. A ação destes poluentes reduz consideravelmente o nível de isolamento especificado para cada projeto, podendo assim, em certas condições, ocasionar um curto-circuito entre os cabos energizados e a estrutura aterrada. Sendo estas ocorrências uma consequência da diminuição da capacidade de isolamento, isto é, uma diminuição da tensão crítica do isolador, sobretudo quando molhado (BANIK *et al.*, 2015).

Como alternativas para mitigação dos efeitos que a poluição exerce sobre os isoladores, são indicados: efetuar a correta seleção do isolador, isto é, o perfil com as características mais adequadas ao local e sua poluição; manutenção dos isoladores, podendo ser a limpeza ou substituição; quando possível, a eliminação das fontes poluentes (HERNANZ *et al.*, 2006). Acrescenta-se ainda que o acompanhamento constante dos índices de Densidade de Depósitos de Sal Equivalente (DDSE) e Densidade de Depósitos Não Solúveis (DDNS) pode auxiliar a programação de limpeza e substituição de

isoladores, auxiliando o bom desempenho do sistema como um todo, conforme destacado por (IBUDIALOR *et al.*, 2023).

2.1 Poluição e suas caracterizações - Tipos

O conceito de poluição é muito abrangente, assim, neste trabalho, é adotada a concepção do ponto de vista elétrico. Desta forma, define-se como poluente todo material que, depositado sobre a superfície de um equipamento isolante, altere sua capacidade de isolamento, por meio da formação de uma camada condutiva. Essa camada condutiva poderá ser formada por vapores e gotículas naturalmente depositados, bem como poderá ser formada por meio da dissolução de sais solúveis presentes na superfície do isolante (MELLO *et al.*, 2001). Por sua vez, pode-se definir o poluente como o agente da poluição. Para a abordagem deste trabalho, são definidos os poluentes como sendo as soluções elaboradas para o condicionamento das amostras e realização dos ensaios elétricos.

Assim, são definidos na norma ABNT IEC 60815 (2014) dois tipos de poluentes conforme suas características, o tipo A e o tipo B.

2.1.1 Tipos de poluentes

- **Poluição do tipo A**

A poluição tipo A é a poluição sólida com a presença de componentes não solúveis. É naturalmente depositada na superfície dos isoladores. A ação conjunta de névoas, intensa umidade, chuvas de pequeno volume e intensidade com a poluição do tipo A cria um eletrólito, consecutivamente se estabelece uma superfície condutiva no isolador. Por apresentar componentes sólidos não solúveis e formar eletrólito, a poluição tipo A é mensurada pela relação entre a Densidade de Depósito de Sal Equivalente e a Densidade de Depósitos Não Solúveis. Ainda, é possível avaliar a DDSE por meio do nível de condutividade superficial, quando o isolador é exposto a níveis controlados de umidade. As duas partes da poluição tipo A agem em conjunto, os agentes não solúveis propiciam a fixação dos elementos solúveis. A poluição tipo A, normalmente, está relacionada com regiões afastadas do mar, interioranas, de clima mais seco ou

até desértico, podendo ser de origem natural ou industrial (ABNT, 2014; MELLO, 2017).

- Poluição do tipo B

Por outro lado, a poluição do tipo B está diretamente associada a locais de elevada umidade com presença de névoas, maresia, chuviscos, chuvas ácidas e água salgada aspergida, entre outras soluções de característica condutiva. Também podem ser oriundas de resíduos de processos, como a densa pluma de vapor formada em usinas termoelétricas. De rápida ação e efetividade, os agentes descritos envolvem os isoladores e permitem a ocorrência de descargas disruptivas. Geralmente, as áreas de costa marítima e com elevada salinidade representam locais com poluição tipo B. A abordagem de caracterização deste tipo de poluição pode ser por meio de leituras de condutância ou corrente de fuga (ABNT, 2014; MELLO, 2017).

2.1.2 Efeitos da poluição em isoladores para alta tensão

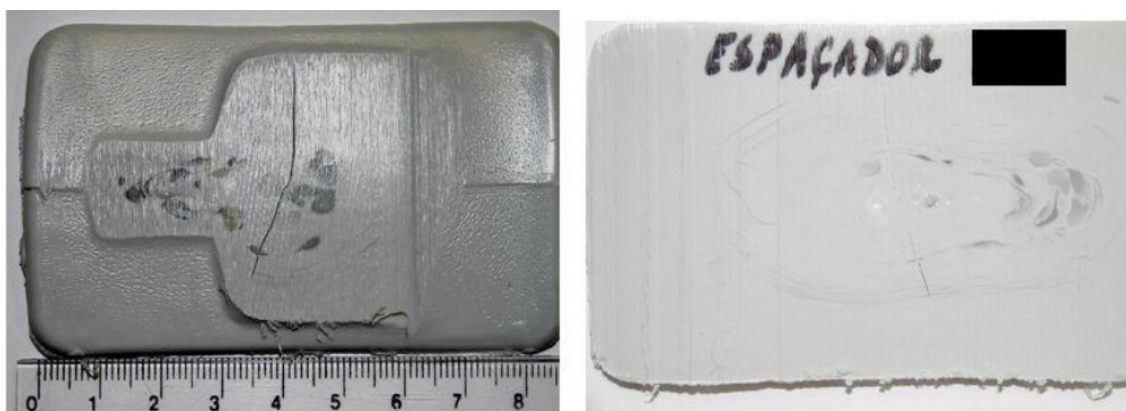
A deposição de poluentes sobre a superfície de isoladores pode causar diferentes interferências, a depender do tipo de poluente e das condições climáticas. Os efeitos atingem as funções elétricas, e a longo prazo também podem impactar as funções mecânicas. No aspecto elétrico, a probabilidade de falhas depende do tipo do material do isolador, do tipo e da intensidade dos poluentes, do clima da região e do nível de tensão ao qual o isolador é submetido. As funções mecânicas são afetadas por processos de corrosão e erosão (HERNANZ *et al.*, 2006).

Do ponto de vista elétrico, a ação de diferentes poluentes depositados na superfície de isoladores cria condições que causam diminuição da sua capacidade de isolamento e até mesmo degradação dos materiais isolantes. O tipo de poluição e sua intensidade trarão a tendência de efeitos diferentes, acarretando, por exemplo: corrente de fuga, descargas parciais ou descargas disruptivas.

2.1.2.1 Descargas Superficiais

As descargas parciais são definidas como descargas que ocorrem em um meio isolante entre eletrodos. Estes eventos têm duração curta, na ordem de nanosegundos, e são intermitentes. Podem ser divididas entre: superficial; interna; corona. As descargas internas se relacionam com a presença de cavidades internas no dielétrico (presença de bolhas ou trincas na estrutura do dielétrico) ou mesmo por heterogeneidade do material, como mostrado na Figura 1, enquanto as descargas corona ocorrem em pontas de superfícies metálicas energizadas. As descargas superficiais têm como uma das fontes a queda de isolamento causada pela poluição depositada na superfície dos isoladores (HILSDORF, 2015; LIMA, 2010).

Figura 1: Falha em espaçador polimérico: trincas e não uniformidade do material.

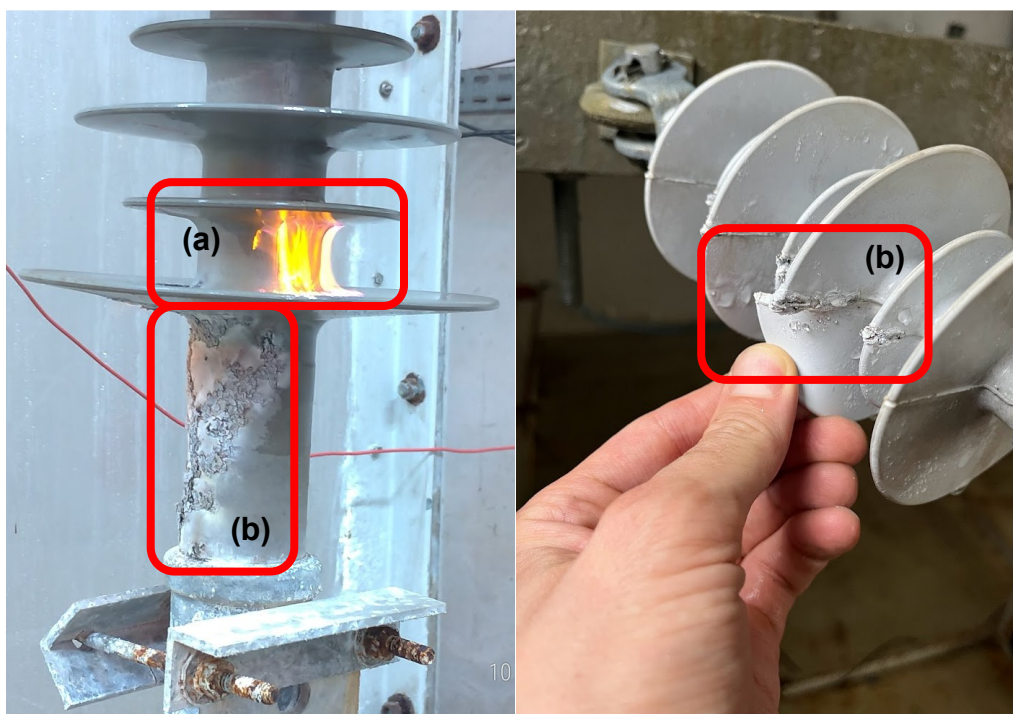


Fonte: Adaptado de (HILSDORF, 2015).

A descarga superficial é um mecanismo bem definido, que pode ser ocasionado pela ação da poluição, como destacado na imagem à esquerda da Figura 2. No meio ambiente, os isoladores são submetidos a variações de umidade, intercalando períodos secos e úmidos. Em cada período, são observados efeitos diferentes (MELLO *et al.*, 2001). No período seco, há descargas concentradas nos isoladores eletricamente mais próximos à fase, e estas descargas estimulam o processo de corrosão das partes metálicas; por sua vez, no período úmido, com concentração superior a 80% de umidade relativa do ar, todos os isoladores são submetidos à intensa atividade elétrica de arcos, que incidem sobre a parte isolante.

O mesmo comportamento pode ser observado em ensaios elétricos, como no caso do ensaio de Roda de Trilhamento ou na Compatibilidade Dielétrica, como mostrado na Figura 2 à direita. Estes ensaios são apresentados na norma ABNT NBR 10296 (2014) e tem por objetivo avaliar o desempenho de isoladores frente a condições de elevada agressividade. As descargas têm como causa a interação do poluente com a umidade, por meio da formação de um eletrólito que intensifica a lf. Em geral, estas descargas não são ocasionadas pela geometria do isolador (MELLO, 2017).

Figura 2: Exemplo de descarga superficial (a) e erosão em isoladores poliméricos de ancoragem (b) (esquerda: ensaio de roda de trilhamento; direita: ensaio de compatibilidade dielétrica).



Fonte: O Autor, 2021.

Utilizando modelagem computacional, por técnicas de elementos finitos, é possível demonstrar que a incidência de poluentes sobre a superfície do isolador distorce a distribuição do campo elétrico, externa e internamente, ocasionando ao equipamento um estresse elétrico superior às condições normais, isto é, quando poluído, o campo elétrico no isolador se torna mais intenso, e por vezes acima da intensidade prevista em projeto (KONTARGYRI *et al.*, 2004). Nestes casos, a variação do campo elétrico está relacionada com a intensidade da poluição, quanto maior a intensidade dos depósitos, maior a

intensificação do campo elétrico, consecutivamente reduzindo a suportabilidade do equipamento.

2.1.2.2 Corrosão em isoladores colaborado pela poluição

A deposição de poluentes nos isoladores também afeta o desempenho das suas partes metálicas. Essa interação pode ser pelo fornecimento direto de agentes corrosivos ou por consequência das descargas superficiais, sobretudo as que ocorrem próximo às ferragens, tais como: mísula, concha, terminal olhal ou pino. As descargas elétricas superficiais, por meio da ionização do ar, promovem a geração de Ozônio (O_3) na região. O O_3 é um elemento químico muito reativo que contribui no processo de corrosão galvânica/atmosférica ou elétrica das partes metálicas do isolador (MELLO *et al.*, 2001; PUCHALE, 2019)

I. Corrosão branca

O processo de degradação inicial nas ferragens acontece por meio da corrosão branca. As descargas elétricas normalmente originam-se nas partes metálicas. Ao ionizar o ar, as descargas produzem Ozônio (O_3), que reage com o Zinco (Zn). Com o passar do tempo, a degradação da camada protetiva de zinco descama-se e expõe o aço, em última instância, permitindo a oxidação do Ferro (Fe). Outros agentes presentes nos poluentes podem trabalhar em conjunto, acelerando a degradação da camada protetiva (MELLO *et al.*, 2001). Este processo pode ser observado na Figura 3, na qual o anel de proteção encontra-se em processo acelerado de corrosão.

Figura 3: Exemplo de corrosão branca em pino de isolador de disco de vidro.



Fonte: o autor, 2021.

II. Corrosão vermelha

Após a degradação da camada protetiva (Zn), a descamação expõe o aço permitindo o início da sua oxidação. Nitratos provenientes da poluição associam-se ao O_3 e à água, da chuva ou umidade ambiente, produzindo ácido nítrico (FARMAN *et al.*, 2011). O ácido nítrico ataca o aço, reage com o Fe e produz hematita e magnetita, caracterizando a corrosão vermelha, genericamente chamada de ferrugem. Essa etapa de degradação pode pôr em risco a estrutura mecânica que o sistema de isolamento desempenha, ainda que a função elétrica esteja preservada.

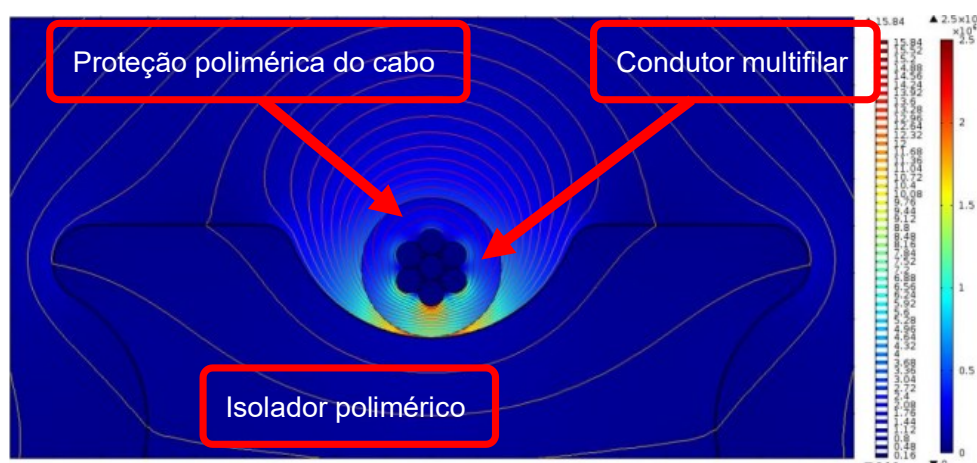
2.1.2.3 Trilhamento (isoladores compostos e materiais poliméricos)

Define-se como compósito todo material formado por dois ou mais materiais de diferentes naturezas e de diferentes fases. As fases são e se diferem entre matriz ou “dispersa, sendo definidas como: a fase matriz é o componente que pode ser de natureza cerâmica, polimérica e até mesmo metálica; a fase dispersa são cargas e fibras adicionais. Os compósitos podem ter origem natural ou ser produzidos artificialmente pelo homem. Este tipo de material exhibe proporções significativas dos seus constituintes. As formulações dos compósitos têm por objetivo combinar as propriedades distintas para se desenvolver propriedades de interesse, sejam elas mecânicas, ópticas, elétricas

ou quaisquer outras relacionadas à finalidade do material (AZEVEDO, 2019; MEDEIROS, 2006). No caso de isoladores poliméricos, podem ser destacadas as propriedades de hidrofobicidade, anti-trilhamento (*Anti-Tracking*), antichamas e índice de permissividade elétrica.

O fenômeno do trilhamento elétrico, conforme descrito por Rossetto (2021), é um processo de degradação do material polimérico isolante que envolve a quebra de ligações químicas, ocasionando a formação de caminhos condutivos na estrutura do dielétrico. Uma das origens associadas à ocorrência são as correntes de fuga que fluem quando há a formação de eletrólito na superfície do dielétrico. No processo de secagem do eletrólito, ao formar bandas secas e bandas úmidas, há aparecimento de descargas elétricas superficiais. Estas descargas são arcos elétricos em forma de plasma, sua temperatura elevada causa o derretimento e carbonização do material dielétrico, ou no caso do silicone, gera o processo de erosão. Desta forma, os materiais envolvidos devem ser capazes de suportar o campo elétrico e outros agentes como efeitos de radiação, abrasão e radiação ultravioleta (ABNT, 2021). Na Figura 4 se destaca que no ponto de contato entre cabo e isolador há uma concentração de linhas de campo. Este pode ser um ponto de fragilidade do arranjo e a intensidade do campo elétrico pode causar danos na cobertura do cabo e no isolador.

Figura 4: Simulação de distribuição de linhas de campo elétrico entre cabo coberto e isolador polimérico, sob condição limpa.

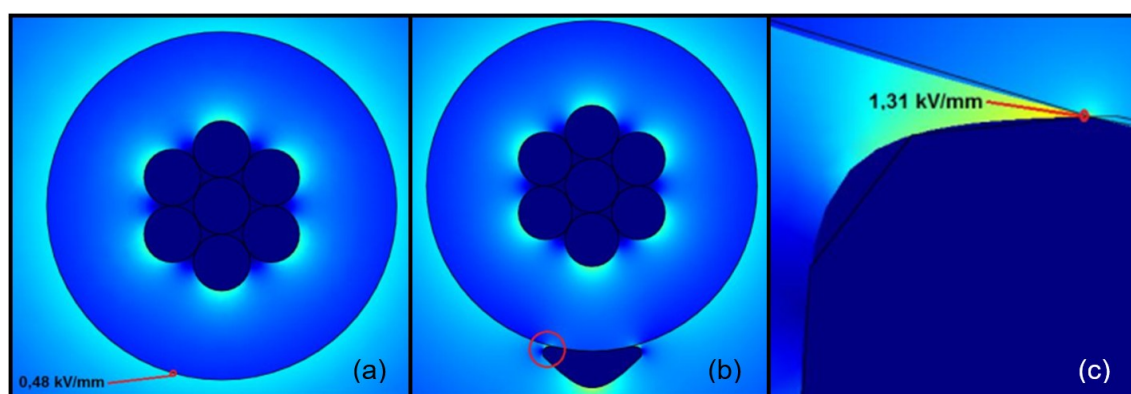


Fonte: Adaptado de (HILSDORF, 2015).

O fenômeno do trilhamento pode ser amplamente observado em redes de distribuição compactas. Essas estruturas de distribuição de energia são compostas de: cabos que têm coberturas (protegidos, não isolados), normalmente confeccionadas em XLPE ou LDPE/HDPE; cruzetas poliméricas, confeccionadas em fibra de vidro e resina epóxi ou poliéster; isoladores de ancoragem, feitos em revestimento de silicone sobre núcleo compósito de fibra de vidro; e espaçadores de cabos, em HDPE e polietileno. No Brasil, tais arranjos são implementados a tensões da ordem de 13,8 kV a 34,5 kV. Por ficarem agrupados, isto é, com menor distância entre as fases, os materiais poliméricos estão sujeitos a campos elétricos mais intensos, se comparados às redes de distribuição clássicas, cabos nus dispostos no mesmo plano horizontal.

Agentes poluentes depositados nas superfícies dos arranjos alteram a distribuição do campo elétrico, podendo elevar a intensidade de campo a níveis acima da suportabilidade de um ou mais materiais dielétricos, favorecendo o surgimento do processo de trilhamento. Simulações computacionais permitem observar o aparecimento de pontos críticos, ou seja, locais de elevada intensidade de campo elétrico, como alteração influenciada por elementos poluentes depositados na superfície dos dielétricos (ESPINO-CORTES *et al.*, 2014; HILSDORF, 2015; NÓBREGA, 2011). A Figura 5 denota a intensificação de campo elétrico causada por uma gota d'água. Destaca-se que, no ponto crítico (imagem c), o campo elétrico quase triplica a sua intensidade.

Figura 5: Simulação de distribuição de campo elétrico em cabo protegido: (a) cabo limpo; (b) cabo com gota d'água; (c) detalhe – vista aproximada em ponto crítico.



Fonte: Adaptado de (NÓBREGA, 2011).

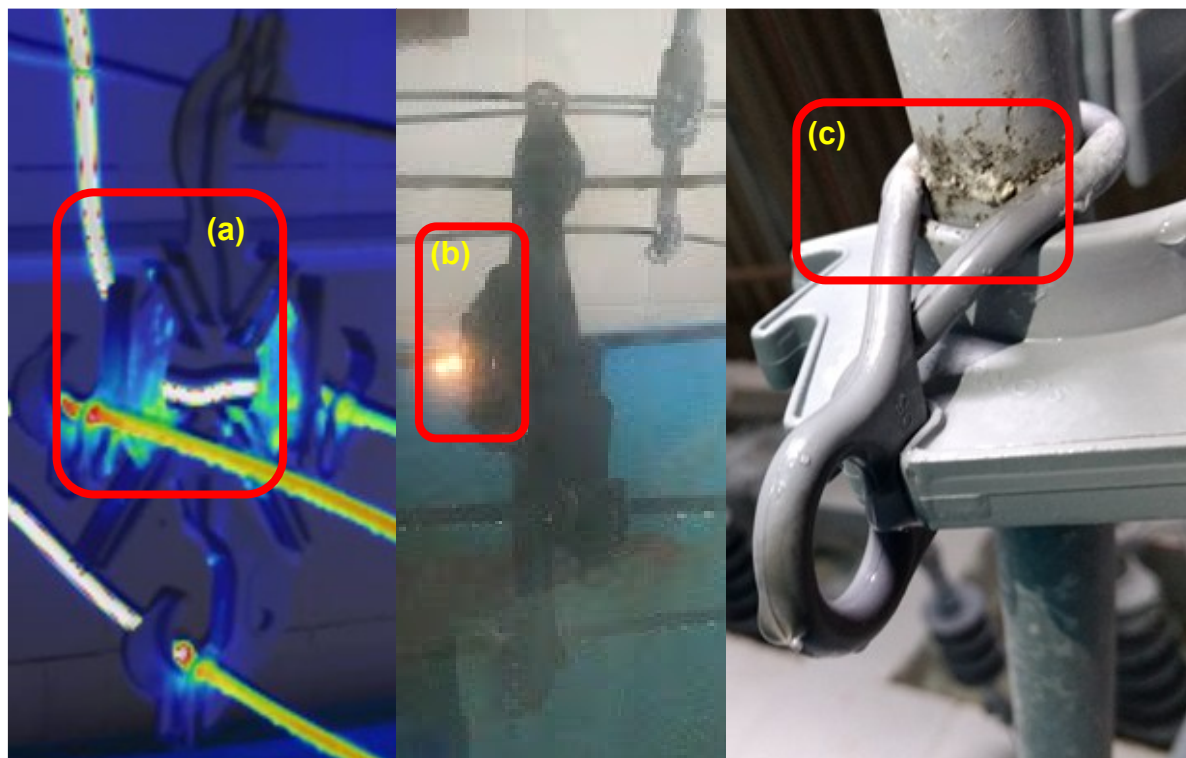
No Brasil, a ABNT não recomenda a instalação de redes compactas em locais com níveis de poluição “Médio” a “Pesado”. Pois, sob estas condições, haverá aceleração dos processos de degradação. Após iniciado, o processo de degradação do material é irreversível, ou seja, não há recuperação do material após ação da erosão ou do trilhamento (MALIK *et al.*, 1998).

Outra causa apontada para a ocorrência do trilhamento elétrico está associada à geometria dos equipamentos, sua integridade e imperfeições. A presença de bolhas de ar, ou trincas no material, também atua alterando o campo elétrico. Quando ocorre na interface cabo/espaçador, por exemplo, pode causar a perfuração do material isolante do cabo.

Em meios práticos, os ensaios de compatibilidade dielétrica permitem observar o surgimento e avanço do trilhamento elétrico, bem como o processo de erosão, em arranjos de redes compactas (SALLES *et al.*, 2011).

Por exemplo, durante a execução de alguns ensaios de compatibilidade dielétrica em espaçadores de rede compacta de distribuição, realizados nos laboratórios do LACTEC, foram coletadas imagens térmicas que podem evidenciar a ocorrência desse processo, conforme mostrado na Figura 6. O aquecimento observado nos pontos de contato, entre cabo e espaçador, evidencia a ação da poluição artificial. A causa da elevação pontual de temperatura se deu por ação das descargas parciais nas interfaces cabo espaçador, como evidenciado na imagem central (b) ou pela imagem térmica do lado esquerdo (a).

Figura 6: Ensaio de Compatibilidade Elétrica (intensificação de campo elétrico – a, aquecimento – b; trilhamento intensificado pelo acúmulo de poluição – c).

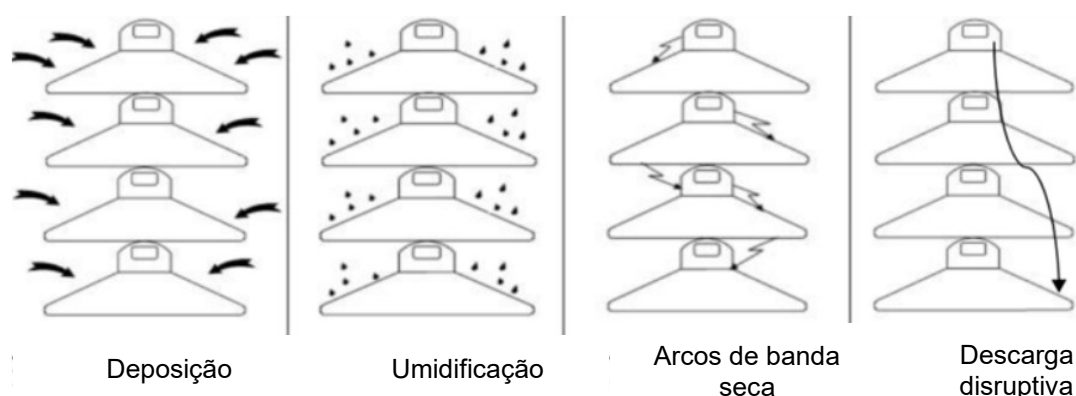


Fonte: o autor, 2021.

2.1.2.4 Descarga disruptiva (*flashover*)

A descarga elétrica disruptiva é um tipo de curto-circuito que ocorre pela quebra da capacidade de isolamento de um arranjo isolante em redes de alta tensão, seja em um único isolador ou sobre uma cadeia de isoladores, isto é, é uma descarga elétrica que contorna todo o sistema isolante. Esse tipo de descarga elétrica também é conhecida e comumente encontrada na literatura pela nomenclatura inglesa “*flashover*” (LIMA, 2010). Como a descarga pode ser ocasionada pela poluição, também é comum encontrar na literatura o termo “*Pollution flashover*”, dada a ocorrência em função da perda de isolamento causada pela poluição (IBUDIALOR *et al.*, 2023). O processo de deposição, umidificação, surgimento de descargas superficiais e, por fim, a ocorrência do *flashover* é exemplificado por Surya (2022) na Figura 7.

Figura 7: Demonstração do processo de formação de *flashover* por ação de poluição.



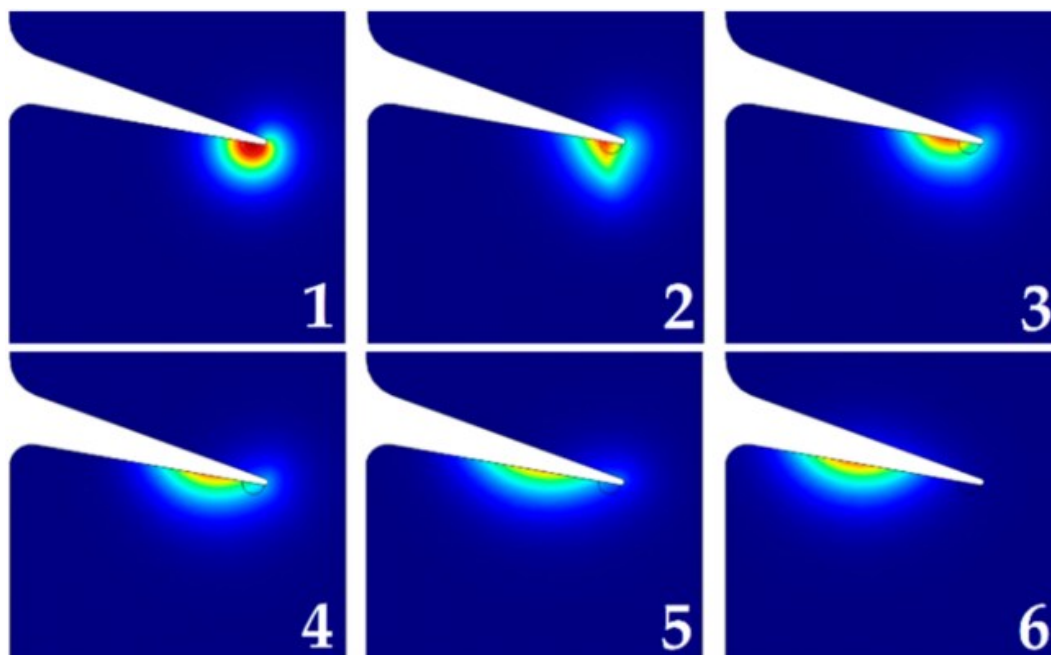
Fonte: Adaptado de (SURYA *et al.*, 2022).

Com o acúmulo de poluentes, ocorre uma diminuição virtual da distância de escoamento, ou seja, o caminho que a corrente de fuga precisa percorrer torna-se menor, entre a parte energizada e não energizada, a distância é virtualmente diminuída. Como consequência, a tensão máxima admissível também é minorada.

Para a ocorrência de um *flashover*, fatores morfológicos dos isoladores também são relevantes na sua suportabilidade elétrica sob condições de poluição. Destaca-se a distância entre as saias, o diâmetro, a espessura e o ângulo de inclinação das saias. As simulações e testes conduzidos por Liao (2021) demonstram a interação das características geométricas das saias com gotas d'água, como evidenciado na Figura 8. Ao se acumular nas bordas das saias do isolador, durante a ocorrência das chuvas, as gotas elevam o potencial elétrico entre elas.

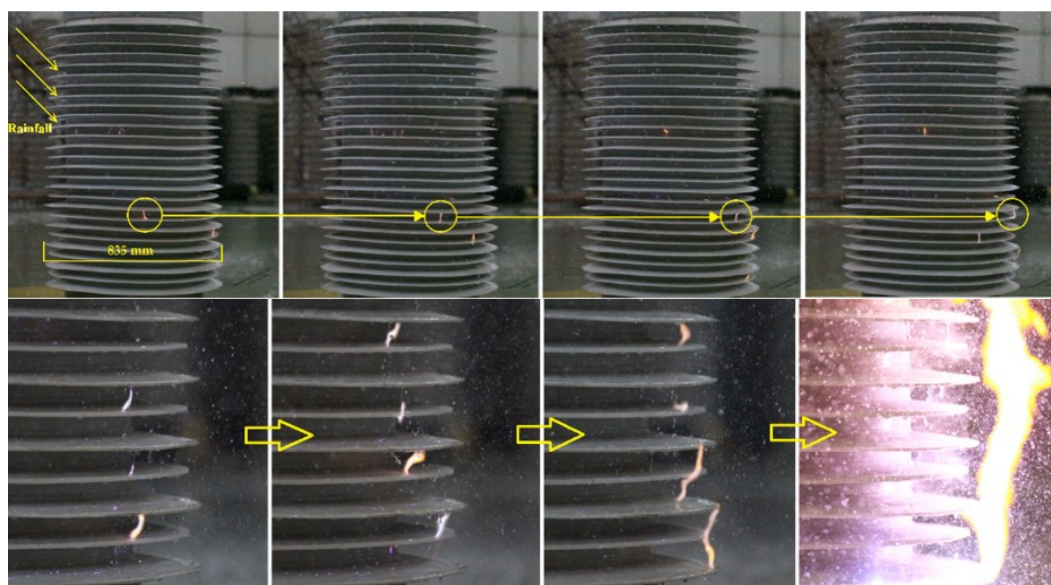
Corroborando os resultados observados nas simulações, Liao (2021) demonstra experimentalmente que, em testes elétricos de alta tensão sob chuva, o *flashover* tende a ocorrer na face oposta à de incidência da precipitação. Na Figura 9 é possível observar o processo de abertura de arco, partindo de pequenas descargas superficiais entre saias, passando para a ocorrência simultânea de descargas em regiões muito próximas, até a unificação de muitas descargas que por fim criam o *flashover*.

Figura 8: Demonstração da ação de gotas d'água distorcendo o campo elétrico na borda do isolador.



Fonte: Adaptado de (LIAO et al., 2021).

Figura 9: Ensaio de suportabilidade elétrica sob chuva: processo de abertura de arco elétrico.

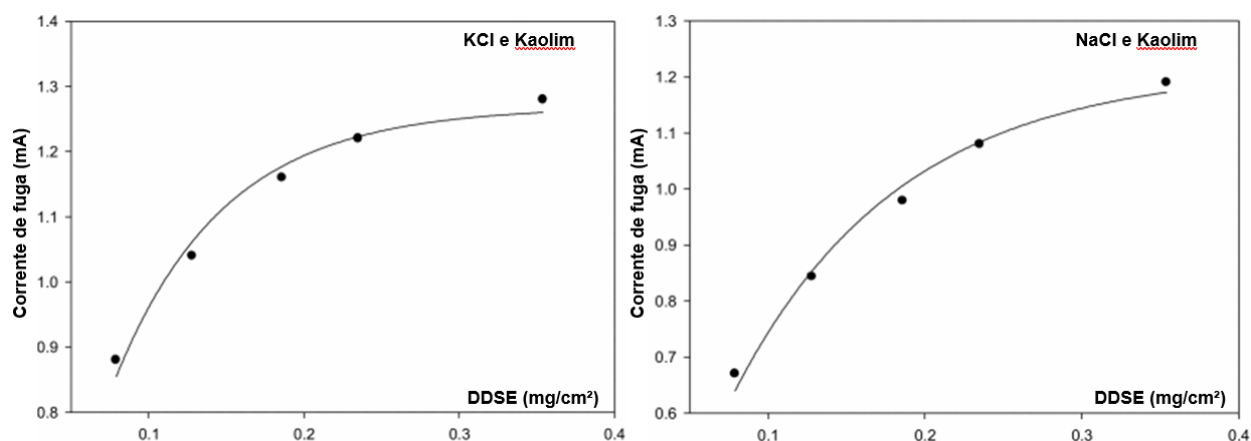


Fonte: Adaptado de (LIAO et al., 2021).

Além da forma de deposição e distribuição da poluição, e da sua concentração sobre a superfície do isolador, os tipos de sais presentes na poluição também influencia a tensão suportável. A equipe de BANIK *et al.* (2015) conduziu ensaios para medição de tensão máxima suportável e medição da

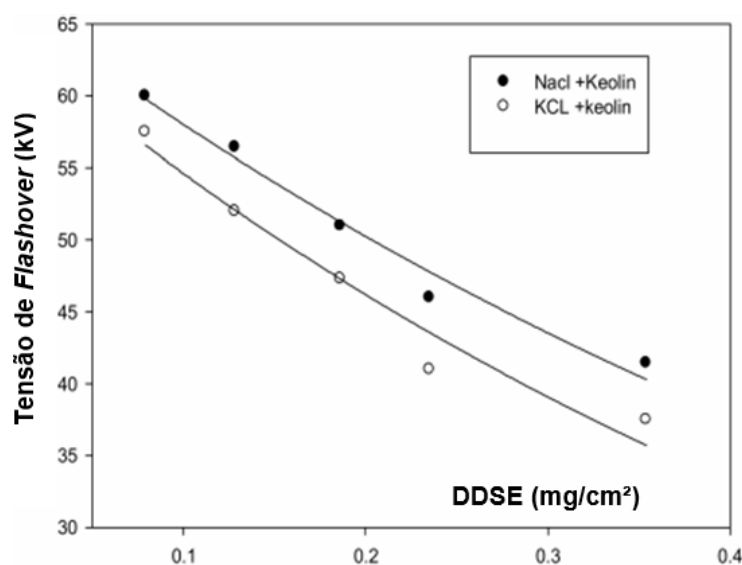
corrente de fuga em isoladores com poluições preparadas com sais diferentes, como: cloreto de potássio (KCl) e cloreto de sódio (NaCl). Como resultado, foi evidenciado que os isoladores poluídos com KCl obtiveram correntes de fuga de maior magnitude e menor tensão suportável, como destacada pelas curvas da Figura 10, 11 e 12.

Figura 10: Comparação da intensidade de I_f para poluições com KCl e NaCl.



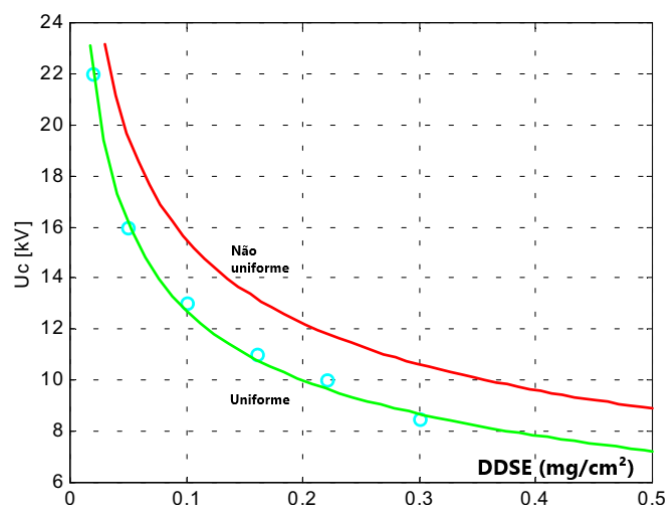
Fonte: Adaptado de (BANIK *et al.*, 2015).

Figura 11: Comparação da tensão suportável para poluições com KCl e NaCl



Fonte: Adaptado de (BANIK *et al.*, 2015).

Figura 12: Comparação de tensão crítica entre distribuição uniforme e não uniforme de poluentes sobre o isolador.



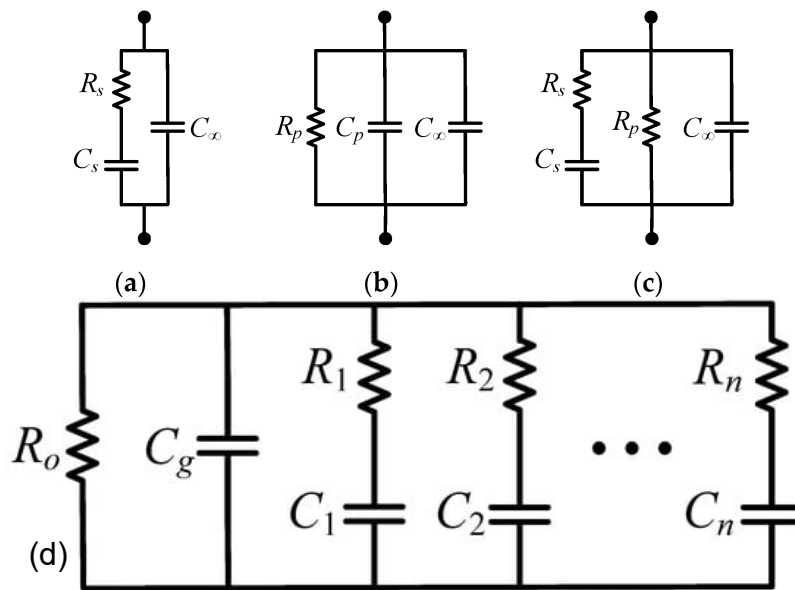
Fonte: Adaptado de (SUFLIS et al., 2003).

Neste mesmo sentido, Mello (2017) aponta que, para poluição inerte de 0,1 mg/cm² a 30 mg/cm² a tensão suportável pode ser reduzida em até 50%, corroborando os resultados apresentando na Figura 11 (entende-se para esta situação que a poluição inerte, da mesma definição que um elemento químico inerte, é aquela que não reage com a superfície do isolante).

2.1.3 Circuitos equivalentes para isoladores

Eletricamente um isolador pode ser simulado por meio de circuitos equivalentes formados por capacitores (C_s) e resistores (R_s) em associações com um capacitor ideal (C_∞). Os modelos clássicos de Debye, que descrevem o comportamento de um dielétrico, são apresentados na Figura 13, na qual temos: (a) circuito série – modelo clássico de Debye; (b) circuito paralelo – circuito de condução; (c) circuito série e paralelo – condução e relaxação. Ao serem associados outros dielétricos, um circuito paralelo pode descrever o comportamento da associação, conforme o modelo (d) apresentado por Hernandez e Ramirez (2022).

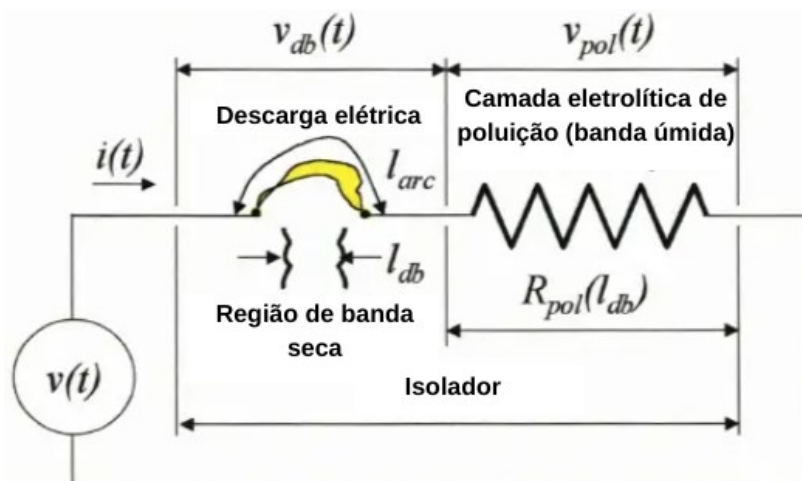
Figura 13: Modelos de circuitos equivalente para dielétricos.



Fonte: Adaptado de (HERNANDEZ; RAMIREZ, 2022).

Seguindo esse sentido, o processo de poluição e formação das bandas secas, e por conseguinte, o surgimento de descargas/arcs elétricos pode ser representado por um circuito equivalente. Esse circuito é formado por duas resistências em série, resistência de arco e resistência do eletrólito, conforme apresentado por Waluyo (2006) e por Salem (2021), e mostrado na Figura 14.

Figura 14: Circuito equivalente para a superfície de um dielétrico poluído.

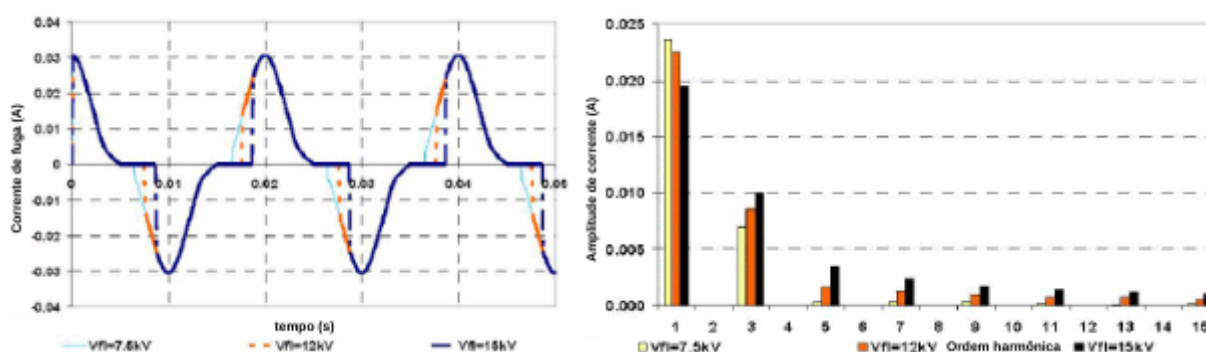


Fonte: Adaptado de (WALUYO *et al.*, 2006).

A utilização destes modelos permite a execução de simulações para a análise de efeitos elétricos, tais como: caracterização de comportamento do

isolador (limpo ou contaminado), simulações de correntes superficiais e tensões de suportabilidade. Os trabalhos de Waluyo (2006), por exemplo, apontam que um isolador limpo pode ser compreendido como um elemento de elevada capacitância, que pouco altera a forma de uma senoide. Em contrapartida, quando poluído, a curva de corrente apresenta uma distorção causada por interferência de harmônicos, principalmente as de 1° e 3° ordem.

Figura 15: Efeitos elétricos da poluição na corrente de fuga (esquerda: alterações na forma de onda; direita: amplitude de correntes harmônicas).



Fonte: Adaptado de (WALUYO *et al.*, 2006).

2.1.4 Dinâmica de deposição de poluição em isoladores

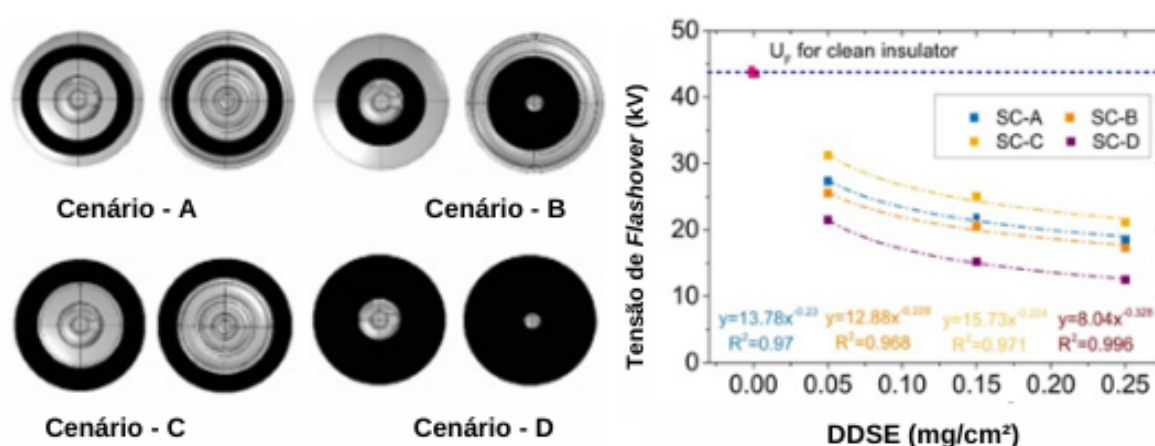
A influência que a poluição exerce sobre o desempenho dos isoladores também está relacionada com a forma da sua deposição, isto é, se a camada de poluente está uniformemente depositada e distribuída sobre a superfície isolante ou se há regiões limpas e regiões sujas na mesma superfície.

A forma como a poluição está distribuída sobre o isolador influencia na sua tensão crítica suportável. Por meio de simulações e testes empíricos, foi possível constatar que isoladores poluídos com camadas mais irregulares atingiam maiores valores de suportabilidade elétrica em diferentes ensaios elétricos, quando comparados com isoladores poluídos uniformemente, conforme indicam os resultados dos trabalhos de Fangrong (2023) e Sufliis (2003).

Simulando quatro diferentes cenários de deposição da poluição em um isolador padrão, os ensaios conduzidos por Salem (2023) corroboram o efeito de intensificação causada pela distribuição da poluição. Os resultados das simulações demonstram que, quanto mais uniforme a distribuição da poluição

por ambas as superfícies (superior e inferior), menor é a tensão de *flashover*. Para o modelo de isolador utilizado nos testes e nas simulações, conduzidos pelos pesquisadores e destacados na Figura 16, o incremento de depósitos salinos, bem como a distribuição uniforme da poluição, reduziu concomitantemente a capacidade de isolamento em quase 5 vezes, quando comparado à condição de um isolador limpo.

Figura 16: Tensão máxima de ruptura, para diferentes cenários de distribuição de poluição.



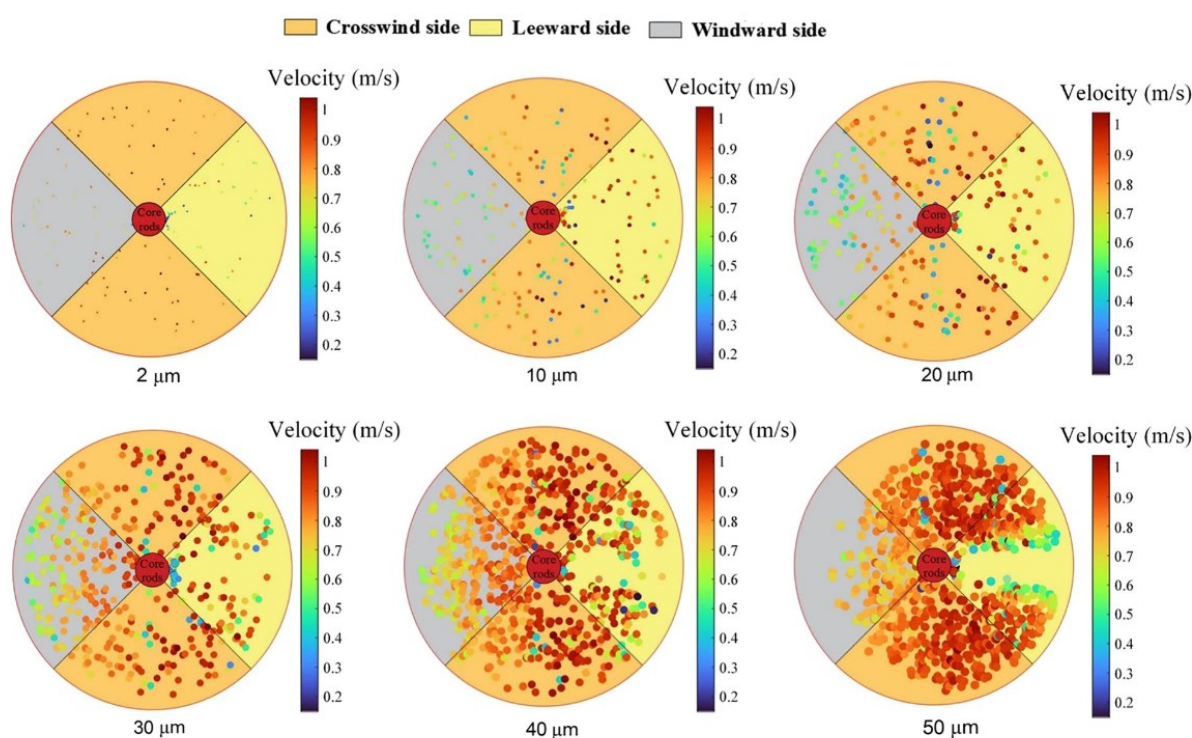
Fonte: Adaptado de (SALEM *et al.*, 2023).

A distribuição uniforme da poluição na superfície do isolador promove a formação de bandas mais próximas, diminuindo a resistência elétrica quando o isolador é umedecido. Desta forma, há a passagem de corrente de fuga com maior intensidade e constância, criando, em contrapartida, condições inicialmente menos favoráveis à abertura de arcos elétricos. Por sua vez, a distribuição menos uniforme cria condições favoráveis à abertura de pequenos arcos, permitindo que arcos maiores se desenvolvam, até a ocorrência do caso mais crítico, isto é, a abertura de uma descarga disruptiva completa, como apresentado anteriormente na Figura 7. O mesmo se dá entre as faces superior e inferior do isolador, a falta de uniformidade dificulta a formação de descargas entre as faces, uma vez que não há regiões contínuas com grande proximidade entre a orientação dos pontos com maior campo elétrico, implicando, consequentemente, na elevação da tensão de *flashover* (FANGRONG *et al.*, 2023).

A intensidade do campo elétrico também desempenha um papel fundamental no processo de acumulação de partículas de poluição, sobretudo para partículas menores (cerca de $2\mu\text{m}$) e em baixa velocidade de vento (em torno de 1m/s) (YANG et al., 2024).

Além disso, as dimensões das partículas e a velocidade do vento também influenciam o processo. O deslocamento tangencial das partículas na superfície do isolador afeta a quantidade e a distribuição da acumulação de poluição, ao passo que a migração das partículas sobre a superfície, sobretudo por meio de processo de deslizamento e de rolamento, aumenta com o aumento da dimensão de tais partículas e de quão veloz está a incidência do fluxo de ar (YANG et al., 2024). Esse comportamento pode ser observado na Figura 17.

Figura 17: Estudo de deposição de poluentes em isolador em função das relações entre velocidade e tamanho das partículas.



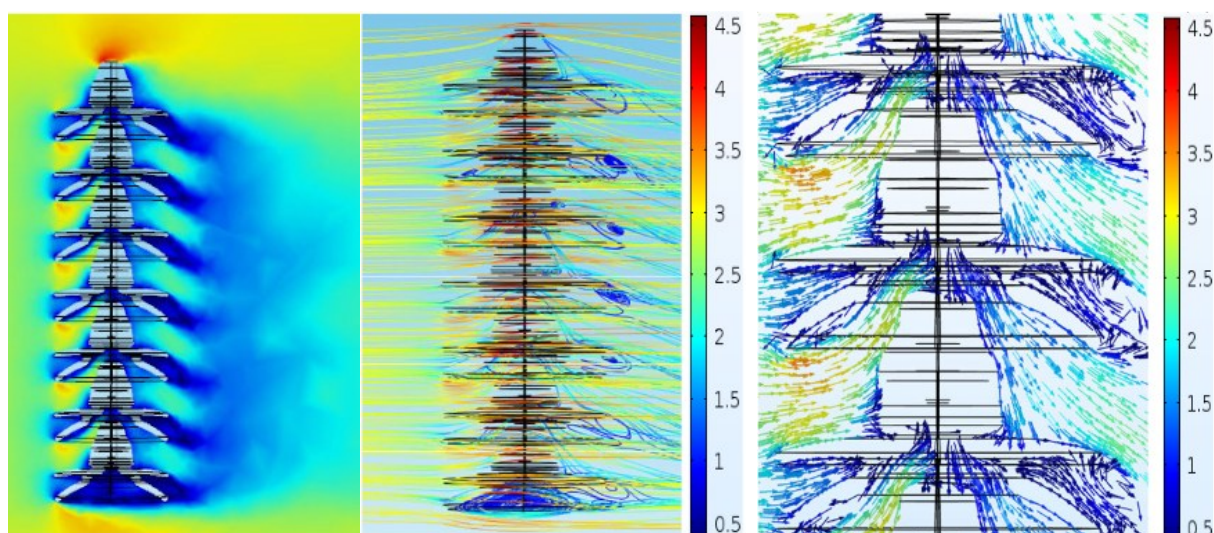
Fonte: Adaptado de (YANG et al., 2024).

O acúmulo de poluentes ocorre de formas diferentes entre cada uma das faces do isolador. Isoladores de vidro, ou poliméricos, tendem a ter geometrias diferentes entre suas faces, produzindo dinâmicas distintas sob ação do vento. Isto pode favorecer a deposição de poluentes e, por consequência, maior acúmulo em uma das faces. Ainda, a dinâmica dos ventos que atingem um

isolador, ou uma cadeia de isoladores, cria regiões de baixa e alta pressão ao seu redor. Na face de sota-vento (lado oposto à face de entrada), são gerados vórtices através da porção de vento que passa pela região inferior do isolador que contém saias, como demonstrado nas simulações de (2020) e evidenciado na Figura 18.

Assim, a probabilidade de deposição de partículas de poluição na superfície do isolador cresce com o aumento do tamanho das partículas, enquanto que, por outro lado a quantidade acumulada diminui com o aumento da velocidade do vento.

Figura 18: Estudo de dinâmica de ventos em uma cadeia de isoladores.

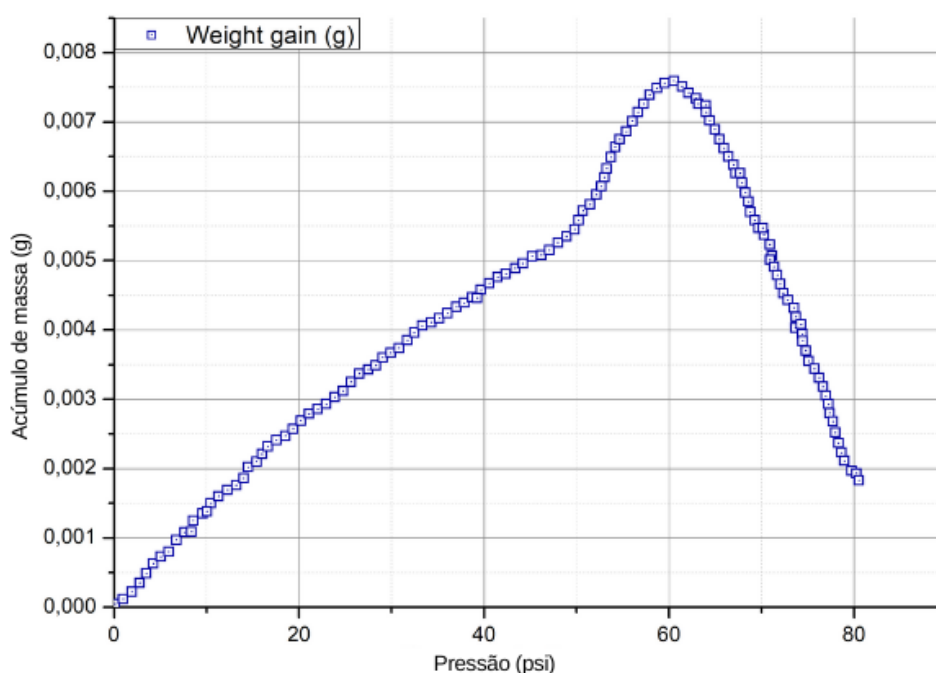


Fonte: Adaptado de (LV et al., 2020).

Empiricamente, no desenvolvimento de processos de poluição artificial para ensaios elétricos com poluição, os testes efetuados por Karady (1996) também apontaram a velocidade das partículas como fator relevante ao processo de acúmulo de poluentes nos isoladores.

A pressão de aplicação determina a velocidade com que as partículas migrarão e atingirão o isolador. Neste sentido, destaca-se que a elevação da velocidade auxilia a retenção de massa até um determinado limite. Ao superar a velocidade máxima, as partículas agem arrastando e limpando a superfície, como demonstra a curva que relaciona pressão e massa de depósitos retidos no isolador (Figura 19).

Figura 19: Relação de deposição de poluição artificial em razão da pressão de aspersão.



Fonte: Adaptado de (KARADY *et al.*, 1996).

2.2 Caracterização dos ambientes e seus respectivos agentes

Em algumas regiões, pode haver ocorrência simultânea das poluições dos tipos A e B, ou seja, são ambientes que fornecem poeiras secas, com material solúvel e não solúvel e que, em algum momento, são juntamente expostos a nevoeiros, chuviscos, fumos e afins (ABNT, 2014).

Cada região possui dinâmica própria, com relações estatísticas endêmicas, não permitindo prever o comportamento apenas por normas ou tabelas comparativas. Nesses casos, se faz necessário estudo para determinar o tipo de poluição predominante, seu comportamento e peculiaridades, mas principalmente sua intensidade. Em se tratando da seleção de isoladores para regiões específicas, três características são destacadas como fundamentais para a assertividade da escolha: modo de deposição da poluição; modo de limpeza natural; natureza (origem) do contaminante. Ao final do estudo de seleção, tais informações implicarão diretamente no grau de confiabilidade do sistema (MELLO, 2017; PORTELLA *et al.*, 2008).

Conforme mencionado, cada ambiente fornece elementos diferentes que interferem nos sistemas de isolamento. Assim, estes foram identificados e

subdivididos pelas suas características geográficas e seus componentes mais comuns, conforme apresentado na Tabela 1 (ABNT, 2014; FARMAN et al., 2011; PUCHALE, 2019).

Tabela 1: Relação entre ambiente e agentes poluentes.

Ambiente / Região	Descrição	Componentes
Deserto	Locais de baixa umidade e longos períodos de seca, podem ser áreas extensas. Elevados níveis de DDNS com presença de sais pesados. Deposição superficial no isolador com formação de camada sólida. Pode apresentar subprodutos de processos industriais, de refinarias e afins. Comumente, tipo A.	NaCl, KCl, CaSO ₄ , MgCO ₃ , KNO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Fe ₂ O ₃ , CaCO ₃
Costeiro / Marinho	Localidades vizinhas ao mar, podendo se afastar até 50 km adentro, dependendo da geologia. Umidade elevada, presença de soluções aspergidas, vento, névoas. Poluição de crescimento rápido, do tipo B, com sais de rápida dissolução.	MgCl ₂ , KCl, NaCl, CaCl ₂ , NaNO ₃
Industrial	Localizadas ao redor de polos industriais ou de indústrias específicas, bem localizadas, não abrangem grandes extensões. Presença de produtos químicos, cimentos, fertilizantes, fumos, fuligens, depósitos metálicos e outras partículas pesadas, gases dissolvidos. Poluição A, com médio ou elevado DDNS, em conjunto com poluição B.	CaCl ₂ , Ca(NO ₃) ₂ , MgCl ₂ , NaNO ₃ , NaCl, MgSO ₄ , CaCO ₃ , CaSO ₄ .2(H ₂ O)
Agrícola / rural	Poeiras do solo, poeiras e fibras de silos e processamentos em campo, névoas de agentes agrícolas, fertilizantes e defensivos agrícolas.	Poeira de solos, fertilizantes, etc.
Interior e rodovias	Baixo nível de poluição, sem identificação clara.	Poeiras de solo, pistas de saibro, cimento ou concreto betuminoso, fumaças veiculares, produtos de pastilhas de freio.
Outros tipos	Materiais orgânicos.	Dejetos de animais (pássaros), algas, líquens, musgos, fungos, gelo, bactérias.

Fonte: Adaptada de (ABNT, 2014; FARMAN et al., 2011; PUCHALE, 2019).

2.3 Método normatizado de medição e classificação da poluição local

A norma brasileira para seleção e dimensionamento de isoladores é oriunda da IEC/TS 60815 (2008), e apresenta as definições, metodologias e

parâmetros necessários para a caracterização da severidade de poluição local (SPL).

Em ambientes sob ação dos tipos A e B, são utilizados como referência os parâmetros de Densidade de Depósito de Sal Equivalente (DDSE) e a Densidade de Depósito Não Solúvel (DDNS), podendo também ser utilizada a medição da corrente de fuga (ABNT, 2014). A obtenção de amostras de poluentes para determinação do DDNS/DDSE tem duas formas clássicas (em outros casos podem ser utilizados parâmetros elétricos de medição), sendo:

- Isolador de referência – um isolador ou cadeia de isoladores permanece instalado no local/ambiente a ser avaliado, atuando como superfície de deposição de poluentes, e periodicamente é efetuada coleta dos poluentes depositados na superfície isolante do isolador. Posteriormente, as amostras são avaliadas laboratorialmente, quantificando o sal e os depósitos não solúveis;
- Coletor de Depósito Direcional de Poeira (CDDP) – equipamento de coleta com sistemas de armazenamento de poluentes. Os coletores, que possuem formato padronizado, são orientados para os quatro pontos cardeais. Periodicamente (recomenda-se a cada 30 dias), é coletado o material de cada coletor. O método se difere dos demais por ser capaz de fornecer indícios da direção da fonte poluente e sua variação ao longo do período de avaliação, bem como a intensidade da poluição (FARMAN et al., 2011). A avaliação laboratorial é análoga a anterior.

Parâmetros Elétricos – para medições *in loco* nos isoladores, pode-se utilizar medições de condutividade volumétrica, número total de *flashovers*, medição da condutividade superficial e de corrente de fuga. Esses são métodos mais onerosos, pois necessitam de equipamentos de medição, adquirindo dados continuamente. Além disso, a medição da condutividade volumétrica não traz informações acerca do grau e periodicidade da ação dos contaminantes (PORTELLA et al., 2008).

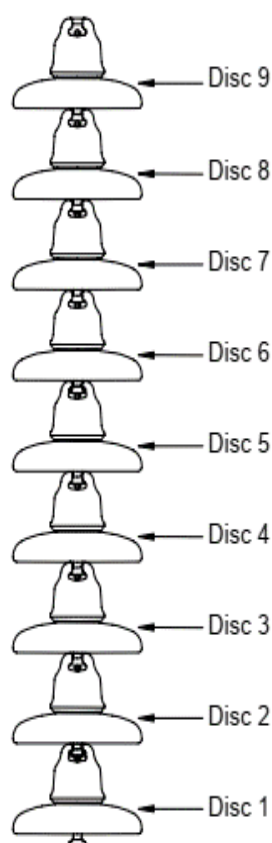
Os dois primeiros métodos de coleta não requerem equipamentos sofisticados. Estes dois procedimentos podem ser aplicados simultaneamente no local avaliado, atribuindo maior qualidade à classificação. Por serem métodos

diferentes, a coleta de amostras de poluentes depende do coletor utilizado, porém o objetivo é o mesmo: quantificar sais solúveis e materiais não solúveis.

2.3.1 Procedimentos de coleta – Cadeia de isoladores

A utilização de uma ou mais cadeias de isoladores (Figura 20) padrão permite a verificação de diferentes tempos de deposição nos isoladores. Por exemplo, é possível obter, além das coletas mensais, amostras trimestrais, semestrais ou até anuais. Os diferentes períodos auxiliam a compreensão da ação dos poluentes no local, bem como podem denotar a eficácia da capacidade de autolimpeza do isolador nas condições do local de instalação. Para tal, recomenda-se um período mínimo de 12 meses, com coletas mensais (ABNT, 2014).

Figura 20: Coleta em cadeia de isoladores: enumeração dos isoladores para coleta de amostras



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

Para a coleta, o isolador selecionado é retirado da cadeia, conforme o modelo da Figura 20 e posicionado em uma superfície que permita a sua limpeza. Como superfície de referência para a coleta, pode ser feito o escrutínio do poluente entre as superfícies superior e inferior do isolador, ou pode-se também adotar a coleta de toda a superfície isolante de uma só vez.

Seja em campo ou em laboratório, o isolador é lavado com água deionizada, para auxiliar na solubilização dos depósitos. Utiliza-se para auxiliar a remoção de todo material poluente algodão hidrófilo ou pincel, conforme ilustrado na Figura 21.

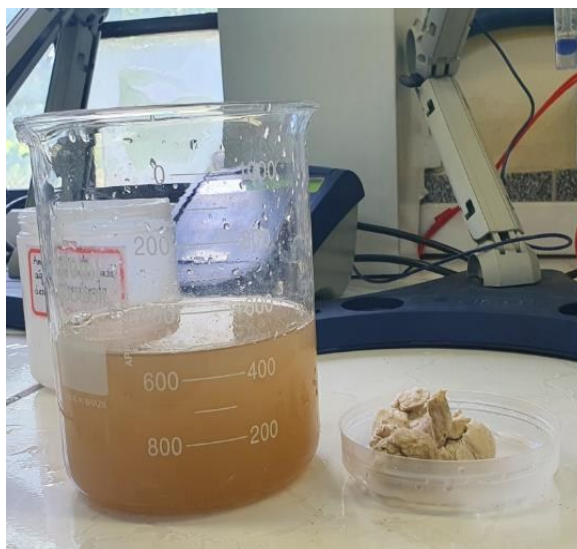
Figura 21: Coleta de poluentes, face superior do isolador.



Fonte: o autor, 2021.

A solução produzida é armazenada em recipiente graduado e uniformizado, isto é, completa-se o recipiente até o volume padrão escolhido, normalmente 500 ml ou 1000 ml, como apresentado na Figura 22.

Figura 22: Medição de condutividades em solução, após uniformização (500 ml).



Fonte: o autor, 2021.

2.3.2 Procedimentos de coleta – CDDP

A aplicação dos CDDPs auxilia a compreensão da dinâmica da poluição, principalmente no que tange à sua origem geográfica ou seu sentido de proveniência, dada sua característica direcional. É uma técnica que pode ser usada em conjunto com o DDSE e DDNS da cadeia de isoladores. O procedimento é simplificado e não exige grandes mobilizações ou aparato especializado durante as coletas. Além disso, o método prescinde da necessidade de utilizar isoladores em sua construção, apenas os coletores de poeira.

Na cidade de Barcarena, no estado do Pará, esta metodologia foi empregada na investigação da poluição em SEs. O procedimento de coleta em campo é demonstrado por Porfirio (2018), onde na Figura 23 é apresentada a estrutura instalada em campo. Por sua vez a coleta é demonstrada na Figura 24.

Figura 23: Exemplo de estruturas de coleta de poluentes em campo, pelo método do CDDP.



Fonte: Adaptado de Porfirio (2018).

Ao longo do período de exposição (em média 30 dias), a poeira entra pelos orifícios e se deposita na parte interna dos tubos. Para ser coletada, um jato de água deionizada é aplicado pelo orifício, é efetuada uma agitação para solubilização e desprendimentos dos depósitos. Ao final, a solução criada neste processo é removida e armazenada em um frasco.

Figura 24: Processo de coleta de amostras de poluentes em campo, a partir de CDDPs.



Fonte: Adaptado de Porfirio (2018).

Assim como na coleta em isolador padrão, as amostras provenientes do CDDP precisam ser uniformizadas, completando-se o nível do recipiente até atingir o volume de 500 ml ou 1000 ml. Em épocas de elevadas taxas de precipitação acumulada, é normal ocorrer retenção de volumes de água de chuva dentro do CDDP. Nessa condição, a solução somente será normalizada

se já não contiver o volume determinado para a avaliação, do contrário, é utilizada a solução do modo como foi encontrada.

2.3.3 Determinação da densidade de sal equivalente (DDSE)

Para obtenção do DDSE segue-se o procedimento estabelecido em norma (ABNT, 2014). Em laboratório, após a solução ser normalizada, inicia-se o processo pela medida da condutividade da solução. O valor obtido necessita ser referido para 20°C, isso é feito por meio da adequação da equação (8(1)).

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (1)$$

Onde:

- θ – Temperatura da solução (°C);
- σ_{20} – condutividade da solução a 20°C (S/m);
- σ_{θ} – condutividade da solução a θ °C (S/m);
- b – fator de correção a temperatura de θ °C;

Por sua vez, a salinidade da solução é determinada pela equação (2):

$$S_a = (5,7 * \sigma_{20})^{1,03} \quad (2)$$

Onde:

- S_a – salinidade da solução (kg/m³);

O cálculo do DDSE se dá, então, por meio da relação entre a salinidade e o volume de solubilização pela área de coleta, aplicando o valor da salinidade, obtido pela (2), na equação (3):

$$DDSE = \frac{S_a * V}{A} \quad (3)$$

Onde:

- S_a – salinidade da solução;
- V – Volume da solução normalizada;
- A – área da superfície.

No caso de coletas com separação de amostras entre superfície de topo e inferior do isolador padrão, é necessário efetuar a ponderação dos valores de DDSE de ambas as superfícies, por meio da equação (4):

$$DDSE = \frac{DDSE_{sup.} * A_{sup.} + DDSE_{inf.} * A_{inf.}}{A_{tot.}} \quad (4)$$

Onde:

$DDSE_{sup}$ – DDSE da parte superior;

$DDSE_{inf}$ – DDSE da área inferior;

A_{sup} – área da parte superior;

A_{inf} – área da parte inferior;

A_{tot} – área total do isolador, somadas superfícies superior e inferior;

Desta maneira, o valor de DDSE é obtido e expresso em mg/cm^2 .

2.3.4 Determinação da densidade de depósitos não-solúveis (DDNS)

O procedimento de cálculo do DDNS é dado pela relação entre a massa de poluente não solúvel e a área da superfície coletada. A massa de contaminantes não solúveis presentes nas soluções é obtida por meio de filtração, com filtros de fibra de vidro, como visto na Figura 25. Nesse processo, são retidos diferentes materiais particulados, tais como: poeiras, metais e outras sujidades depositadas naturalmente, por ação do tempo, sobre os isoladores ou dentro dos CDDPs.

Figura 25: Filtros após filtração e secagem



Fonte: O autor (2021).

A quantificação do material não solúvel é feita pela medição da massa retida no filtro. Para tal, após a filtração, a amostra é mantida em estufa, com temperatura controlada. A massa do filtro é medida quando seca e em temperatura ambiente, antes e depois da filtração. Por fim, a quantidade de particulado é expressa a partir da subtração: massa final do filtro menos massa inicial do filtro. O DDNS é, então, calculado a partir da relação da massa de material particulado pela área, expressa em mg/cm^2 .

2.3.5 Determinação da condutividade média (CDDP)

A técnica de CDDPs considera o acúmulo nos quatro diferentes coletores direcionais. No método, se calcula mensalmente a condutividade média entre coletores Norte, Sul, Leste e Oeste. Ainda, é considerado um ajuste pelo período de deposição, sendo 30 dias o valor de base, bem como o volume de normalização da amostra (ABNT, 2014; FARMAN *et al.*, 2011). Expressado matematicamente pela equação (5), onde se toma o Norte como exemplo, mas é aplicado aos demais pontos cardeais.

$$\sigma_{\text{Norte}} = C * \left(\frac{V}{500} \right) * \left(\frac{30}{N} \right) \quad (5)$$

Onde:

σ_{Norte} : Condutividade normalizada para a direção Norte

[$\mu\text{S/cm}$]

C: Condutividade da amostra

[$\mu\text{S/cm}$]

V: Volume de água para normalização [ml]

N: Número de dias de coleta

O valor médio da condutividade, utilizado para a classificação, é dado pela média entre os quatro níveis de condutividade normalizada (σ), ou seja, pela equação (6):

$$\sigma_{\text{Médio}} = \frac{\sigma_{\text{Norte}} + \sigma_{\text{Sul}} + \sigma_{\text{Leste}} + \sigma_{\text{Oeste}}}{4} \quad (6)$$

Ainda, é possível utilizar um fator de correção climático. Tendo os dados meteorológicos do local avaliado, pode-se calcular um índice multiplicativo, baseado na incidência de chuvas e nevoeiros. Esse fator é apresentado por Vosloo (2007) como Fator Climático (F_c), obtido por meio da equação (7):

$$F_c = \sqrt{\frac{\frac{F_d}{20} + \frac{D_M}{3}}{2}} \quad (7)$$

Onde:

F_d : Número de dias de nevoeiro por ano (visibilidade horizontal inferior a 1000 m)

D_M : Número de dias secos (precipitações menores que 20 mm)

Ao aplicar o fator, leva-se em consideração a influência de depósitos não solúveis. Neste caso, é comum o F_c elevar em um nível a classificação em locais com elevados níveis de DDNS (VOSLOO *et al.*, 2007).

2.4 Classificação da intensidade de poluição

A classificação da intensidade de poluição local considera o tipo de poluição e o método de coleta. Para poluição do tipo A, há de se considerar o método de obtenção, seja coleta em isolador padrão ou coletores direcionais. Após a obtenção das amostras e execução das medições, os valores de DDSE e DDNS são utilizados para relacionar com os níveis de poluição tabelados. Cada metodologia tem a sua respectiva tabela ou gráfico de classificação da SPL.

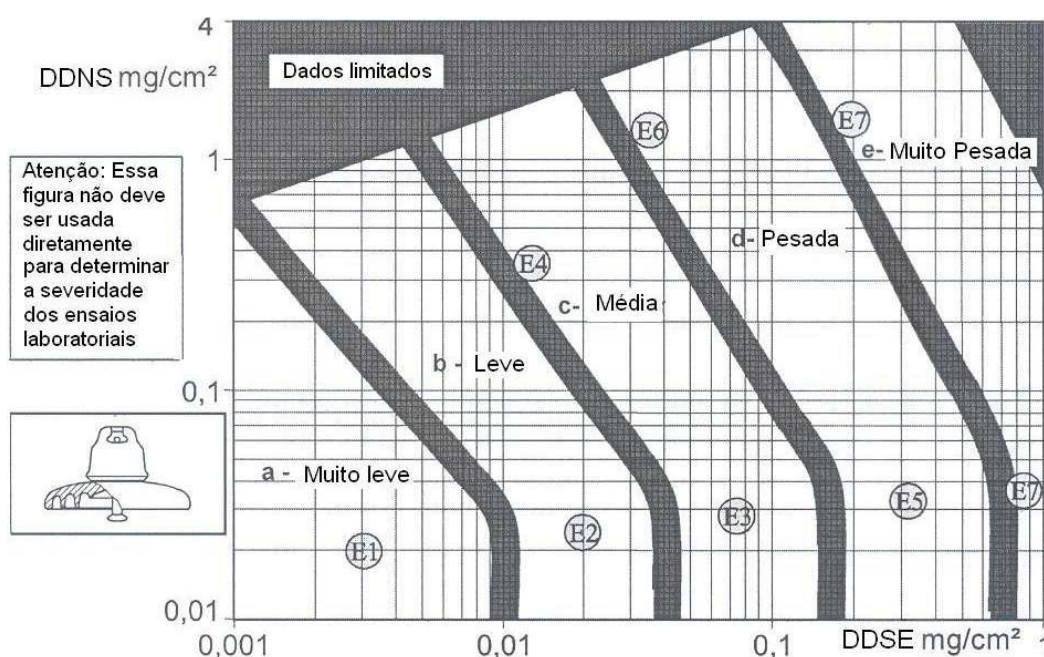
Para o tipo B pode-se aplicar a avaliação da Salinidade Equivalente Local (SEL) (ABNT, 2014). Esta abordagem não é contemplada neste trabalho.

2.4.1 SPL a partir de Cadeia de isoladores padrão

Para calcular a SPL a partir de uma cadeia de isoladores, de vidro ou cerâmica, inicialmente é efetuada a medição da condutividade do material coletado e calculado o seu DDSE. Em sequência, a solução é filtrada e o DDNS é calculado. Após obtidos, os índices DDSE e DDNS são cruzados no gráfico da Figura 26.

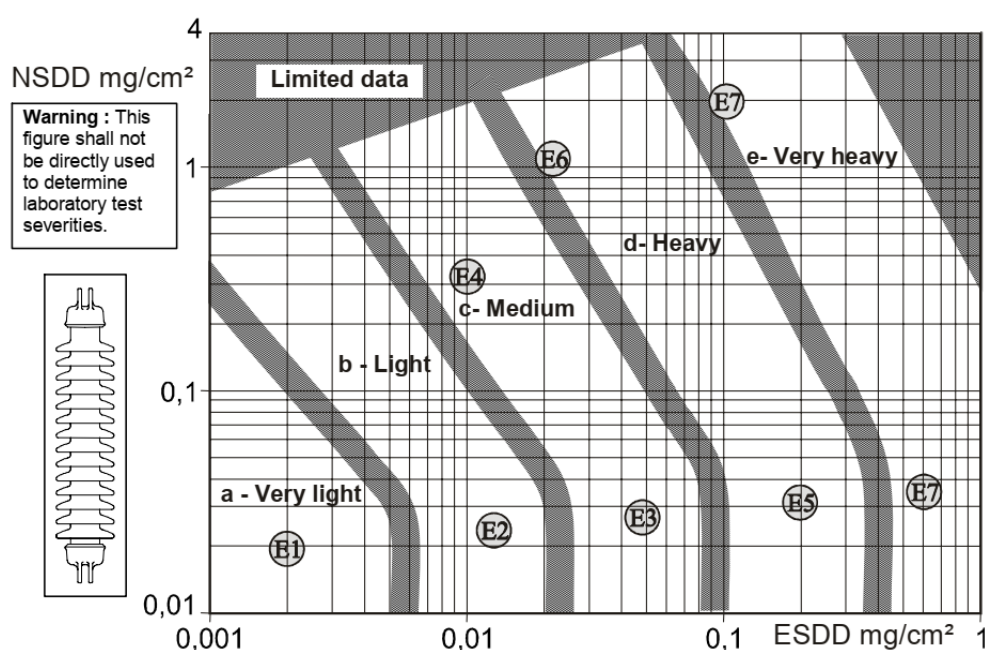
O procedimento também pode ser executado em isoladores do tipo bastão, para este modelo é utilizado um gráfico específico, conforme apresentado em norma (ABNT, 2014) e destacado na Figura 27.

Figura 26: Severidade de poluição tipo A (DDSE x DDNS), para isoladores de disco de vidro.



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

Figura 27: Severidade de poluição tipo A (DDSE x DDNS), para isoladores do tipo bastão.



Fonte: Adaptado de (IEC, 2008).

Desta maneira, para o método de classificação da poluição local por meio de coleta em isoladores padrão, a SPL é determinada pelo maior índice obtido ao longo do período de avaliação.

2.4.2 SPL a partir do CDDPs.

A avaliação por meio do CDDPs também passa pela uniformização da amostra, como descrito anteriormente. Esta metodologia utiliza-se de duas abordagens, nas quais se consideram para a classificação os valores médios de cada ciclo de coleta ou os valores máximos mensais. Ao final do período de avaliação, as médias são correlacionadas com a Tabela 2.

Tabela 2: Classificação da SPL para CDDPS

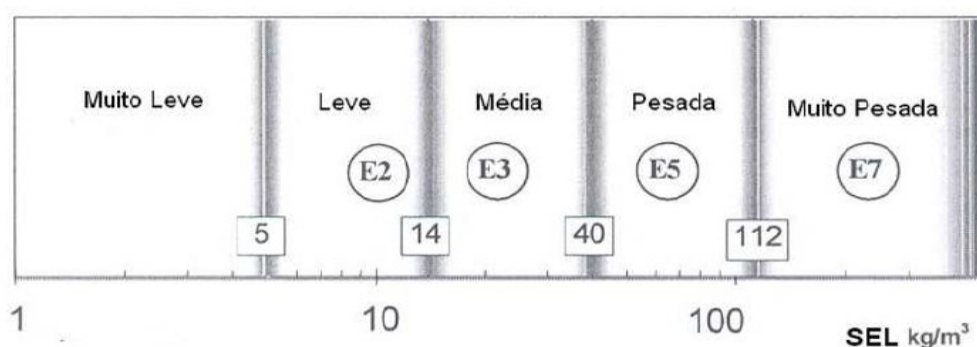
Índice da poluição do coletor ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		Classificação da SPL	
Média mensal (avaliação anual)	Valor máximo da média mensal (avaliação anual)	Classe	Significado
< 25	< 50	A	Muito Leve
25 a 75	50 a 175	B	Leve
76 a 200	176 a 500	C	Média
201 a 350	501 a 850	D	Pesada
> 350	> 850	E	Muito Pesada

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

2.4.3 Metodologias de classificação para poluição do tipo B

A SEL é o parâmetro principal para a graduação da Severidade de Poluição Local em ambientes sob ação do tipo B. Entretanto, o DDSE/DDNS aplicado ao tipo A pode ser necessário e também auxiliar na determinação da SPL. Para o tipo B, aplica-se a medição da condutividade superficial, em cadeias de isoladores padrão, bem como ensaios de névoa salina. A graduação da SEL é apresentada no gráfico da Figura 28.

Figura 28: Índice de severidade de poluição local para poluição tipo B



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

2.5 Métodos de monitoramento de poluição não normatizados

Quando se trata da caracterização da poluição local, diferentes são as abordagens que vêm sendo estudadas e propostas. Observa-se que elas têm o intuito de facilitar o processo de medição de poluição e caracterização. Esses métodos possuem relevância por poderem diminuir os custos associados ao processo de caracterização e de acompanhamento, dando maior resolução e até mesmo por poderem indicar em tempo real o estado no local de acompanhamento.

A fim de evitar surtos na rede e desgaste prematuro dos equipamentos, lavagens periódicas são efetuadas nos isoladores cerâmicos e de vidro, porém a determinação do intervalo de tempo ou do momento mais adequado para execução destas intervenções não é padronizada, uma vez que se relaciona diretamente com as características do local.

Na tentativa de predição de eventos e melhor programação de rotinas de limpezas, novas metodologias de avaliação da poluição emergem, tais como:

- ISCoM – monitor de condutividade superficial (*Insulator Surface Conductivity Monitor*).

O monitor de condutividade superficial foi concebido para apresentar maior detalhamento do comportamento elétrico da poluição em isoladores por meio de medições superficiais mais frequentes. O equipamento efetua leituras com intervalos previamente definidos, indicando a severidade da poluição de um “pré-depósito”, formando um banco de dados. O medidor também possibilita o registro de eventos instantâneos específicos, podendo apontar taxas de

crescimento ou mesmo de decréscimo natural da camada poluente, meses de maior ou de menor intensidade de deposição. A observação e correlação destes dados permite compreender o local, sobre a velocidade e intensidade de contaminação, bem como planejar assertivamente intervenções preditivas (VOSLOO *et al.*, 2007).

Uma relação entre a condutividade superficial, medida instantaneamente, com a severidade de poluição é sugerida por outros autores e foi utilizada por Vosloo (2007), conforme resumido na Tabela 3, na qual é apresentada a relação para apenas quatro dos cinco níveis utilizados pela norma ABNT IEC/TS 60815-1(2014).

Tabela 3: Relação Entre Severidade de Poluição e Condutividade Superficial

Condutividade superficial (μS)	Classes de Severidade de Poluição
<6	Leve
6 – 12	Média
>12 – 24	Pesada
>24	Muito Pesada

Fonte: Adaptado de (VOSLOO *et al.*, 2007).

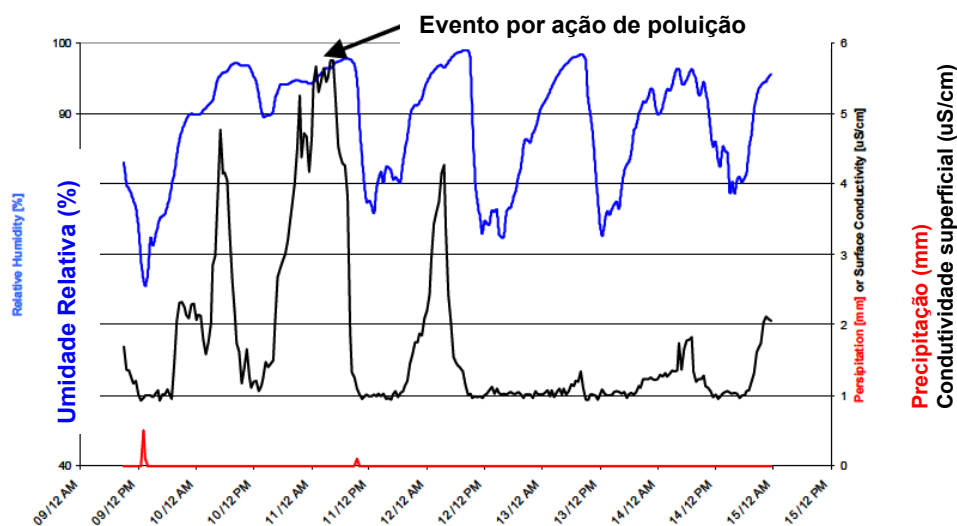
No trabalho apresentado por Vosloo (2007), realizado na região costeira da Namíbia, buscou-se correlacionar os índices obtidos pelos CDDPs com medições periódicas do ISCoM. Para tal, efetuaram-se múltiplas leituras em um isolador instalado em campo, que estava submetido às mesmas condições adversas e naturais do local de instalação do CDDP.

No mapeamento, confirmou-se que o afastamento da orla do mar diminui a poluição incidente de tipo B. O monitoramento efetuado com auxílio do ISCoM apresentou dois eventos significativos, onde o baixo índice de chuvas (menos que 1 mm), e a elevada umidade (maior que 80%) estavam simultaneamente relacionadas a picos de grande condutividade superficial.

Nas Figura 29 e Figura 30 é possível observar, em azul, a variação da umidade; em preto, a variação da condutividade superficial; e em vermelho a ocorrência de precipitações no local. Com a correlação temporal das curvas apresentadas, pode-se observar uma tendência de maior condutividade quando

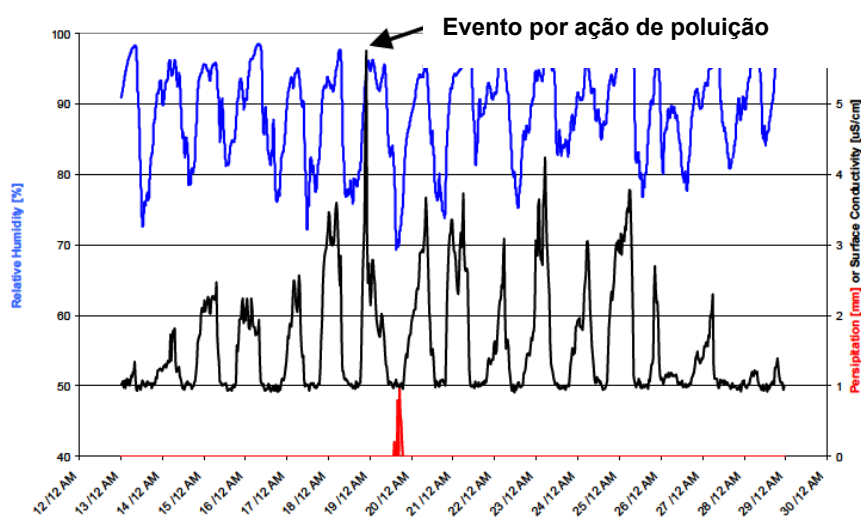
há elevados picos de umidade ou constância de umidificação natural, confirmando a existência de material salino solúvel sobre a superfície do isolador de referência.

Figura 29: ISCoM: curva de registros e indicação de eventos elétricos -1.



Fonte: Adaptado de (VOSLOO *et al.*, 2007).

Figura 30: ISCoM: curva de registros e indicação de eventos elétricos -2.



Fonte: Adaptado de (VOSLOO *et al.*, 2007).

Ainda, de acordo com os gráficos apresentados pelos autores, os eventos ocorreram no período da manhã, o que pode ser relacionado com o período de orvalho matinal, que propicia a solubilização dos sais depositados, condição também mencionada por Mello (2001). Os casos apresentados foram observados em UUbvlei. O índice de poluição estimado pelo CDDPs foi 87

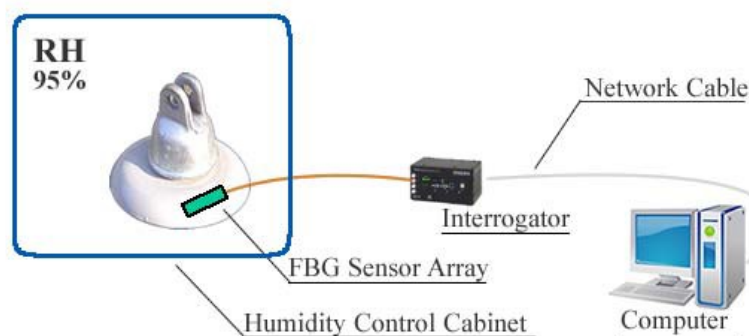
(médio) e 189 (máximo), resultando em classificação de poluição local como poluição “Média”.

Os resultados obtidos na Namíbia podem ser considerados promissores. Contudo, ainda demandam maior tempo de avaliação conjunta com as outras técnicas normatizadas.

- Sensor FBG – Sensor de fibra óptica para determinação do DDSE

Uma segunda metodologia promissora de medição contínua dos depósitos em isoladores é a FBG (*Fiber Bragg Grating*). O FBG consiste na aplicação do efeito de onda de Bragg em lâmina de poliamida. O efeito de onda em questão utiliza a distorção da onda eletromagnética entre diferentes camadas condutoras ópticas, a fim de expressar o nível de depósitos salinos. A poliamida é sensível a variações de umidade e o sal, por sua vez, age absorvendo a umidade ambiente. Assim, o equipamento é sensibilizado pela alteração da espessura entre as camadas, afetando o comportamento de reflexão e refração da luz incidente sobre o sensor. Para que seja possível a medição, o sensor FBG é anexado à superfície do isolador, como na Figura 31 (MA *et al.*, 2015).

Figura 31: Aplicação do sensor FBG para determinação de DDSE



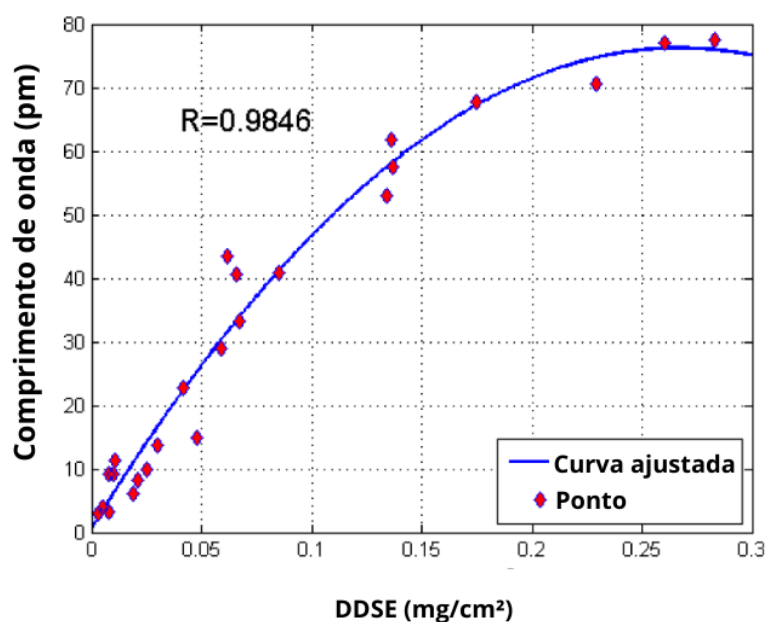
Fonte: Adaptado de (MA *et al.*, 2015)

Para os testes, os autores utilizaram uma câmara com controle de umidade relativa do ar (UR), ajustada para variar de 20 % a 95 %. Foi também utilizado um equipamento emitindo um comprimento de onda de Bragg de 60 pm. Quando o sensor foi coberto com sal, observou-se um incremento no comprimento de onda na ordem de 55 pm para depósitos de 0,413 mg/cm². Os autores indicam ainda que a sensibilidade do equipamento pode ser elevada com o aumento da espessura da poliamida. Um sensor com camada mais espessa, composto por 5 lâminas sobrepostas, sob as mesmas condições de ensaio,

apresentou melhora significativa da sensibilidade: a variação de comprimento de onda foi de 600 pm.

A metodologia de umidificação e poluição foi realizada repetidas vezes. Simultaneamente, foram efetuadas as medições de DDSE no isolador de corpo de prova. A poluição foi composta por mistura de cinzas e sal. Os dados coletados permitiram criar uma curva de relação da variação do comprimento de onda em função do índice de depósito de sal, conforme Figura 32.

Figura 32: Relação DDSE e variação de onda.



Fonte: Adaptado de (MA *et al.*, 2015).

2.6 Ensaios elétricos com poluição artificial

No Brasil, para fins de avaliação, testes e desenvolvimento de isoladores que irão operar sob condição de poluição, há a norma “ABNT NBR 10621/2017 Isoladores para alta tensão em corrente alternada – Ensaios de poluição artificial”. Essa norma traz consigo orientações quanto à execução de ensaios, preparação de corpos de prova e formas de condicionamento de poluição para isoladores não poliméricos. Dois métodos de ensaio são propostos: ensaio sob névoa salina e ensaio com camada sólida. Estes ensaios são formas de avaliar a condição de operação para ambientes simulando poluentes do tipo A ou do tipo B, conforme definido na Norma ABNT IEC/TS 60815-1 (2014). Os objetivos

dos ensaios são: obter informações acerca do desempenho de diferentes perfis de isoladores sob poluição e também verificar o desempenho para a condição que melhor representa o local de instalação e operação, como prevê a norma (ABNT, 2017).

O ensaio com névoa salina pode induzir a ocorrência do flashover sob a condição de salinidade preparada, uma vez que o efeito da névoa na diminuição da suportabilidade é muito rápido. Nesse ensaio, a tensão elétrica é aplicada em patamares de uma hora em cada nível, elevando o potencial até que ocorra uma descarga. O ensaio é repetido diversas vezes até encontrar o valor da tensão suportável para o nível de poluição imposto. Assim, as condições submetidas aos isoladores forçam ocorrências de descargas muito rapidamente nas suas superfícies, de forma análoga à ação da poluição tipo A descrita na norma ABNT IEC/TS 60815-1 (2014).

Por outro lado, no ensaio com camada sólida, os diferentes compostos são aplicados sobre o isolador limpo e seco, buscando-se uma distribuição superficial uniforme. A contaminação pode ser feita ainda por spray, imersão ou pulverização. No ensaio, podem ser avaliadas a suportabilidade elétrica em relação ao nível de poluição e o grau de poluição admissível pelo isolador estudado (ABNT, 2017).

Analisando o desempenho de isoladores com poluição artificial em ensaios laboratoriais sob condição de chuva artificial, os resultados apontam que a intensidade da chuva impacta diretamente no desempenho do isolamento. Chuvas mais intensas diminuem a resistência superficial por um período curto, porém a resistividade superficial aumenta rapidamente, como efeito de limpeza/lavagem natural. Chuvas menos intensas implicam na diminuição rápida da resistividade superficial, permanecendo por maiores períodos em valores críticos, com retorno lento ao patamar de maior suportabilidade. Por sua vez, a aplicação de névoa apresentou-se como o cenário mais agressivo, tendo menor índice de resistividade com constância em patamar crítico. Em todos os casos, é possível estabelecer uma relação direta entre tensão suportável e resistividade superficial. Comparativamente, isoladores de silicone tiveram melhor desempenho em tensão suportável sob névoa se comparados aos de vidro e cerâmicos. Sob chuva, o comportamento foi similar entre eles. Ainda, os isoladores de silicone apresentaram diminuição de resistividade superficial com

umidade acima de 80%, ao passo que os de porcelana tiveram diminuição em índice de 70% (PORTELLA et al., 2008).

3 DESENVOLVIMENTO

Esta seção é destinada à apresentação dos desenvolvimentos e das metodologias de ensaios, procedimentos de testes, bem como materiais, equipamentos e ambientes de ensaios utilizados na obtenção de dados relevantes à elaboração desta pesquisa.

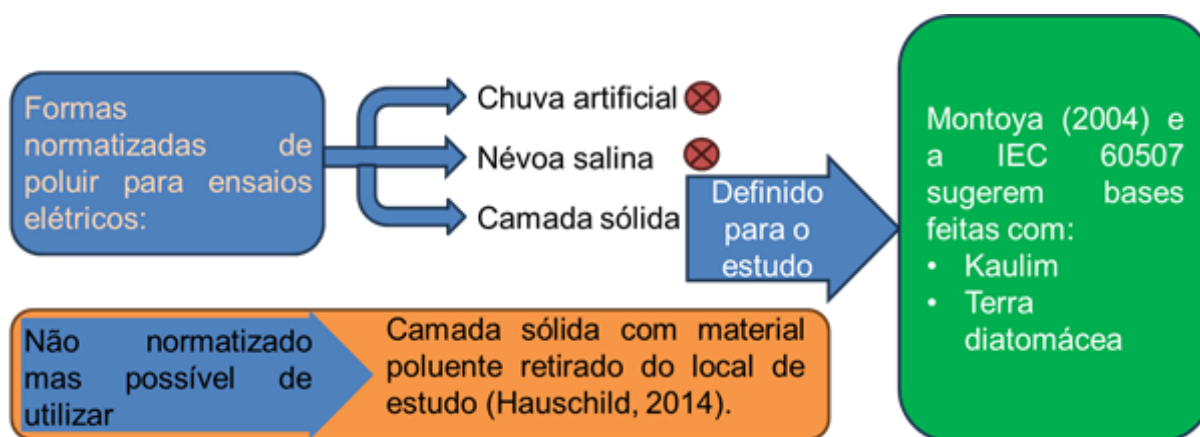
As metodologias apresentadas abordam o desenvolvimento de soluções poluentes artificiais, métodos de contaminação de isoladores para execução de ensaios, medições e caracterizações elétricas da poluição e parametrização de efeitos da poluição em isoladores sob diferentes condições de umidade e de temperatura.

3.1 Desenvolvimento de poluição artificial para testes elétricos

A primeira etapa do desenvolvimento foi a preparação de uma metodologia para condicionamento de isoladores cerâmicos ou de vidro, tendo assim o objetivo de recriar, em laboratório, os níveis de poluição definidos na norma ABNT 60815-1 (2014).

Como há diferentes formas de testes com poluição, foi preciso definir um tipo a ser explorado, delimitando o trabalho, e neste sentido também foi necessário buscar referências para a produção das soluções poluentes. Na Figura 33 é possível compreender o fluxo de trabalho.

Figura 33: Fluxograma: definição de método de ensaio e tipo de poluentes.



Fonte: O Autor, 2024.

As formulações e o método de aplicação, ora chamado de condicionamento, são necessários para a execução de ensaios onde há a necessidade de se obter valores bem definidos de DDSE e DDNS. Essa etapa foi dividida em duas atividades: 1) pesquisa e elaboração de soluções de poluição; 2) desenvolvimento de método de condicionamento de corpos de prova.

3.1.1 Desenvolvimento de formulação/solução de poluição artificial

Há diferentes formas de se poluir um isolador. Hauschild e Lemke (2014) destacam que a norma internacional IEC 60507 (IEC, 2013) sugere e descreve dois métodos de ensaio destinados a isoladores de vidro ou cerâmicos que não tenham coberturas (como silicones ou graxas):

- método da névoa salina, concentrações de sal de 2,5 a 20 kg m⁻³;
- método da camada sólida (ou de pré-depósito): aplicação de poluição artificial na forma de suspensão.

Há ainda uma terceira possibilidade de poluentes testada para ensaios e ela é sugerida por Karady (1996), a atomização de poluição natural para jateamento (terra, areia e outros compostos oriundos do local de instalação dos isoladores), que foi proposta em trabalho destinado ao condicionamento de amostras não cerâmicas, mas que não será utilizada na presente pesquisa, uma

vez que poderia impor fatores desconhecidos e impactar em desvios nos índices de DDSE e DDNS.

Seguindo a metodologia da camada sólida, explorada por Montoya (2004) e baseada na norma IEC 60507, foram preparadas duas soluções-base, inicialmente sem a utilização de cloreto de sódio (NaCl). Para a segunda etapa, foi feita a escolha do NaCl como sal de controle e intensificação do DDSE. A escolha se deu pelas propriedades químicas de solubilidade, mobilidade iônica e também pelos resultados mais efetivos na diminuição da tensão de flashover, como apresentado por Farman (2011).

Na primeira parte do desenvolvimento, buscou-se conhecer qual o nível de poluição em que apenas a parte coloidal implicaria na relação de DDSE e DDNS, ou seja, qual intensidade seria obtida com a técnica de poluição escolhida. As formulações preparadas foram:

Poluente 1 - *Keiseltuhr* (terra diatomácea): solução composta por 100 g de *Keiseltuhr* (terra diatomácea), 10 g de dióxido de silício (SiO₂), 1000 g de água deionizada. Assim, das relações apresentadas pela IEC (2013), na Tabela 4, são esperadas para o poluente 1:.

Tabela 4: Referência do grau de poluição - Poluente 1.

<i>DDSE (mg.cm-2)</i>	<i>Camada μ.S</i>	<i>Solução S.m-1</i>	<i>SPL (ABNT IEC/TS 60815-1)</i>
0,0176	7	0,21	E2 – Leve
0,025	10	0,3	
0,0353	14	0,42	
0,05	20	0,6	E3 – Médio
0,705	26	0,85	
0,1	40	1,2	
0,141	56	1,69	E5 – Pesado
0,2	60	2,4	

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014; IEC, 2013).

Poluente 2 – Kaolin ou Tonoko: mistura composta por 40 g de Kaolin, também conhecido como Tonoko, com acréscimo de 1000 g água deionizada.

Por sua vez, a relação apresentada pela IEC 60507 (IEC, 2013) para o poluente 2 é exibida na Tabela 5.

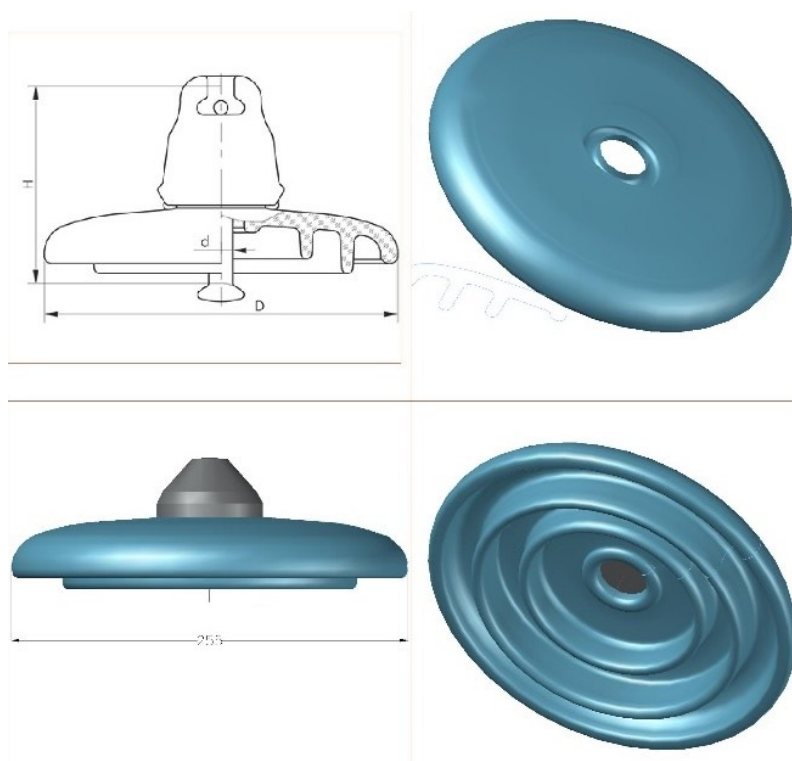
Tabela 5: Referência do grau de poluição - Poluente 2.

<i>DDS (mg cm-2)</i>	<i>Camada μS</i>	<i>Solução S m-1</i>	<i>SPL (ABNT IEC/TS 60815-1)</i>
0,025	3	1	E2 – Leve
0,035	4,2	1,4	
0,05	5,6	2	E3 – Médio
0,07	8	2,6	
0,1	11	4	
0,14	14,5	5,6	
0,2	20	8	E5 - Pesado
0,28	27	11,2	
0,4	37	16	

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014; IEC, 2013).

Como parâmetro de controle, para o processo de coleta e classificação da intensidade de poluição, foi selecionado e utilizado como substrato o isolador de disco de vidro padrão, de suspensão tipo concha/bola, modelo U-120. O isolador foi medido e desenhado em software CAD, para o cálculo mais preciso dos valores de área das superfícies isolantes, superior e inferior, como apresentado na Figura 34.

Figura 34: Modelagem obtida para o Isolador disco de vidro modelo U120 utilizando o software CAD.



Fonte: o autor, 2022.

Como resultado, a área superficial total considerada para a classificação dos níveis de poluição do isolador foi de aproximadamente $A = 1650 \text{ cm}^2$. Ressalta-se que, este valor de área será utilizado nos cálculos de DDSE e DDNS, dos métodos de poluição e das soluções testadas, conforme metodologia apresentada nos itens 2.3.3 e 2.3.4 .

3.2 Métodos de aplicação

Foram testadas duas formas de condicionamento dos isoladores, a aspersão de solução contaminante líquida e a imersão em solução contaminante, para ambos os poluentes.

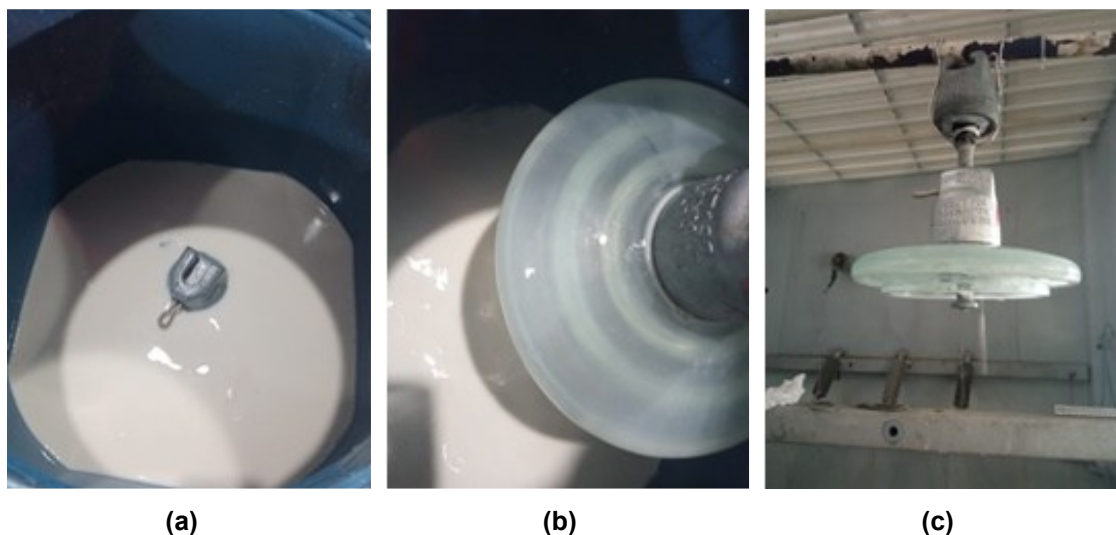
O objetivo destes testes foi comparar entre eles qual método proporcionará melhor uniformidade de poluição, dada a importância, conforme mencionado anteriormente, da distribuição da camada poluente no que concerne à suportabilidade elétrica do isolador.

3.2.1 Contaminação por Imersão em solução

O método consiste na imersão do isolador na solução contaminante. Durante esse processo, o isolador fica completamente envolto pela solução. O método é recomendado pela norma IEC 60507 (2013) e descrito em seu item 6.3.2 *Composition of the contaminating suspension* (Composição de contaminação em suspensão).

A solução poluente possui componentes que não se solubilizam, formando uma espécie de suspensão coloidal e, por este motivo, tende a se depositar no fundo do recipiente. Tal característica implica na necessidade de se manter o poluente em constante agitação, para garantir que todos os constituintes da solução permaneçam dispersos e distribuídos por todo o volume do recipiente. Assim, optou-se por promover a agitação por meio da rotação do isolador a aproximadamente 10 rpm. O teste de aplicação por imersão é apresentado na figura 35.

Figura 35: Isolador padrão (modelo U120) durante (a), e após (b) o processo de imersão e secagem (c) utilizando a solução 1.



Fonte: o autor, 2022.

Após o processo de imersão, observou-se que a camada de poluente depositada na superfície do isolador apresentou distribuição uniforme e uma camada visualmente fina, não apresentando grandes diferenças de opacidade ao longo da superfície ou a presença de pontos de maior acúmulo. Em contrapartida, observou-se que o método não permite novas deposições

(sobreposição de camadas/demãos), e que a superfície inferior obtém menor impregnação do poluente.

3.2.2 Aspersão – Manual e Pressurizada

O método de contaminação por aspersão tem por objetivo aplicar o poluente de maneira mais controlada. Explorar este método pode permitir a deposição nos vários corpos de prova seguindo sempre os mesmos critérios, isto é, mantê-los sob o mesmo tempo, na mesma distância do aplicador, com a mesma pressão e velocidade de projeção do poluente. O método foi adaptado a partir da IEC 60507, com o diferencial de possibilitar o processo de multicamadas.

Para a aplicação do método por aspersão manual, foi inicialmente utilizado um pulverizador com pressão manual. Ao efetuar o jateamento, a distância foi padronizada em 30 cm (com variação de ± 5 cm) entre o bico do pulverizador e a borda do corpo de prova. Uma foto desse instrumento pode ser vista na figura 36.

Figura 36: Foto do pulverizador manual.



Fonte: o autor, 2022.

Na Figura 37 é apresentado o isolador de disco de vidro modelo U120 antes e após a aplicação da solução 1, pela técnica de aspersão.

Figura 37: Isolador padrão (disco de vidro modelo U120) antes (a) e após (b) a deposição da solução 1 pelo processo de aspersão.

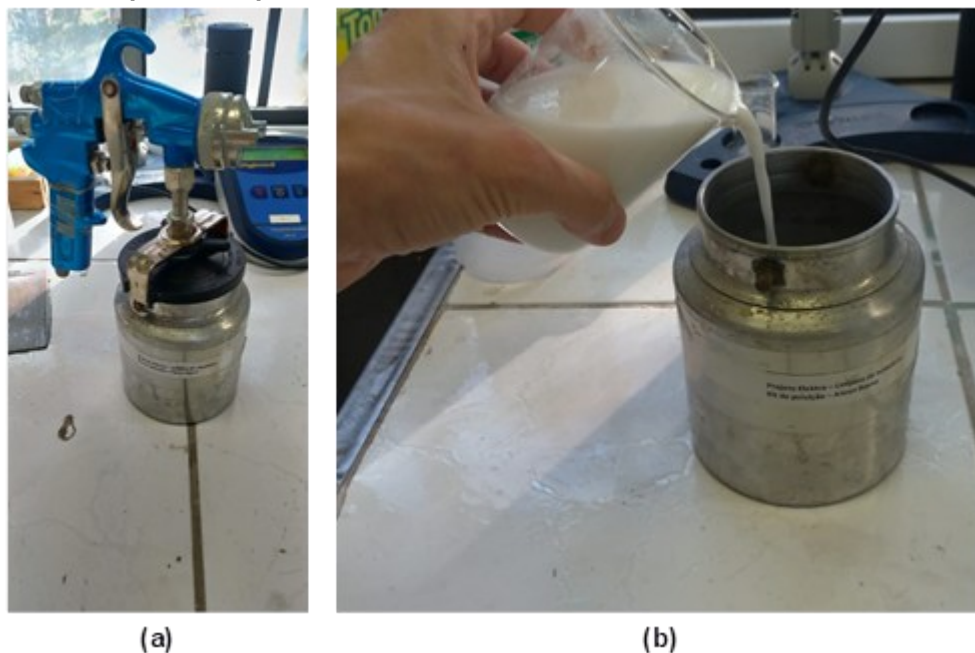


Fonte: o autor, 2022.

A aplicação da solução foi feita em toda a superfície do isolador e os primeiros resultados indicaram que o método de deposição por aspersão é eficiente e eficaz, e tem capacidade de impregnar as superfícies inferior e superior com grande similaridade. Observou-se que a variação da pressão afetava o tamanho das gotículas, ocasionando variações de quantidade de poluente depositados na superfície (na forma de trilhas e gotas nas bordas).

Ao serem experimentadas soluções contendo NaCl na composição, foi observada uma dificuldade de uso do pressurizador manual. Como solução, foi empregada uma adaptação da técnica sugerida por Karady (1996): uma pistola de pintura com pressão controlada e regulação ampla do leque de pulverização ($\pm 150^\circ$). Além disso, a distância entre o bico do pulverizador e o isolador foi ampliada para 50 cm (± 5 cm). O aparato utilizado é exemplificado na Figura 38.

Figura 38: Aspersão por pistola de pintura (jateamento pressurizado). Em (a) tem-se a pistola para pintura e em (b) o recipiente da pistola recebendo a solução de terra diatomácea e SiO₂ para ser aplicada aos isoladores.



Fonte: o autor, 2022.

Complementarmente, também foi criado um dispositivo para aplicar rotação ao espécime em contaminação. Com ele, foi possível controlar a velocidade de rotação, a fim de obter a uniformidade de camada, bem como o tempo de aplicação.

3.2.2.1 Controlador de contaminação artificial

O equipamento de rotação foi preparado buscando atribuir maior controle e precisão da aplicação da poluição, analogamente a um processo de pintura industrial de alto rendimento. Com ele, foi possível aplicar ajustes de controle de velocidade de rotação e tempo de exposição. O equipamento é mostrado na figura 39.

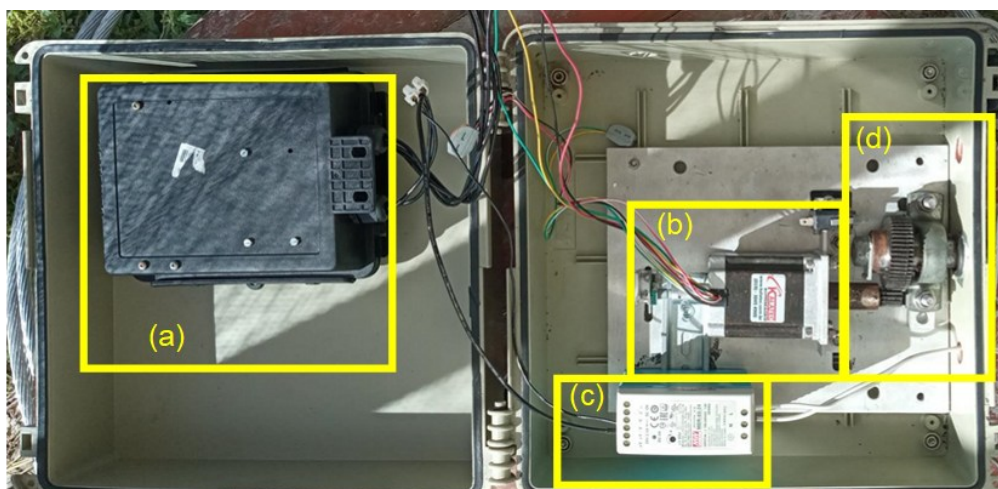
Figura 39: Equipamento de controle de exposição à aplicação de poluição artificial.



Fonte: o autor, 2022.

O equipamento suspende o isolador que será contaminado (figura 39), e o submete a uma determinada taxa de rotações por minuto (RPM) uniforme, controlando também o tempo de aplicação da poluição. Os parâmetros RPM e tempo são ajustáveis, sendo regulados por meio de potenciômetro. O operador controla estes parâmetros em um *display* posicionado na parte externa da caixa.

Figura 40: Controlador de poluição: componentes internos



Fonte: o autor, 2022.

- a) Internamente, conforme apresentado na figura 40, o equipamento dispõe de:
- b) Uma placa eletrônica de desenvolvimento tipo Arduino, para controle e funções lógicas (velocidade de rotação, abertura e fechamento de válvula solenoide, ajuste de tempo);
- c) Um motor de passo, para movimentação da carga (isolador);
- d) Uma fonte chaveada, para alimentar o controlador e o motor;
- e) Caixa de redução mecânica.

3.2.3 Testes de Formulações de Contaminação Artificial

Nesta etapa, foram realizados testes de aplicação das soluções sob os métodos de imersão e aspersão. Ainda, foram testadas aplicações de aspersão com mais de uma camada (demão), a fim de se observar possíveis variações de DDNS. O número de amostras para cada teste foi de três a seis unidades, para que se pudesse extrair um valor médio entre cada rodada de testes. Ao longo dos testes preliminares, foi observado que havia convergência de resultados e, por tal motivo, entende-se que o número de amostras se apresentou como suficiente.

3.2.3.1 Solução 1 - terra diatomácea e dióxido de silício (SiO_2)

Nas Tabela 6 a 9 são apresentados os valores obtidos de DDSE e DDNS para as amostras de isoladores poluídas artificialmente, utilizando a Solução 1, através dos métodos de imersão e aspersão.

Tabela 6: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente por imersão com a solução 1 (terra diatomácea e SiO₂).

Método	Amostra	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)
Imersão	A	0,0022	0,627
	B	0,0024	0,6882
	C	0,0024	0,8121
	D	0,0022	0,6547
	E	0,002	0,7835
	F	0,0019	0,6448
Média		0,0022	0,67
Desvio Padrão		0,0002	0,08

Fonte: o autor, 2022.

Tabela 7: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente por aspersão com uma camada da solução 1 (terra diatomácea e SiO₂).

Método	Amostra	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)
Aspersão 1 camada	1	0,0023	0,3538
	2	0,0022	0,3830
	3	0,0023	0,3530
	4	0,0028	0,4077
	5	0,0025	0,4721
	6	0,0024	0,4818
Média		0,0024	0,40
Desvio Padrão		0,0002	0,06

Fonte: o autor, 2022.

Tabela 8: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente por aspersão com 2 camadas da solução 1 (terra diatomácea e SiO_2).

Método	Amostra	DDSE (mg.cm^{-2})	DDNS (mg.cm^{-2})
Aspersão 2 camadas	1	0,0035	0,9139
	2	0,0037	0,9709
	3	0,0036	0,7832
Média		0,0036	0,9
Desvio Padrão		0,0001	0,1

Fonte: o Autor (2022).

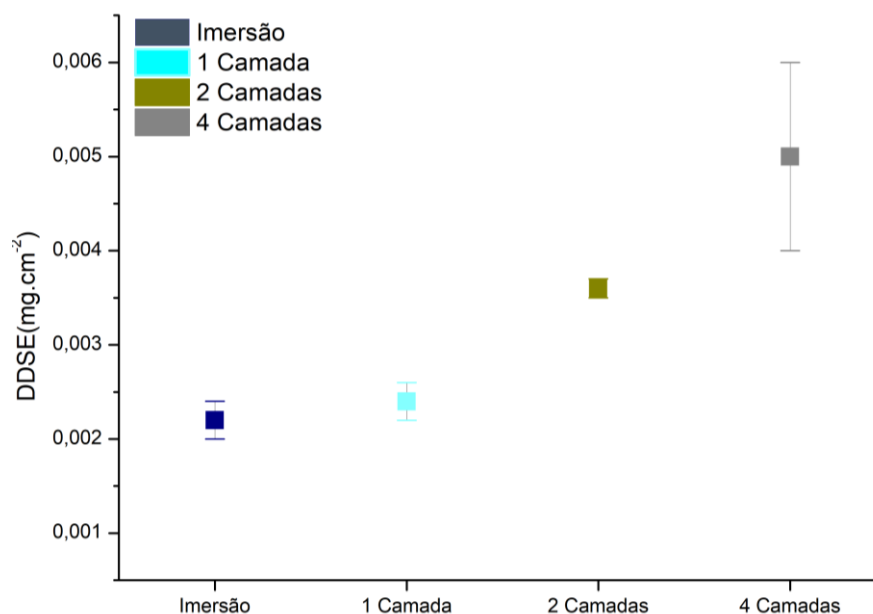
Tabela 9: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente por aspersão com 4 camadas da solução 1 (terra diatomácea e SiO_2).

Método	Amostra	DDSE (mg.cm^{-2})	DDNS (mg.cm^{-2})
Aspersão 4 camadas	4	0,0063	1,3159
	5	0,0049	1,1655
	6	0,0034	1,0443
Média		0,005	1,2
Desvio Padrão		0,001	0,1

Fonte: o autor, 2022.

Para interpretar os resultados das Tabela 6 a 9 foi preparado o gráfico da figura 41, na qual são apresentados a média e o desvio padrão para os valores de DDSE.

Figura 41: Comparativo dos valores DDSE para a solução 2 (terra diatomácea e SiO_2).

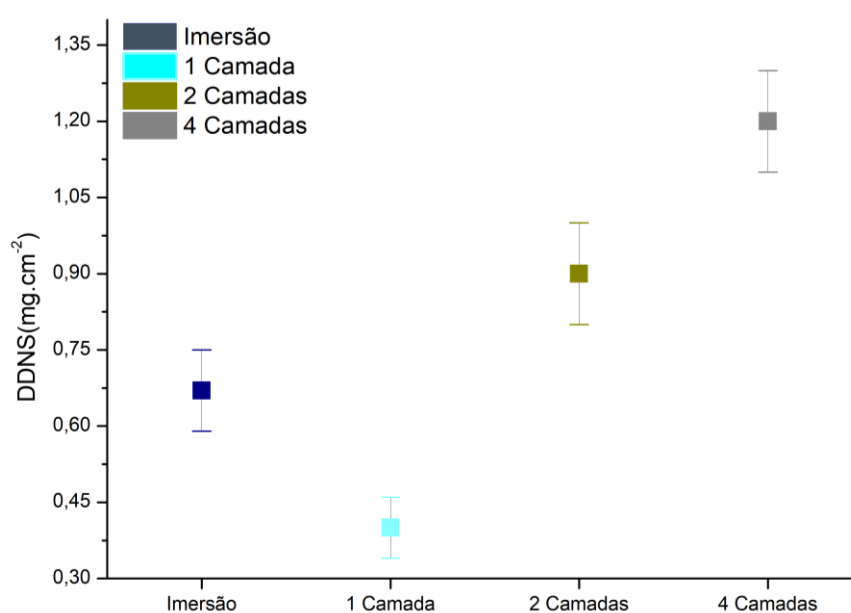


Fonte: o autor, 2022.

Da figura 41, observa-se que o DDSE se manteve dentro da faixa de 0,002 mg.cm⁻² a 0,003 mg.cm⁻² para os processos de imersão e aspersão de camada única. Porém, ao aumentar o número de camadas no método de aspersão, a DDSE também aumentou, indicando uma elevação da quantidade de depósito de sal com o número de camadas.

Os valores de média e desvio padrão para o DDNS presentes nas tabelas 6 a 9 estão representados no gráfico da figura 42.

Figura 42: Comparativo dos valores DDNS para a solução 1 (terra diatomácea e SiO_2).

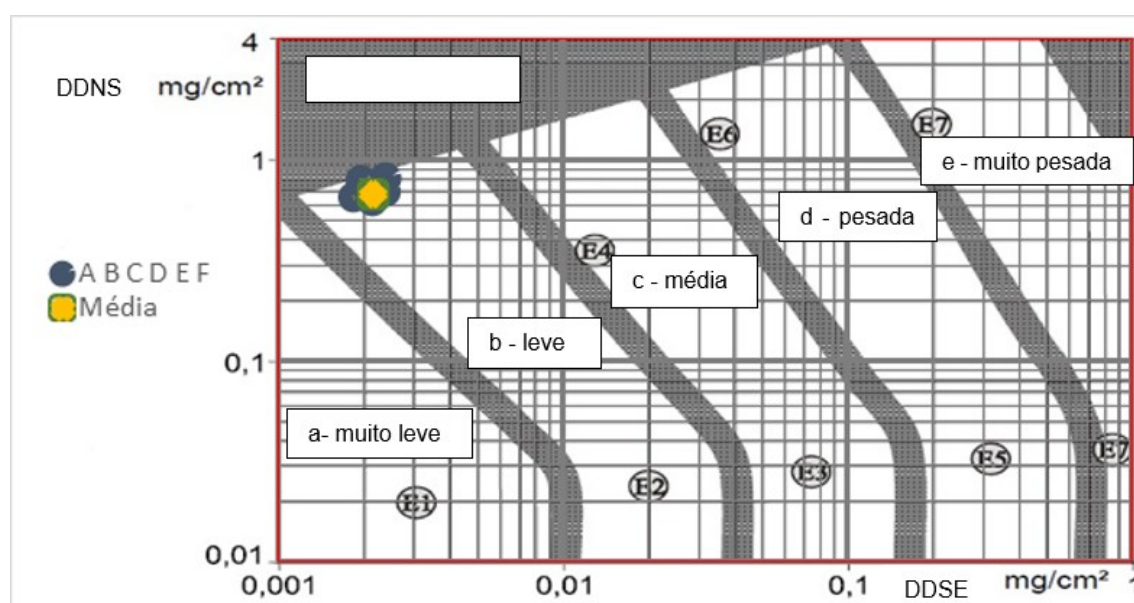


Fonte: o autor, 2022.

Considerando ainda a figura 42, pode-se observar que os métodos de imersão e de aspersão com apenas uma camada apresentam mudanças significativas em valores absolutos de DDNS entre si, onde por aspersão é obtida uma média de $0,35 \text{ mg.cm}^2$ enquanto que por imersão foi obtida a média de $0,65 \text{ mg.cm}^2$. Além disso, destaca-se que o método de aspersão, quando do aumento do número de camadas, denota uma tendência de aumento de DDNS. Esta característica apresenta-se como positiva, pois indica capacidade de controle dos depósitos, isto é, com o emprego de mais ou menos camada pode-se transitar na faixa de poluição objetivada.

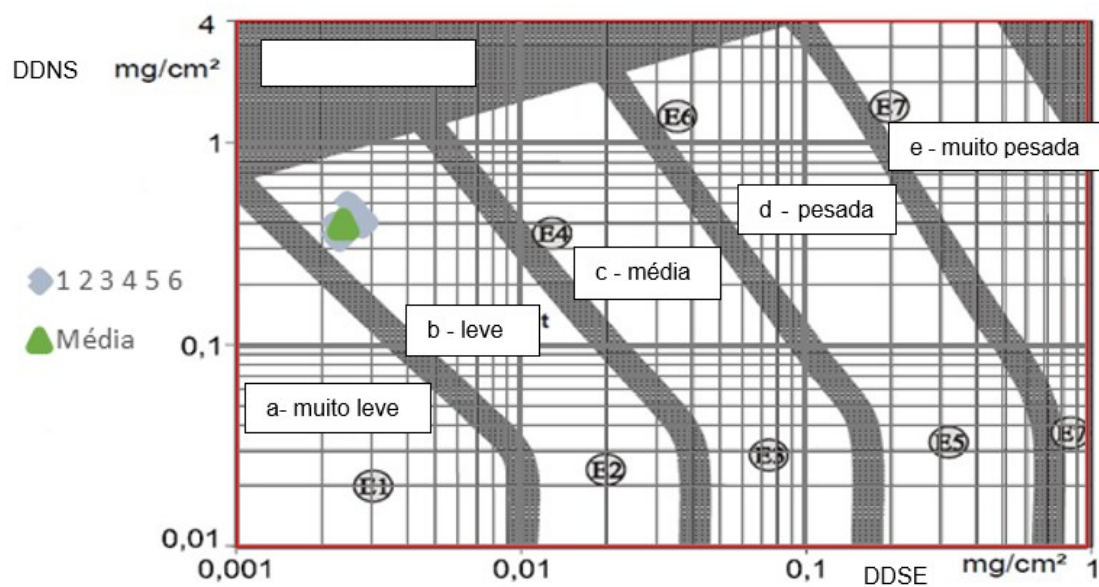
Com base nos valores de DDSE e DDNS obtidos, foi estabelecida a classificação SPL para cada técnica, conforme apresentado nas figuras 43 a 45.

Figura 43: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por imersão utilizando a solução 1 (terra diatomácea e SiO_2).



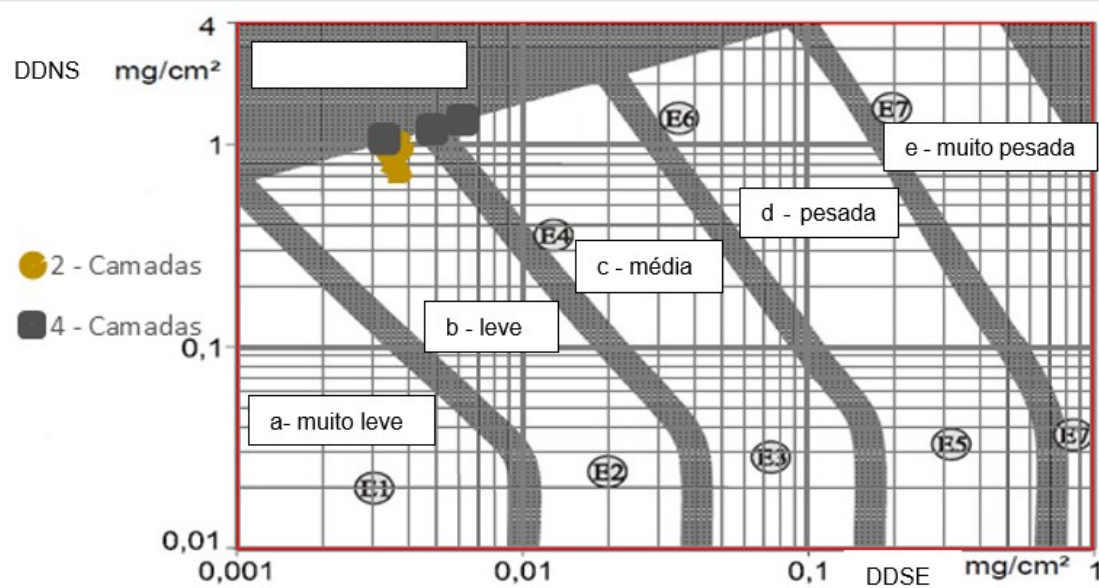
Fonte: o autor, 2022.

Figura 44: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por aspersão, com uma única camada, utilizando a solução 1 (terra diatomácea e SiO_2).



Fonte: o autor, 2022.

Figura 45: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por aspersão, com deposição de duas e quatro camadas, utilizando a solução 1 (terra diatomácea e SiO_2).



Fonte: o autor, 2022.

Por não terem compostos salinos (NaCl) nas soluções poluentes desta etapa, não se observa variação significativa nos níveis de DDSE entre os métodos.

3.2.3.2 Solução 2 - caulim

Nas tabelas 10 a 13 são apresentados os valores de DDSE e DDNS para as amostras de isoladores poluídas artificialmente utilizando a solução 2 por meio dos métodos de imersão e aspersão, respectivamente.

Tabela 10: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente pelo método de imersão com a solução 2 (caulim).

Método	Amostra	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)
Imersão	A	0,003	0,2487
	B	0,002	0,2377
	C	0,002	0,2632
	D	0,003	0,4180
	E	0,002	0,4517
	F	0,002	0,7842
Média		0,0021	0,3
Desvio Padrão		0,0005	0,2

Fonte: o autor, 2022.

Tabela 11: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente pelo método de aspersão com 1 camada da solução 2 (caulim).

Método	Amostra	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)
Aspersão 1 camada	1	0,003	0,3399
	2	0,002	0,3262
	3	0,002	0,3051
	4	0,001	0,2775
	5	0,001	0,2557
	6	0,002	0,3093
Média		0,0018	0,31
Desvio Padrão		0,0007	0,03

Fonte: o autor, 2022.

Tabela 12: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente pelo método de aspersão com 2 camadas da solução 2 (caulim).

Método	Amostra	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)
Aspersão 2 camadas	1	0,003	0,8781
	2	0,003	1,2534
	3	0,001	0,6937
Média		0,0022	0,9
Desvio Padrão		0,0007	0,3

Fonte: o autor, 2022.

Tabela 13: Valores de DDSE e DDNS, para as amostras de isoladores poluídas artificialmente pelo método de aspersão com 4 camadas da solução 2 (caulim).

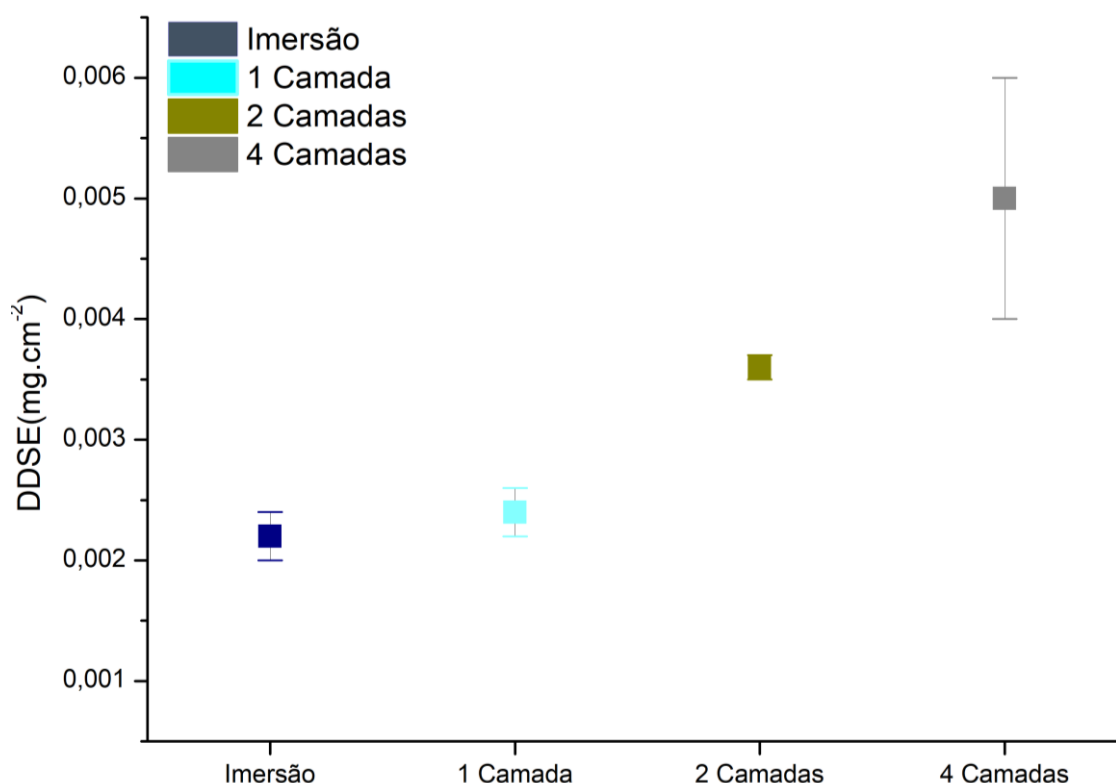
Método	Amostra	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)
Aspersão 4 camadas	4	0,002	0,8994
	5	0,003	1,3550
	6	0,002	0,8662
Média		0,0026	1,0
Desvio Padrão		0,0006	0,3

Fonte: o autor, 2022.

As aplicações de 2 e 4 camadas foram testes complementares, por tal motivo foi utilizada uma amostra suficiente para se produzir uma média.

Os resultados das tabelas 10 a 13 são expressos na forma de média e o desvio padrão de DDSE por meio do gráfico da figura 46.

Figura 46: Comparativo dos valores DDSE para a solução 2 (caulim).

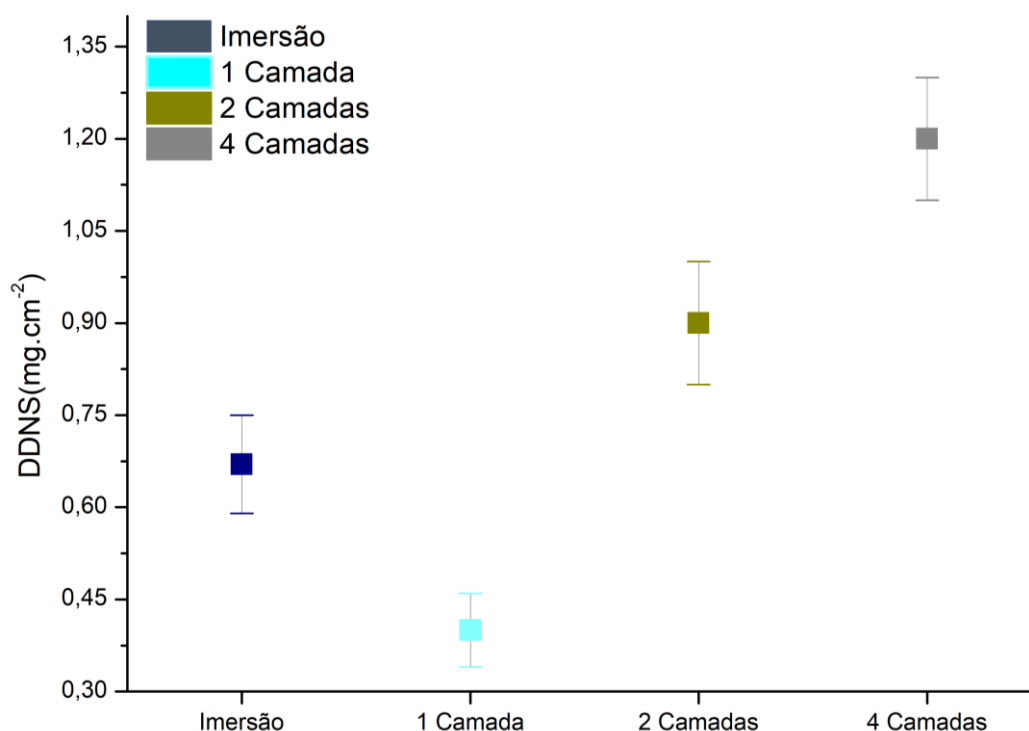


Fonte: o autor, 2022.

Com o resultado da figura 46, observa-se que, considerando a média e o desvio padrão dos diferentes métodos, a densidade de depósito de sal equivalente (DDSE) ficou próxima de 0,0022 mg.cm⁻² (exceto para o caso de 4 camadas). Este fato era esperado, pois não foi adicionado NaCl na solução. O resultado é importante, pois mostra que este valor de DDSE não se modifica de forma significativa com o método de aplicação da solução 2 e nem com a quantidade de camadas, isto é, a variação observada entre as aplicações não mudaria a faixa de intensidade de poluição no eixo da abscissa (eixo do DDSE). Sugere ainda que a DDSE depende apenas da solução e pouco da forma como é aplicada, exceto quando se excede o limite de 4 camadas.

Por sua vez, comparando a média e o desvio padrão das medições de DDNS presentes nas tabelas 10 a 13, pode-se expressar estes valores por meio do gráfico da figura 47.

Figura 47: Comparativo dos valores DDNS para a solução 2 (caulim).

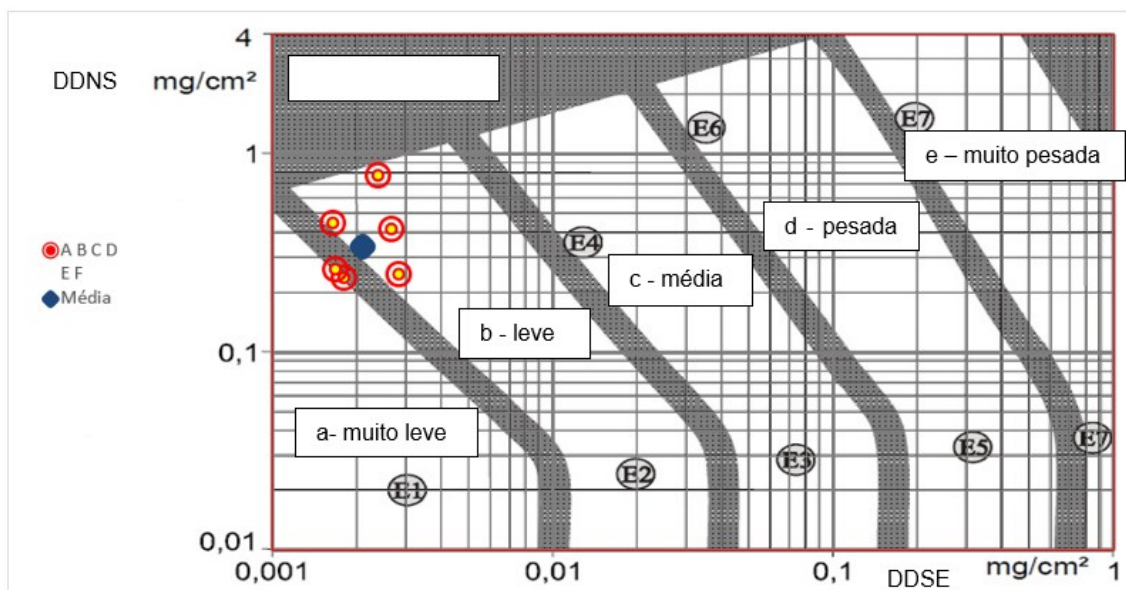


Fonte: o autor, 2022.

Considerando a figura 47 pode-se observar que a média para a imersão e para a aspersão com uma camada não apresenta mudanças significativas em densidade de depósito de não solúveis (DDNS). Além disso, considerando o método de aspersão, quando há um aumento maior do número de camadas, existe uma tendência de aumento de DDNS.

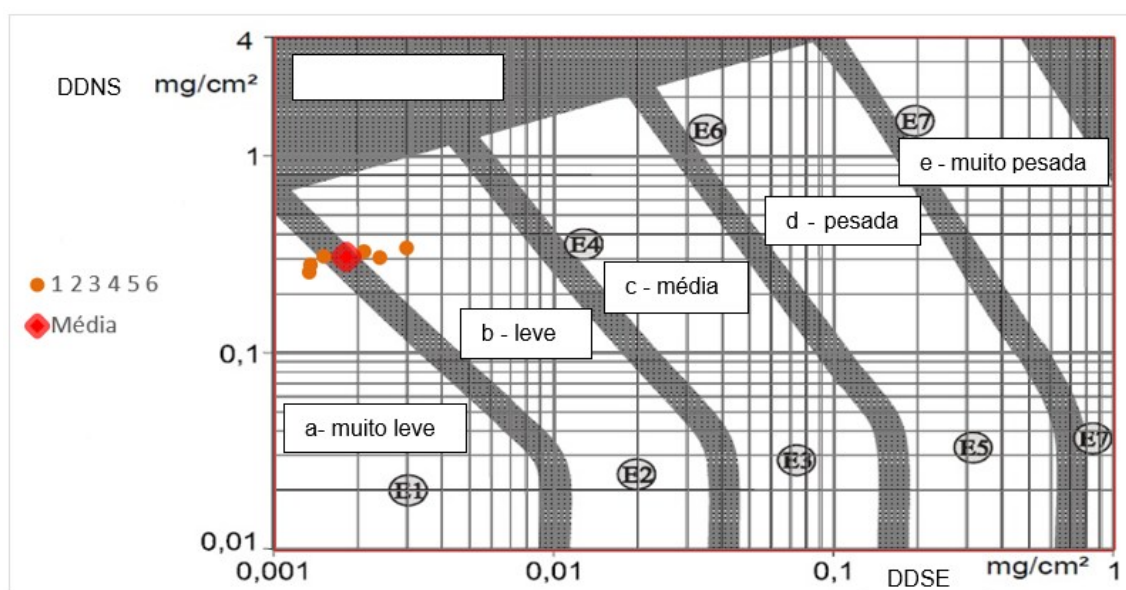
Ainda, tomando os valores apresentados de DDSE e DDNS presentes nas tabelas 10 a 13, a classificação da SPL pôde ser estimada, conforme apresentado nas figuras 48 a 50.

Figura 48: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por imersão utilizando a solução 2 (caulim).



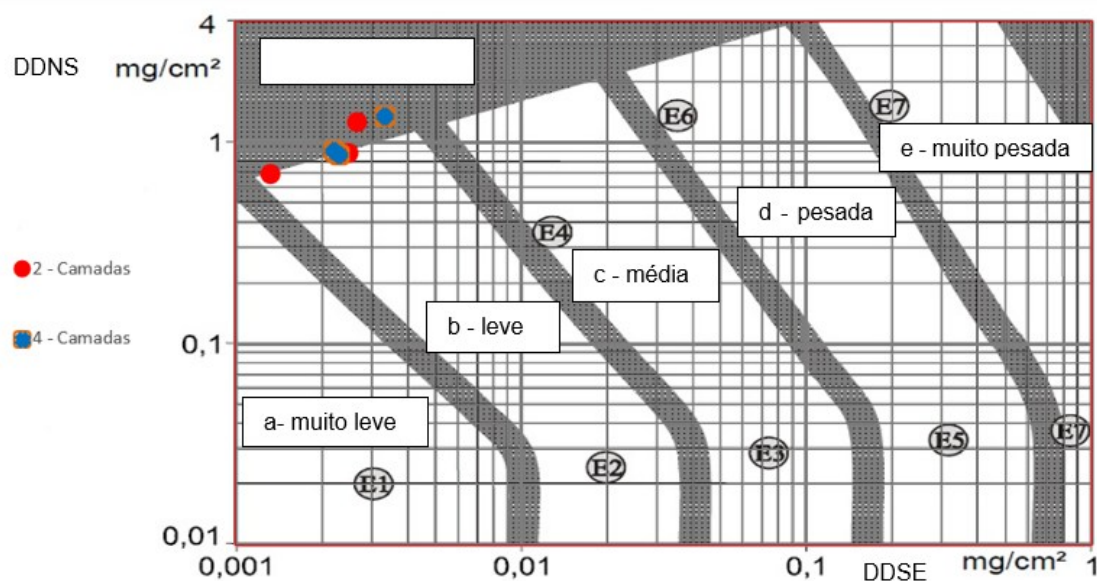
Fonte: o autor, 2022.

Figura 49: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por aspersão, com uma única camada, utilizando a solução 2 (caulim).



Fonte: o autor, 2022.

Figura 50: Classificação da SPL para o isolador poluído artificialmente por aspersão, com deposição de duas e quatro camadas, utilizando a solução 2 (caulim).



Fonte: o autor, 2022.

Para todos os casos (figuras 48 a 50), a poluição foi classificada com intensidade leve, como objetivado. A partir destes resultados e utilizando a metodologia desenvolvida, é possível poluir isoladores de outros tipos, que não sejam o isolador padrão (U-120), com poluição do tipo leve. Pelo fato dos isoladores de vidro e porcelana possuírem característica superficial hidrofílica, similar ao U-120, entende-se que a poluição irá aderir à superfície de forma equivalente.

3.2.4 Testes de soluções com adição de NaCl – variação do DDSE

Uma vez estabelecido que as soluções testadas remetiam ao nível de classificação leve, foram experimentadas variações nas soluções poluentes com adição de cloreto de sódio. Desta vez, com o objetivo de variar a intensidade de DDSE e preparar proporções específicas para a intensidade desejada (“Média”, “Pesada” e “Muito Pesada”). Neste desenvolvimento, foi utilizada apenas a base com terra diatomácea e dióxido de silício, como comentado anteriormente, por apresentar melhor uniformidade de camadas.

No desenvolvimento da poluição leve, foram obtidos valores DDNS próximos a $1,0 \text{ mg.cm}^{-2}$. Observando os gráficos de classificação, como o da Figura 50, pode-se constatar que o DDNS obtido transita entre todos os níveis de poluição, do leve ao muito pesado. Desta maneira, conclui-se que, para

aumentar os níveis de poluição, basta aumentar os valores de DDSE, isto é, arbitrar diferentes concentrações de sal. Assim, para produzir diferentes níveis de DDSE, pode-se adicionar sais ricos em íons, aumentando a condutividade do filme de poluição sobre o isolador. Para isso, foi utilizado NaCl (cloreto de sódio) de alto teor de pureza. As proporções de solução utilizadas estão apresentadas na tabela 14.

Tabela 14: Soluções de contaminação utilizadas para produção de poluições de nível pesado à muito pesado em 500 g de água.

Solução	Terra Diatomácea (g)	Dióxido de Silício (SiO ₂) (g)	Cloreto de Sódio (NaCl) (g)
1	50	5	16,6
2	50	5	33,0
3	50	5	50,0

Fonte: o autor, 2022.

As três primeiras soluções apresentadas na tabela 14 foram baseadas nas proporções utilizadas por Montoya (2004) e adaptadas para os testes. Na tabela 15 são apresentados os valores de DDSE e DDNS para as amostras de isoladores poluídas artificialmente utilizando as soluções 1 a 3.

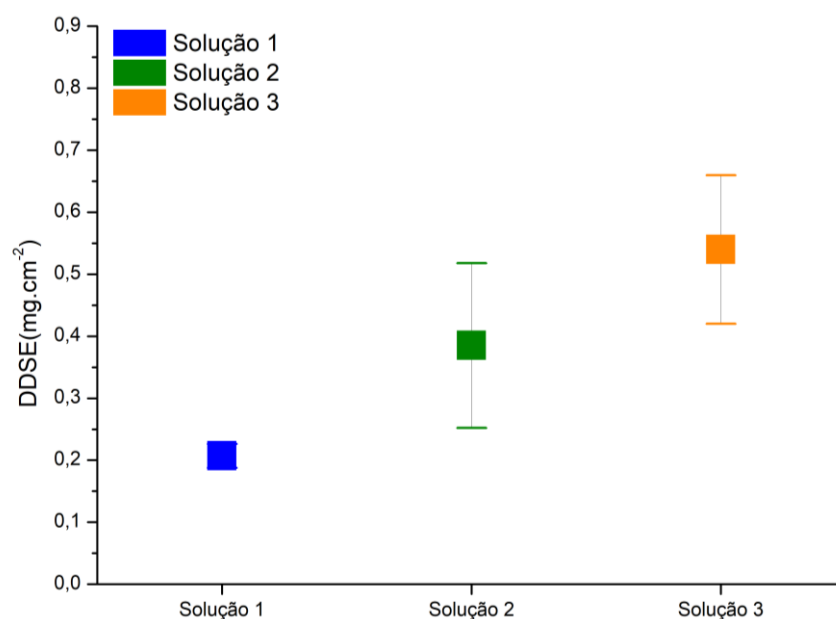
Tabela 15: Testes de poluição artificial com sais.

Teste de aplicação	Solução 1		Solução 2		Solução 3	
	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)
1	0,2356	1,2211	0,5494	0,1932	0,7039	1,3408
2	0,1988	0,9988	0,4356	0,9428	0,5543	0,7865
3	0,192	1,4346	0,287	1,1315	0,448	0,9135
4	0,202	0,6076	0,268	0,4970	0,453	0,7558
Média	0,207	1,07	0,39	0,69	0,54	0,95
Desvio Padrão	0,019	0,35	0,13	0,43	0,12	0,27

Fonte: o autor, 2022.

Para interpretar os resultados da tabela 15, destacam-se a média e o desvio padrão para os valores de DDSE por meio do gráfico da figura 51.

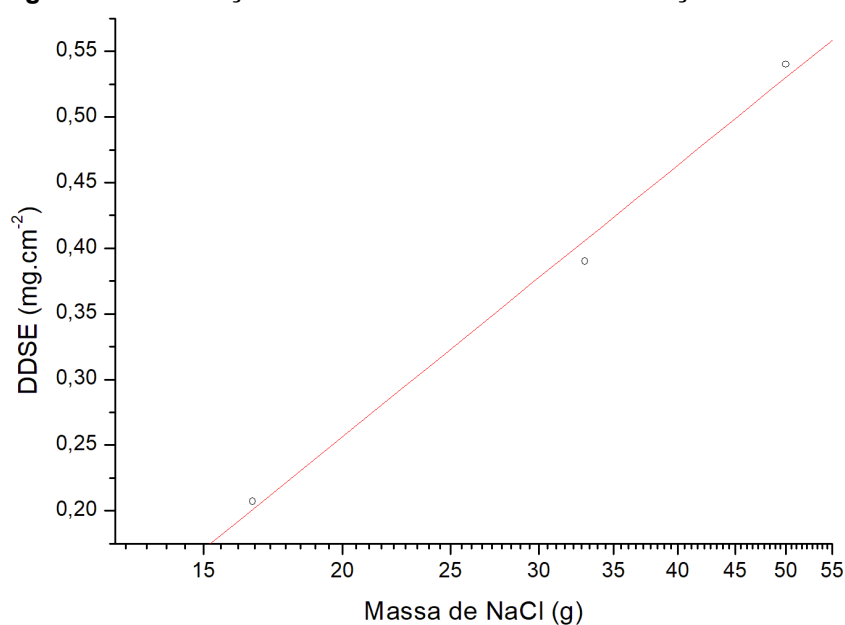
Figura 51: Comparativo dos valores DDSE para as soluções 1 a 3



Fonte: o autor, 2022.

Observando os dados apresentados na figura 51 e relacionando com a massa de NaCl apresentada na tabela 14, pode-se afirmar que existe uma correlação entre o aumento de NaCl em massa e o incremento de valores para a densidade de depósito de sal equivalente (DDSE). Para evidenciar e correlacionar estatisticamente foi realizado o gráfico da figura 52.

Figura 52: Correlação entre a massa de NaCl em solução e o DDSE



Fonte: o autor, 2022.

No gráfico da figura 52 foi também adicionada a informação acerca da correlação estatística entre a massa de NaCl e o DDSE, sendo esta representada pela linha em vermelho no gráfico. A equação (8) representa este ajuste realizado por meio do *software* Origin.

$$DDSE = -0,63745 + 0,68716 \cdot \log m_{NaCl} \quad (8)$$

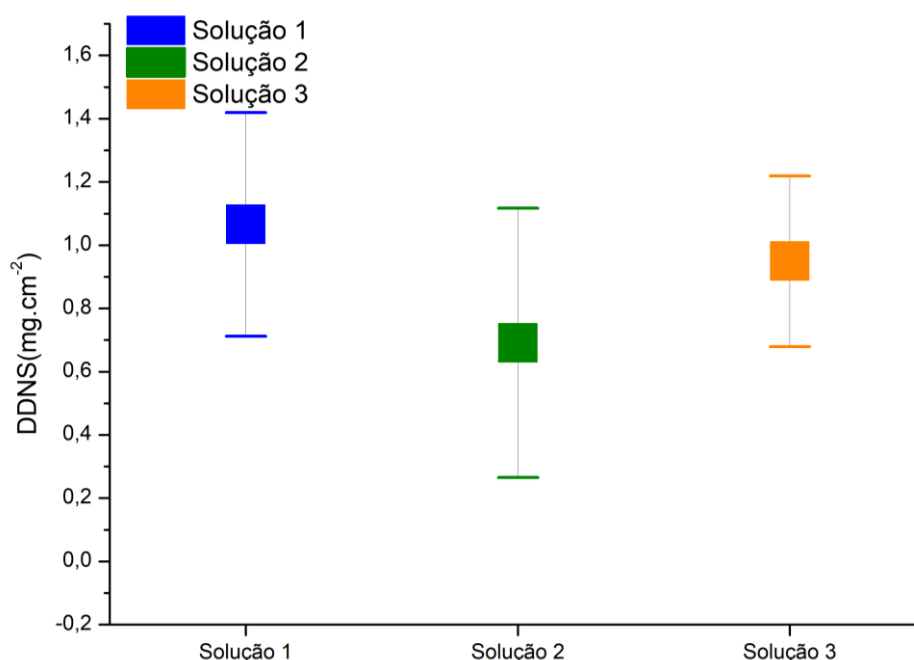
Onde:

m_{NaCl} é a massa de NaCl.

O coeficiente de correlação (R) apresentado é igual a 0,99646, o que estatisticamente representa um ajuste adequado para os pontos em questão. Assim, pode-se afirmar que o DDSE varia com o logaritmo da massa de sal adicionada. Vale salientar que a expressão da equação (8) traduz apenas a faixa de concentração salina abordada nos desenvolvimentos deste trabalho, para outros níveis de concentração salina poderá apresentar curva diferente da aqui demonstrada.

Por outro lado, comparando a média e o desvio padrão das medições de DDNS presentes na 15, tem-se o gráfico da figura 53.

Figura 53: Comparativo dos valores DDNS para as soluções 1 a 3



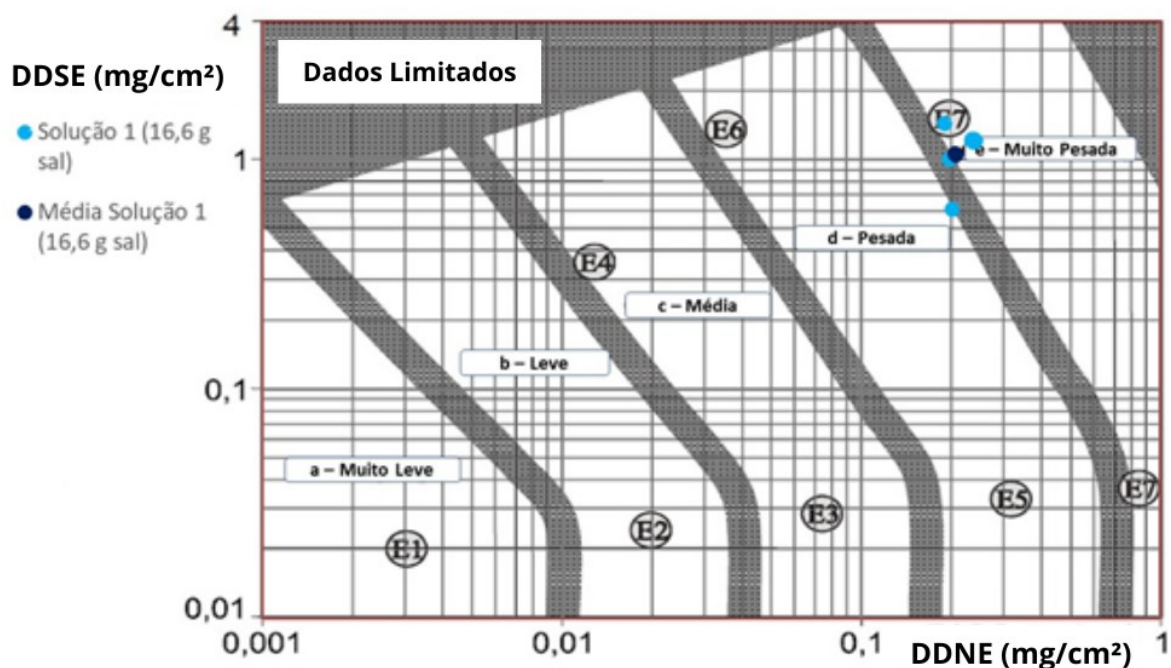
Fonte: o autor, 2022.

Embora existam flutuações nos valores, observando a figura 53, pode-se afirmar que, para as soluções de 1 a 3 o valor de DDNS ficou constante e em

torno de $1,0 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$, mesmo com uma dispersão bastante elevada, em conformidade com o desenvolvimento da etapa anterior.

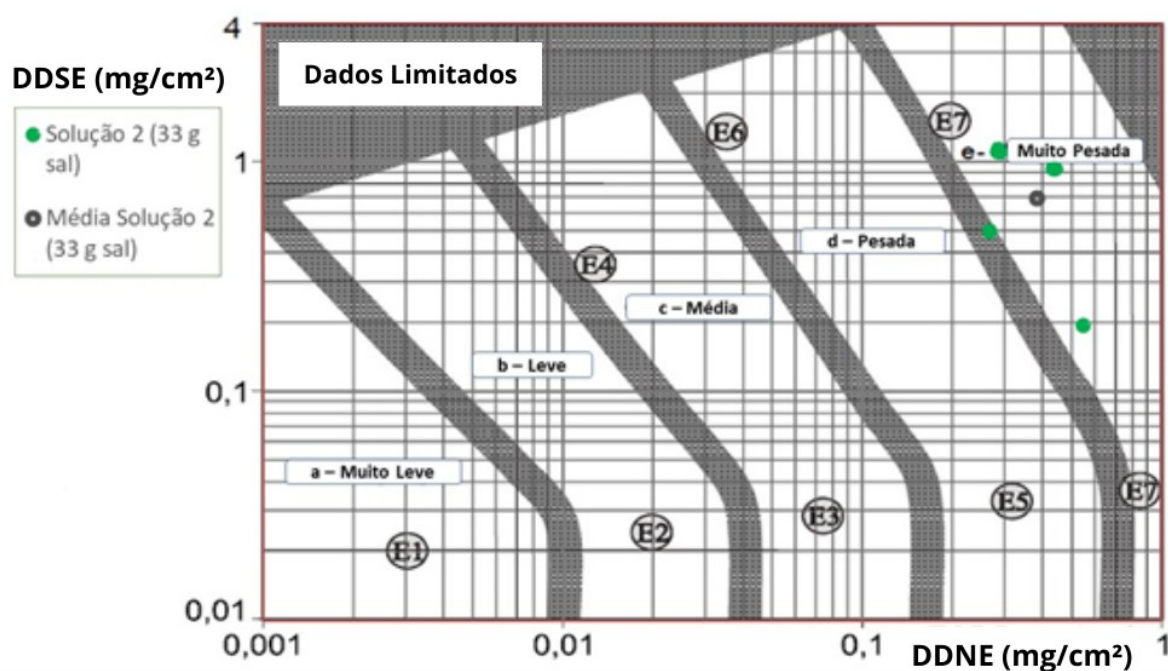
Ainda, tomando os valores apresentados de DDSE e DDNS presentes na tabela 15 pode-se estimar a classificação da severidade de poluição local (SPL), conforme apresentado nas figuras 54 a 56.

Figura 54: Classificação da SPL para o isolador poluído com a solução 1.



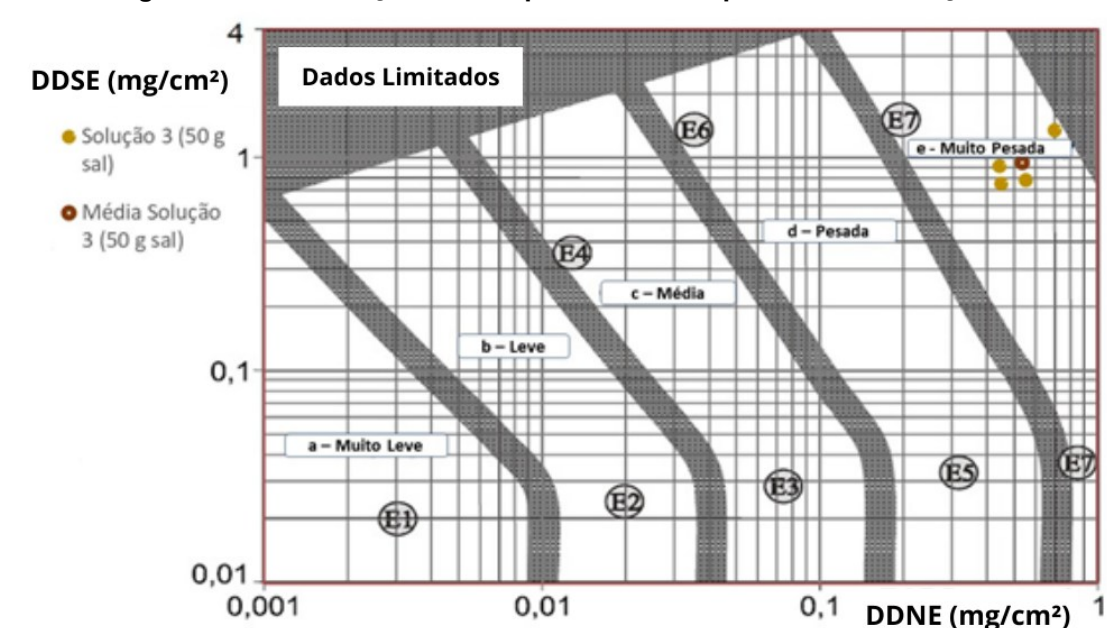
Fonte: o autor, 2022.

Figura 55: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 2.



Fonte: o autor, 2022.

Figura 56: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 3.



Fonte: o autor, 2022.

Para todos os casos (figuras 54 a 56), a poluição foi classificada como “Muito pesada”. A solução 1 ficou no limiar com a poluição nível “Pesado”, com pouca dispersão nos resultados. As soluções 2 e 3 obtiveram resultados com melhor posicionamento na faixa de poluição muito pesada, distribuídos na parte central da faixa de classificação. Pela distribuição apresentada, com menor dispersão, entende-se que a solução 3 é a mais adequada para este nível de poluição.

Seguindo o desenvolvimento para a reprodução do nível médio, foi utilizada uma proporção de sal 10 vezes menor que a quantidade utilizada para a produção da poluição “Muito pesada”. Isso foi feito com base na equação (8), na qual se apresenta uma proporção entre o DDSE e o logaritmo na base 10 da massa de NaCl. Isto significa que, ao dividir em fatores de 10, pode-se obter outra faixa de valores para o SPL. Logo, os valores para as soluções apresentados na Tabela 16 foram utilizados.

Tabela 16: Soluções de contaminação utilizadas para produção de poluições de nível médio para 500 g de água.

Solução	Terra Diatomácea (g)	Dióxido de Silício (SiO ₂) (g)	Cloreto de Sódio (NaCl) (g)
4	50	5	1
5	50	5	5

Fonte: o autor, 2022.

Na tabela 17 são apresentados os valores de DDSE e DDNS para as amostras de isoladores poluídas artificialmente utilizando a solução 4 e 5.

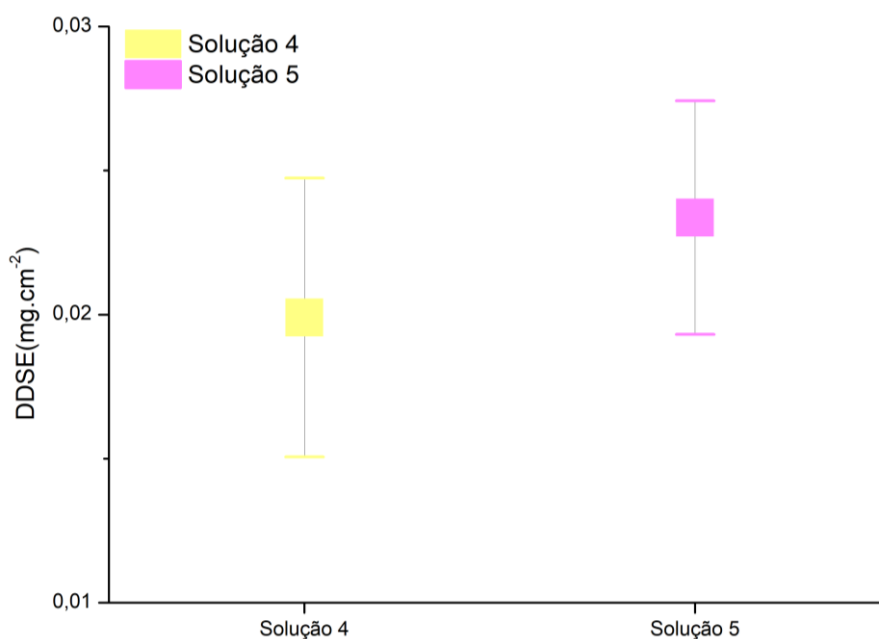
Tabela 17: Testes de poluição artificial para a solução 4.

Teste de aplicação	Solução 4		Solução 5	
	DDSE (mg.cm-2)	DDNS (mg.cm-2)	DDSE (mg.cm-2)	DDNS (mg.cm-2)
1	0,0154	0,7756	0,0219	0,9614
2	0,0140	0,8432	0,0193	0,8584
3	0,018	0,9016	0,0191	0,8285
4	0,024	0,9502	0,0239	0,9870
5	0,022	0,9524	0,029	1,1944
6	0,026	0,7272	0,027	1,1148
Média	0,0199	0,86	0,0234	0,99
Desvio Padrão	0,0048	0,09	0,0041	0,14

Fonte: o autor, 2022.

Para interpretar os resultados da tabela 17, pode-se observar a média e o desvio padrão para os valores de DDSE por meio do gráfico da Figura 57.

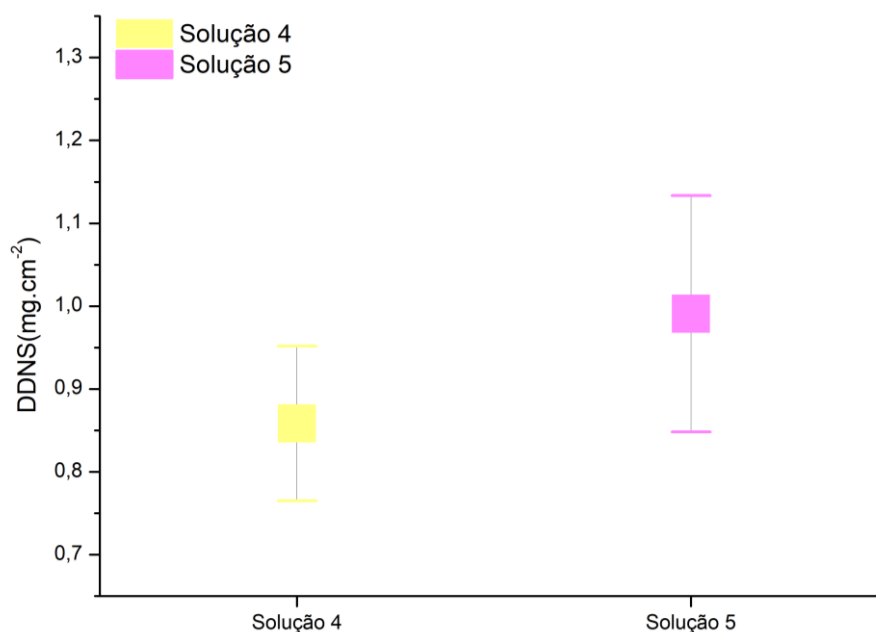
Figura 57: Comparativo dos valores DDSE para as soluções 4 a 5.



Fonte: o autor, 2022.

Por outro lado, comparando a média e o desvio padrão das medições de DDNS presentes na tabela 17, pode-se expressar estes valores por meio do gráfico da Figura 58.

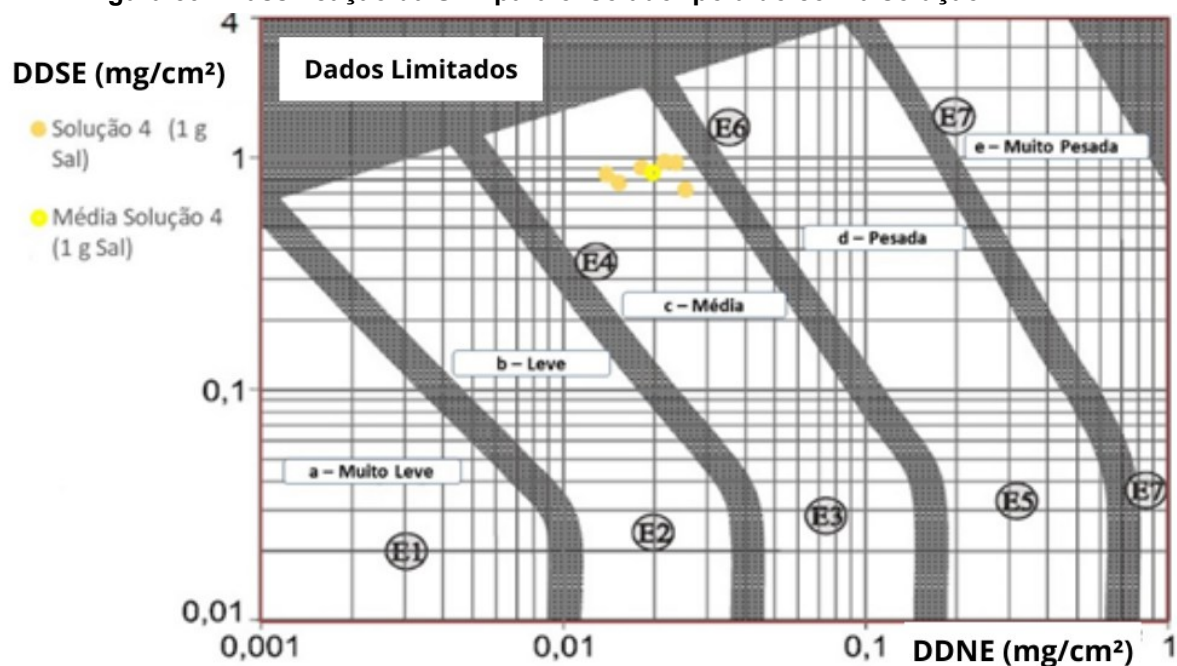
Figura 58: Comparativo dos valores DDNS para as soluções 4 a 5.



Fonte: o autor, 2022.

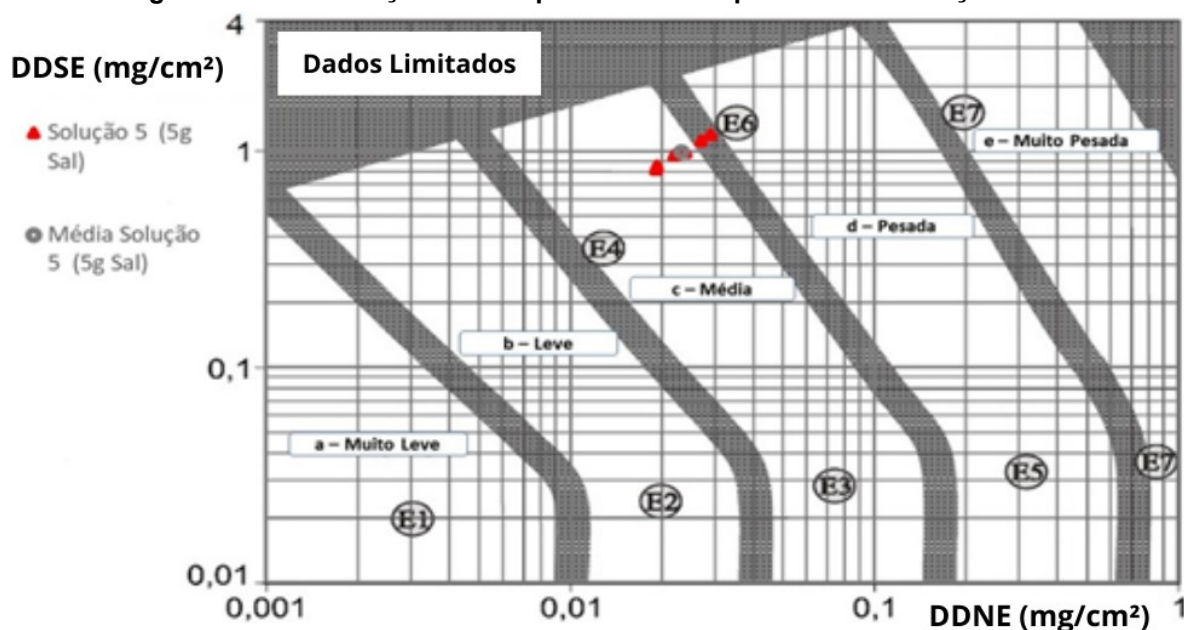
Ainda, tomando os valores apresentados de DDSE e DDNS presente na tabela 17, pode-se estimar a SPL, conforme apresentado nas figuras 59 a 60.

Figura 59: Classificação da SPL para o isolador poluído com a solução 4.



Fonte: o autor, 2022.

Figura 60: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 5.



Fonte: o autor, 2022.

Os testes das soluções 4 e 5 apresentaram nível de poluição “Médio”. A solução 4 obteve posição mais assertiva na faixa de classificação definida na norma ABNT IEC/TS 60815-1 (2014). Já a solução 5 apresentou maior dispersão, obtendo alguns valores muito próximos à faixa de transição para a poluição “Pesada”, como apresentado na Figura 60. Assim, a solução 4 foi definida como contaminante para os ensaios de poluição “Média”.

Por fim, foram conduzidos os testes para obtenção da solução de replicação do nível “Pesado”. Conforme sequência apresentada, os desenvolvimentos iniciaram pela intensidade Leve, foi então obtida a intensidade “Muito Pesada” e, por fim, a “Média”. Esta ordem vem da aplicação da interpolação aplicada a quantidade de NaCl utilizada nas soluções.

Foram necessárias as preparações de duas soluções contaminantes, mais uma vez utilizando a mesma base de formação: 100 g de terra diatomácea, 10 g de dióxido de silício em 1000 g de água deionizada. Onde, na solução 6 foram utilizados 7,5 g de NaCl e já na solução 7 foram utilizados 12,5 g de NaCl na composição, como na Tabela 16 é apresentado.

Entre as soluções 6 e 7, a que apresentou dispersão mais concentrada na faixa de poluição “Pesada”, por consequência a média mais bem posicionada, foi a solução 7, como destacado nos gráficos das Figura 63 e 64.

Tabela 18: Soluções de contaminação utilizadas para produção de poluições de nível pesado para 1000 g de água.

Solução	Terra Diatomácea (g)	Dióxido de Silício (SiO ₂) (g)	Cloreto de Sódio (NaCl) (g)
6	100	10	7,5
7	100	10	12,5

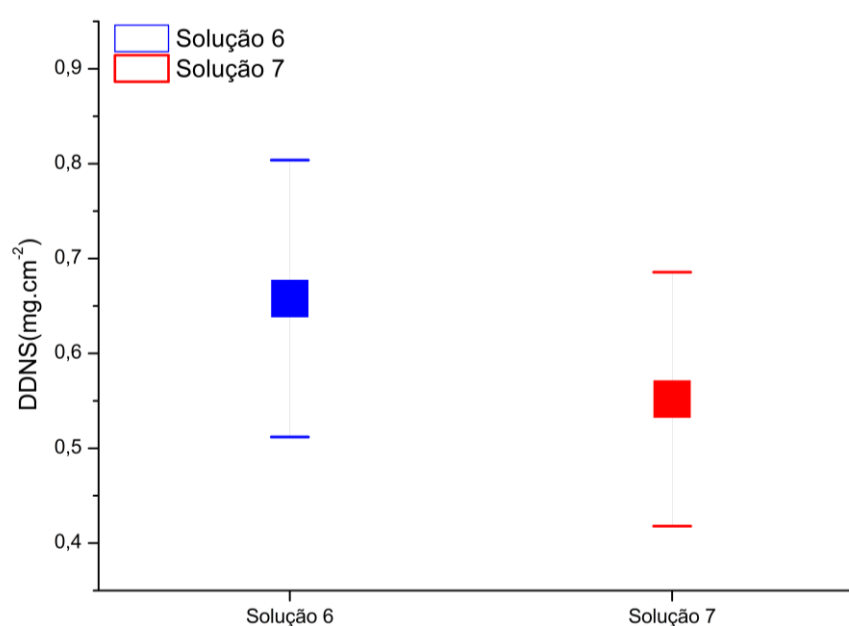
Fonte: o autor, 2022.

Tabela 19: Testes de poluição artificial para a soluções 6 e 7.

Teste de aplicação	Solução 6		Solução 7	
	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)	DDSE (mg.cm ⁻²)	DDNS (mg.cm ⁻²)
1	0,0345	0,7302	0,0892	0,7361
2	0,0371	0,5814	0,0762	0,6267
3	0,040	0,5852	0,0505	0,4128
4	0,035	0,4537	0,0480	0,3803
5	0,062	0,8657	0,060	0,5756
6	0,050	0,7305	0,062	0,5796
Média	0,0431	0,6578	0,0642	0,5518
Desvio Padrão	0,011	0,146	0,016	0,134

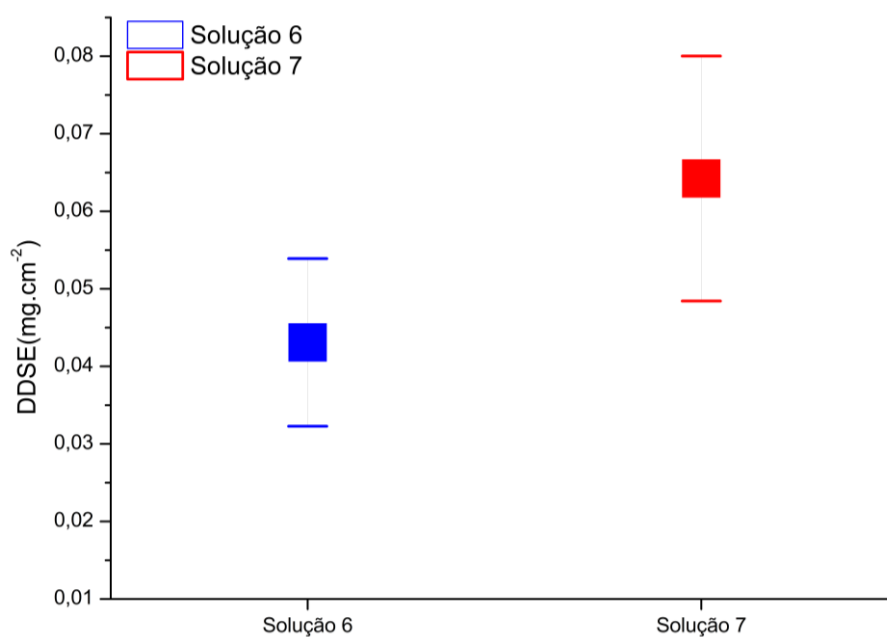
Fonte: o autor, 2022.

Figura 61: Comparativo dos valores DDNS para as soluções 6 a 7



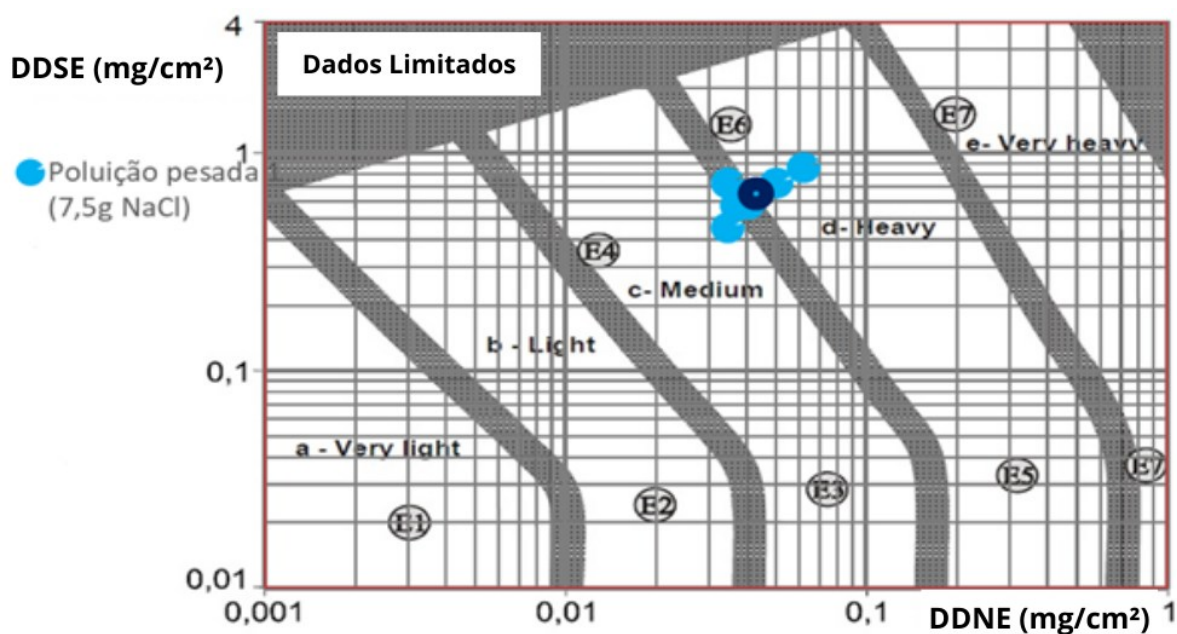
Fonte: o autor, 2022.

Figura 62: Comparativo dos valores DDSE para as soluções 6 a 7.



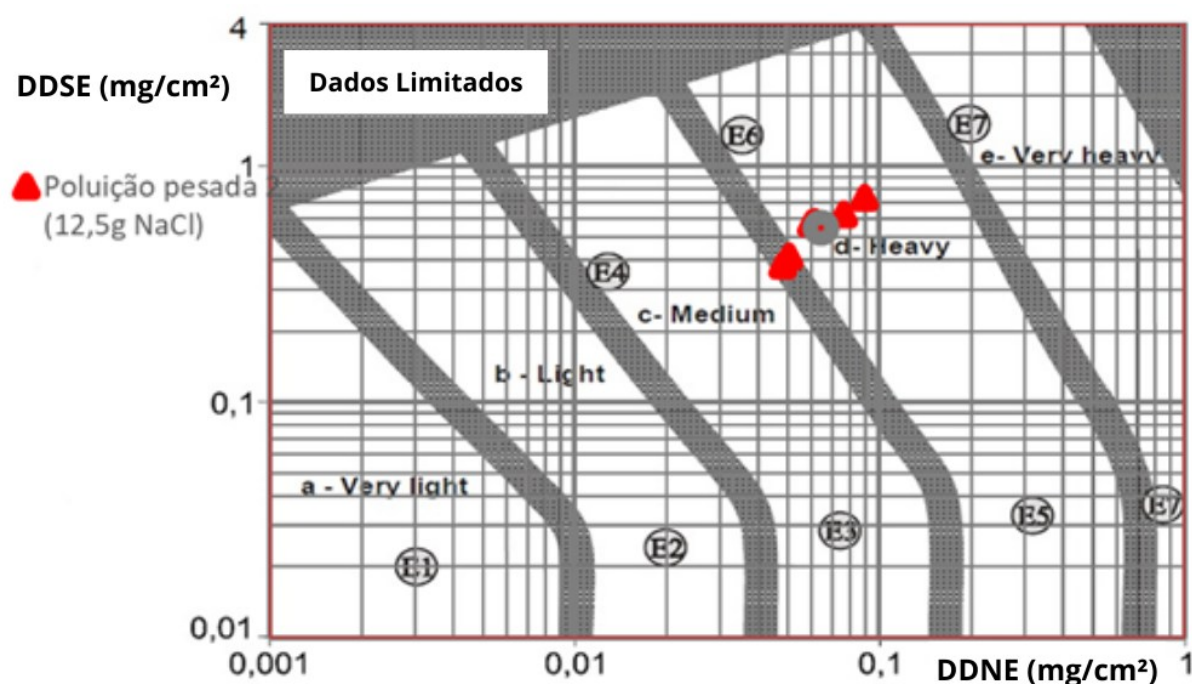
Fonte: o autor, 2022.

Figura 63: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 6.



Fonte: o autor, 2022.

Figura 64: Classificação da SPL para o isolador poluído com solução 7.



Fonte: o autor, 2022.

3.3 Caracterização elétrica da poluição

Nesta etapa, são apresentadas as metodologias experimentais para a obtenção do comportamento das características elétricas que a poluição pode alterar.

A primeira das técnicas utilizadas foi a espectroscopia de varredura em frequência, adaptada em substratos de vidro poluídos artificialmente. Em sequência, foram efetuadas as medições de resistividade superficial, diretamente em isoladores poluídos artificialmente, em diferentes condições de temperatura e umidade.

3.3.1 Espectroscopia de varredura: medição de impedância de corpos de prova poluídos

O primeiro estudo dos efeitos elétricos da poluição artificial foi a aplicação da técnica de espectroscopia de varredura. O objetivo da utilização desta técnica foi a caracterização elétrica da impedância dentro de uma faixa de frequência, incluindo a frequência industrial (50/60 Hz).

Para a execução do experimento, foram confeccionadas placas de vidro para funcionar como substrato. Nas placas de vidro, foram instalados 3 eletrodos, posicionados em apenas uma de suas superfícies, produzidos com lâminas de alumínio adesivas, como apresentado na figura 65 (a). A largura das placas foi padronizada em 30 mm, entre os eletrodos foram distanciados em 20 mm. Desta maneira, a área entre eletrodos foi definida em 20 mm x 30 mm, conforme apresentado na figura 65 (b). As placas foram identificadas numericamente, os eletrodos foram definidos e identificados como “A”, “B” e “C” e as medições foram efetuadas em pares, entre “AB” e “BC”.

Figura 65: Confeção de placas de vidro para medições de espectroscopia de varredura.

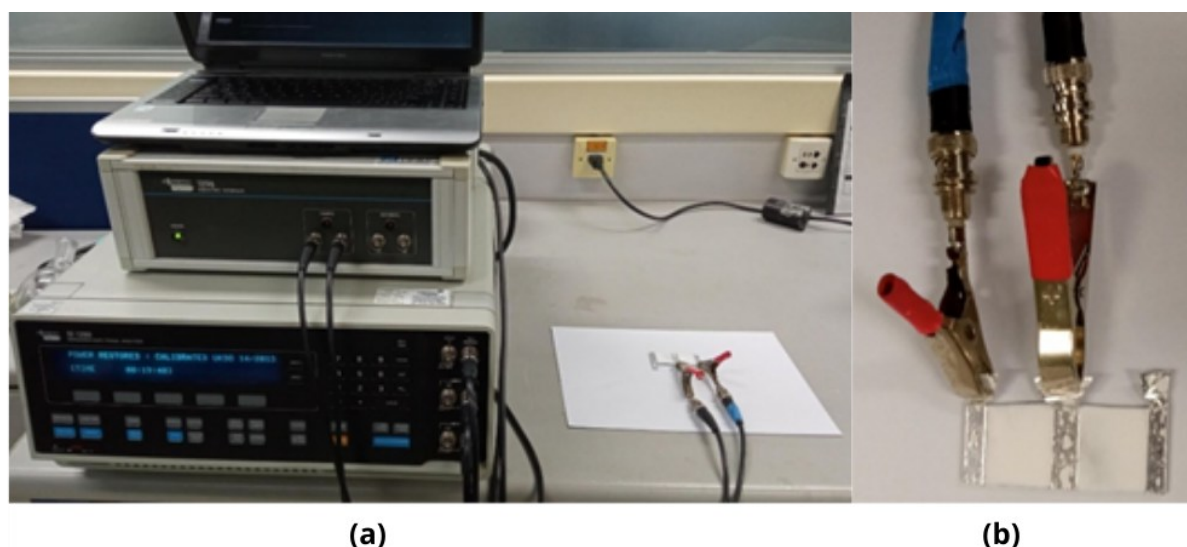


(a) destaque para o substrato já com os eletrodos; (b) Manufatura dos substratos.

Fonte: o autor, 2022.

A coleta de dados foi executada com o equipamento de análise de impedância marca Solartron e modelo 1260 - figura 66 (a). Esse equipamento tem a capacidade de realizar varreduras em frequência, medindo a resposta de diversos parâmetros elétricos a cada valor. Neste experimento, a magnitude da impedância e o ângulo de fase dos corpos de prova foram os objetivos das medições. Em tal avaliação, o equipamento foi ajustado com amplitude de 3 V, com a faixa de frequência de varredura abrangendo de 1 Hz até 1 MHz. O processo de medição de cada uma das placas é exemplificado pela figura 66 (b).

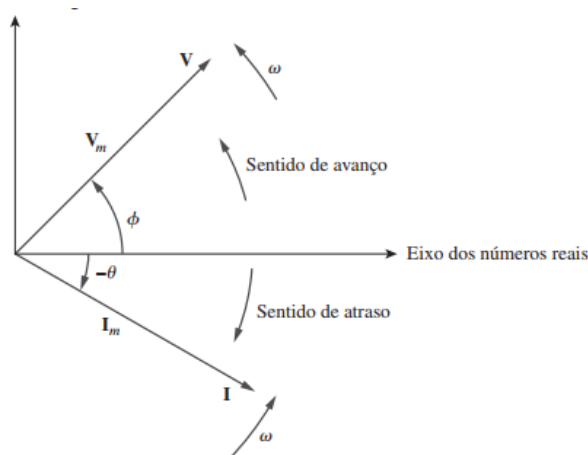
Figura 66: Analisador de impedância marca Solartron (a) e processo de leituras em placas de vidro (b).



Fonte: o autor, 2022.

A impedância é a oposição de um circuito ao fluxo de uma corrente elétrica, definida por um valor complexo, ou seja, apresenta uma componente real (Z') e uma componente imaginária (Z''), podendo ser analisada por meio de fasores (EDMINISTER *et al.*, 2014).

Figura 67: Diagrama fasorial da impedância elétrica.



Fonte: Extraído de (SADIKU; ALEXANDER, 2021)

Define-se que, quando a componente imaginária é negativa ($-Z''$), temos uma impedância capacitiva. No caso oposto ($+Z''$), trata-se de uma impedância indutiva. Os seus respectivos efeitos fasoriais podem ser observados na Figura 67. Em efeitos práticos, temos que a impedância capacitiva causa um adiantamento da corrente em relação à tensão, enquanto o indutor a atrasa (SADIKU; ALEXANDER, 2021).

Onde:

$$\begin{aligned} Z' &= |Z| \cdot \cos(\phi) \\ Z'' &= |Z| \cdot \sin(\phi) \end{aligned} \quad (9)$$

Como indicado anteriormente, utilizando-se do equipamento Solartron, foram realizadas a medição da impedância total ($|Z|$) e ângulo de fase (Φ).

3.3.1.1 Estimativa teórica da capacitância das placas de vidro.

Como a espessura dos eletrodos é muito menor que sua própria largura, a capacitância (Cap) pode ser calculada com a equação (10).

$$Cap = \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot l_e}{\ln\left(\frac{2d_e}{c} + 1\right)} \quad (10)$$

onde " l_e " e " c " são, respectivamente, o comprimento e largura dos eletrodos de alumínio e " d_e " à distância entre tais eletrodos.

A permissividade absoluta do material (ε) é definida pela equação (11):

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (11)$$

sendo definida a partir do produto entre " ε_r ", que é a permissividade relativa do material e " ε_0 ", que é a permissividade relativa do vácuo, um valor constante ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$).

Considerando as equações (10) e (11), nota-se que a capacitância é diretamente proporcional à permissividade relativa do material, indicando dependência da capacitância com fenômenos de polarização e, consequentemente, dependente das características do material dielétrico. Os valores comuns para permissividade relativa dos materiais são encontrados na literatura e apresentados na tabela 20.

Tabela 20: Valores de permissividade relativa de materiais comuns.

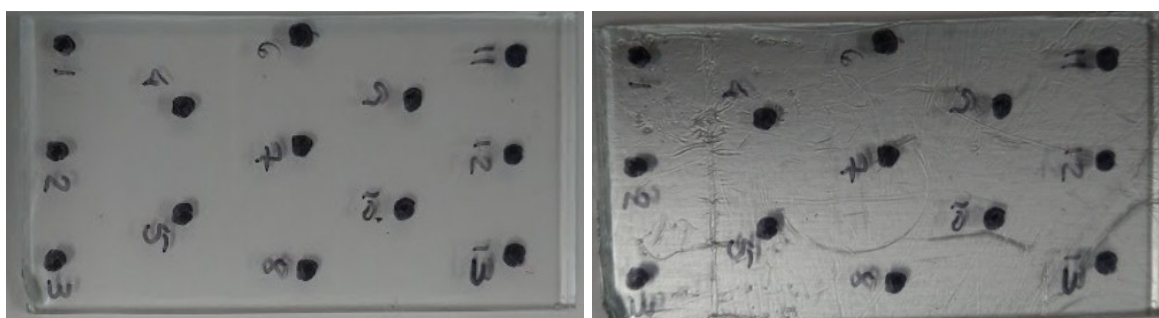
Material	Permissividade relativa (ε_r)	Material	Permissividade relativa (ε_r)
Vácuo	1	Porcelana	6 - 8
Ar	1,0006	Vidro	3 - 7
Polietileno	2,3	Água destilada	81
Terreno Arenoso	4		

Fonte: Adaptado de (NUSSENZVEIG, 2022; QUEVEDO, 1993)

Uma vez montados os corpos de prova, houve a necessidade de se calcular o capacitor equivalente formado pelos eletrodos, o ar e o substrato de vidro em condições normais, ou seja, limpo antes da aplicação da poluição artificial. Para tal, foi medida a espessura da fita de alumínio com auxílio de um micrômetro Mitutoyo modelo NO293.80123.

A medição da fita foi realizada de forma indireta. Por meio de 13 pontos, primeiro foi medida a espessura apenas do substrato de vidro (Figura 88 – a), e uma nova medição foi efetuada nos mesmos pontos após a aplicação da fita (Figura 88 – b). Como resultado foi obtido o valor médio de 0,059 mm de espessura, na Tabela 21 são apresentados os valores das medições.

Figura 68: Corpo de Prova preparado para medição (esquerda: sem fita; direita: com fita)



(a)

(b)

Fonte: o autor, 2022.

Figura 69: Processo de medição da lâmina de alumínio, com micrómetro.



Fonte: o autor, 2022.

Tabela 21: Parâmetros dos corpos de prova: espessuras do substrato e do eletrodo.

Ponto	Material	Medida (mm)	Material	Medida (mm)	Material	Medida (mm)	Média (mm)
1	Vidro	2,877	Vidro + Fita	2,932	Fita	0,055	0,059
2	Vidro	2,878	Vidro + Fita	2,931	Fita	0,053	
3	Vidro	2,876	Vidro + Fita	2,934	Fita	0,058	
4	Vidro	2,877	Vidro + Fita	2,938	Fita	0,061	
5	Vidro	2,877	Vidro + Fita	2,932	Fita	0,055	
6	Vidro	2,879	Vidro + Fita	2,936	Fita	0,057	
7	Vidro	2,881	Vidro + Fita	2,939	Fita	0,058	
continua							
continuação							
8	Vidro	2,876	Vidro + Fita	2,935	Fita	0,059	
9	Vidro	2,877	Vidro + Fita	2,937	Fita	0,060	
10	Vidro	2,869	Vidro + Fita	2,937	Fita	0,068	
11	Vidro	2,876	Vidro + Fita	2,934	Fita	0,058	
12	Vidro	2,875	Vidro + Fita	2,934	Fita	0,059	
13	Vidro	2,874	Vidro + Fita	2,935	Fita	0,061	

Fonte: o autor, 2022.

Calculando-se a capacitância por meio da equação (10), obtém-se o valor aproximado de $3,8 \times 10^{-13}$ F. Assim sendo, a parte de armazenamento da célula foi assumida, neste momento, na ordem de grandeza de 10^{-13} F.

De maneira geral, um capacitor, quando exposto a uma tensão variante no tempo a uma dada frequência (f), pode ter seu comportamento simplificado por meio da analogia de um resistor variável dependente da frequência. Essa resistência se nomeia de reatância capacitiva (X_c). Quanto maior a frequência, menor sua reatância, sendo sua maior magnitude possível em corrente contínua, isto é, com frequência de valor zero (SADIKU; ALEXANDER, 2021). A reatância capacitiva é expressa pela equação (12).

$$X_c = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \quad (12)$$

Desta maneira, a reatância capacitiva para o corpo de prova do experimento é da ordem de 10^{14} , na frequência de 60 Hz.

A deposição de um filme de poluição, como apresentado por Mello e por Portella (2017; 2008), altera a característica do dielétrico desse capacitor, isto é, altera a resposta em frequência, no que tange à magnitude e ao ângulo de fase. A avaliação da variação destes parâmetros permite a análise comparativa entre as placas limpas e poluídas artificialmente.

Com a aplicação da poluição, há a inserção de mais elementos no conjunto e, por isso, se faz necessária a adoção de uma analogia de circuito mais complexo, onde componentes dissipativos e de armazenamento interagem formando uma impedância complexa. Diferentes modelos de circuitos equivalentes podem ser utilizados para modelar os resultados obtidos, tais como: resistência e capacitância em série; resistência e capacitância em paralelo; resistência e capacitância em combinação mista (em série e paralelo), como o modelo utilizado por Rahul (2018). Cada um destes modelos, conforme apresentado anteriormente, tem uma curva característica em frequência e pode ser utilizado para entender como deverá ser o comportamento da amostra em estudo.

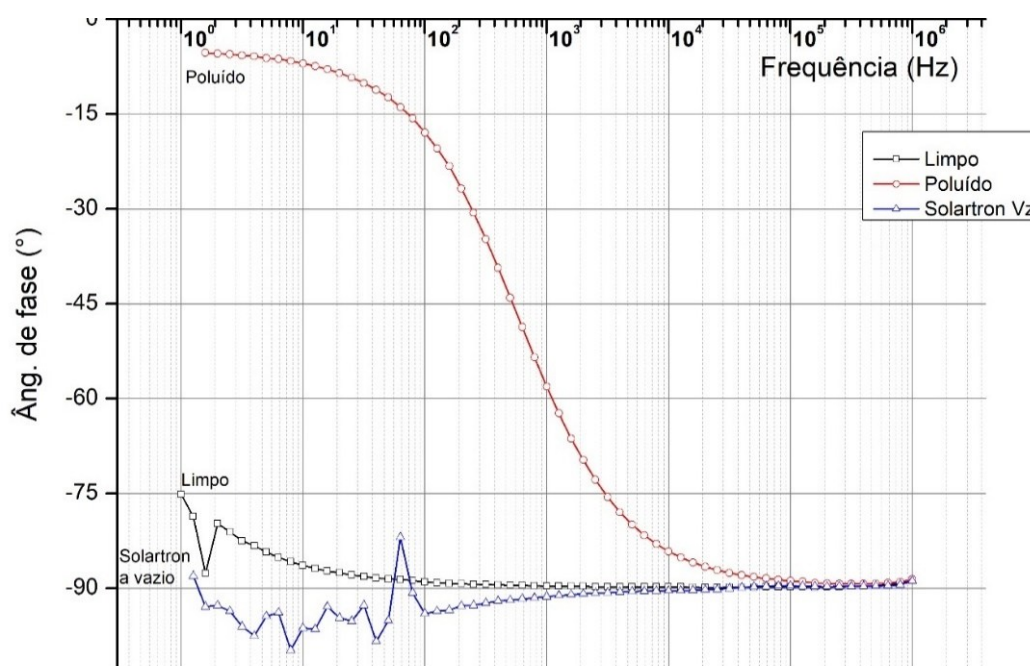
Além disso, é conhecido que a mudança de umidade em um meio dielétrico pode alterar a medida de impedância em algumas ordens de grandeza, constituindo, desta maneira, uma margem para flutuações deste valor calculado (TARÉIEV, 1978).

3.3.1.2 Validação da técnica de varredura

Para validar a técnica proposta, foi necessário executar uma série de leituras iniciais, sendo elas: 1) medição a vazio - com o Solartron com as pontas de provas e cabos, apenas posicionadas à mesma distância que a amostra, mas sem a amostra; 2) medição de uma placa limpa.

A leitura a vazio foi utilizada com o intuito de evidenciar os comportamentos do próprio equipamento, isto é, garantir que as leituras nas placas estão dentro da capacidade de medição de tal equipamento. Por sua vez, a leitura com a placa sem poluição buscou validar o cálculo do capacitor equivalente, apresentado anteriormente, bem como fornecer uma curva de referência para ser utilizada posteriormente de forma comparativa. Os resultados destas medidas são apresentados nas figuras 70 e 71.

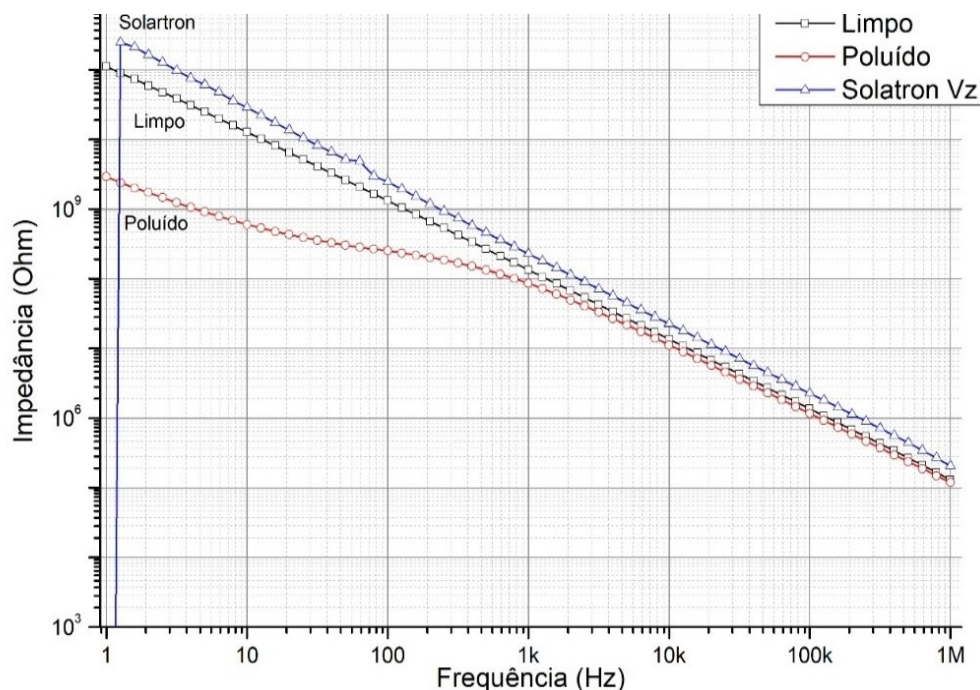
Figura 70: Resposta em frequência do ângulo de fase - Solartron a vazio, vidro limpo e vidro poluído (poluição leve).



Fonte: o autor, 2022.

Analisando as leituras de ângulo de fase, apresentadas na figura 70, é possível comparar as três curvas. Para o Solartron a vazio, em valores entre 1 Hz e 10² Hz, o valor medido fica instável, indicando uma medida de ângulo de fase fora da faixa de precisão do equipamento. Isso indica que, sem a amostra, o equipamento encontra um sinal distorcido de corrente elétrica para medição de tal maneira que não consegue medir precisamente o ângulo de fase. Quando adicionada a amostra (placa limpa), isso não ocorre, sendo possível medir o resultado por todo o espectro de varredura. Inclusive, o sinal fica em proximidade do valor de -90° para seu ângulo de fase, comportamento aproximado e esperado de um capacitor ideal. A curva da placa poluída, por sua vez, apresenta comportamento capacitivo em frequências maiores que 10⁴ Hz e tendência ao comportamento resistivo em frequências mais baixas.

Figura 71: Resposta em frequência do módulo da impedância - Solartron a Vazio, vidro limpo e vidro poluído (poluição leve).



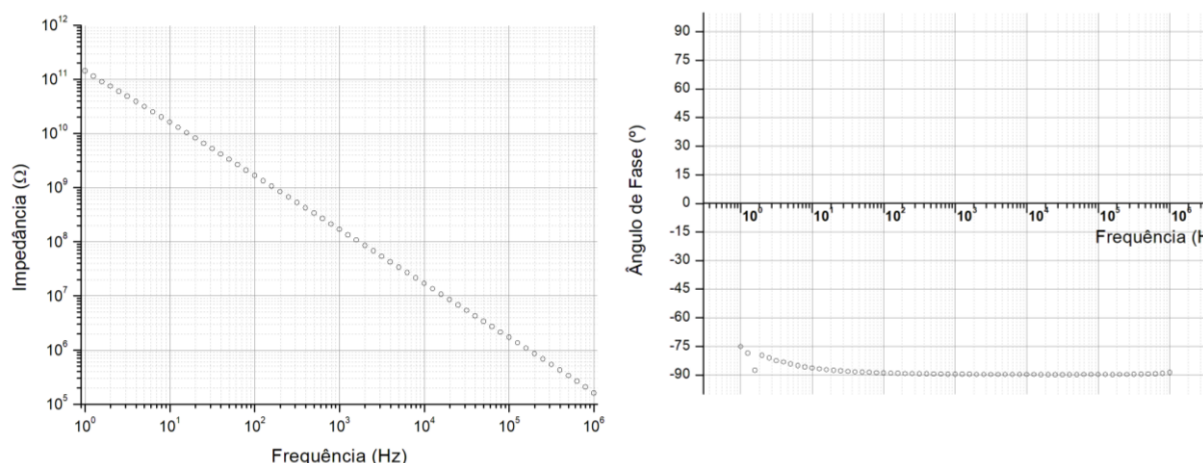
Fonte: o autor, 2022.

As curvas de impedância, presentes na figura 71, indicam valores maiores de impedância para a medida em vazio e valores menores para a placa limpa e poluída. Para a placa limpa, é observada uma curva linear, de elevada impedância, na ordem de 10^{12} em 1 Hz. Destaca-se que o valor encontrado é coerente com o previsto em cálculo, e variações de resultado são possivelmente causadas por interferências oriundas de interações com a umidade do ar, a película de cola entre os eletrodos e o substrato ou o próprio substrato de vidro, entre outros agentes externos não considerados no cálculo.

3.3.1.3 Caracterização dos corpos de prova: limpos

A caracterização do comportamento das placas limpas, sem a presença de poluentes ou produtos de limpeza, foi realizada utilizando 5 placas e efetuando em cada uma delas medições entre os pares de eletrodos “AB” e “BC”.

Figura 72: Caracterização do comportamento das placas limpas por espectrometria de impedância (esquerda - impedância total; direita - ângulo de fase).



Fonte: o autor, 2022.

A analogia com um capacitor, mencionada anteriormente, foi novamente reforçada pela variação negativa do ângulo de fase, conforme mostra a

figura 72. Ao efetuar a medição nos corpos de prova, o ângulo de fase médio entre as leituras “AB” e “BC” foi de $-75,09^\circ$ a 1 Hz, chegando até $-88,73^\circ$ a 1 MHz. Conforme mencionado anteriormente, um capacitor ideal apresenta defasagens de -90° graus.

Destaca-se ainda, pela observação da

figura 72, que o comportamento do material constituinte da amostra é similar ao de um material isolante ideal por apresentar componente predominantemente de armazenamento e valor de impedância elevado.

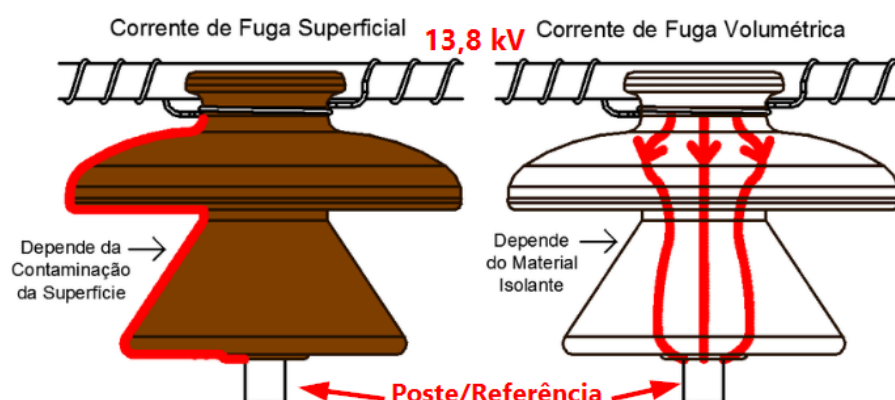
Assim, o intuito é observar qual a alteração elétrica que a poluição promove em diferentes faixas de frequência, tendo como objetivo buscar, no domínio da frequência, quais são as melhores faixas de caracterização de diferentes índices de poluição.

3.3.2 Resistividade superficial: medições sob variação de temperatura e variação de umidade

A corrente de fuga que flui por um dielétrico, quando submetida a um campo elétrico, é formada por duas componentes, a volumétrica e a superficial. A corrente volumétrica está relacionada com a natureza do material, sua forma e até imperfeições, sendo fruto da concentração e mobilidade iônica do próprio

material (STEFENON, 2015). Sua característica elétrica é capacitiva, em frequência industrial (50/60 Hz) é pouco expressiva. Por outro lado, há a corrente superficial que se relaciona com os efeitos do ambiente, ou como Arcanjo (2017) define, é a resposta dada pelo estado de limpeza do isolador. A corrente superficial é dominante em superfícies eletricamente disponíveis. Este conceito é demonstrado pela Figura 73, onde as duas componentes da corrente de fuga são evidenciadas.

Figura 73: Corrente de fuga em isoladores de potência.



Fonte: Adaptado de (STEFENON, 2015).

Assim, avaliar a resistividade superficial de um isolador pode auxiliar a predição de seu estado de limpeza e, por consequência, a sua capacidade de isolamento.

O experimento foi realizado com o auxílio de uma câmara climática, da fabricante ESPEC, modelo PSL-4KPH, conforme mostra a Figura 74. Este equipamento tem um sistema de controle que permite, entre outras funções, definir padrões de umidade e temperatura e variações conforme a programação desejada. As principais características do modelo são resumidas na Tabela 22.

Tabela 22: Câmara Climática ESPEC – Características Principais

Modelo	Temperatura	Umidade	Capacidade Interna
PSL Type 4 - Câmara de temperatura ultrabaixa e umidade	-70 até +150 °C	20 a 98%	800 litros

Fonte: Adaptado de (ESPEC, 2023).

Figura 74: Câmara Climática ESPEC.



Fonte: o autor, 2022.

As medições de resistividade superficial foram efetuadas com os isoladores inseridos na câmara climática e ligados, cada um, a um equipamento de medição de resistividade superficial. Na Figura 75 é apresentada uma das rodadas de medição.

Inicialmente, foram efetuadas medições de calibração, feitas com espécimes exclusivos para o experimento. Nesta etapa, os valores de resistividade medidos para os isoladores limpos se situavam na faixa de $10^{11}\Omega$.

Figura 75: Setup de ensaio na câmara climática.



Fonte: o autor, 2022.

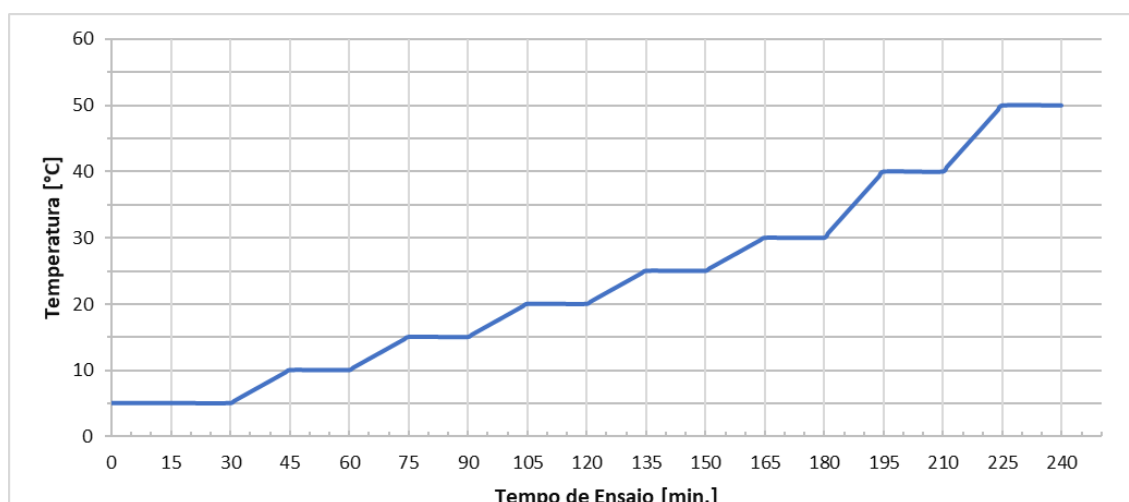
3.3.2.1 Metodologia de Ensaio

- a) Foi preparado um experimento, em duas etapas, a fim de relacionar os efeitos do ambiente em isoladores poluídos, sendo:
- b) Medição da resistividade superficial sob umidade constante com variação da temperatura ambiente.
- c) Medição da resistividade superficial sob temperatura constante com variação da umidade relativa do ar.

As medições com temperatura variável foram feitas sob condição de 75% U.R.. O parâmetro de umidade relativa estabelecido para o ensaio foi optado a partir da média de umidade para o litoral brasileiro, onde é possível encontrar poluições que combinam características dos tipos A e B. Junior e Müller (2018) indicam que a umidade relativa para estas localidades varia de 70% a 80% e, desta maneira, optou-se pelo valor médio (75%).

A programação da câmara climática foi ajustada para efetuar variações em degrau de 5°C em 5°C graus, para a faixa de temperatura entre 5°C e 30°C, e degrau de 10°C para a faixa de 30°C à 50°C. Para proporcionar equilíbrio térmico e de umidade nos corpos de prova, cada patamar de temperatura foi mantido por 15 minutos antes de executar as medições. As rampas de aquecimento também foram ajustadas para 15 minutos, conforme Figura 76.

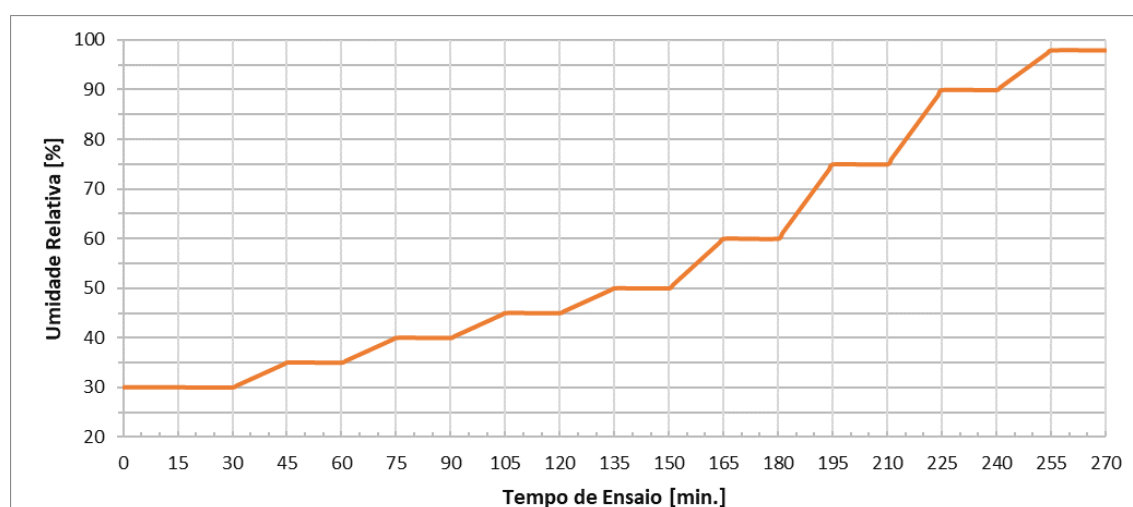
Figura 76: Metodologia de ensaio com temperatura variável - rampa de temperatura.



Fonte: o autor, 2022.

A segunda metodologia de ensaio utilizou a condição de temperatura ambiente fixa, com variação da U.R. O ajuste da câmara climática foi para a realização de intervalos de 5% de umidade, para a faixa de 30% a 50%, uma variação de 10%, para a faixa entre 50% e 60%, e incrementos de 15% até se atingir a capacidade máxima da câmara, entre 95% e 98% de U.R. Conforme aplicado no ensaio anterior, foi utilizado o processo de rampa para a variação da umidade, a fim de uniformizar a condição em todo o ambiente de teste. Este ajuste é apresentado pela Figura 77.

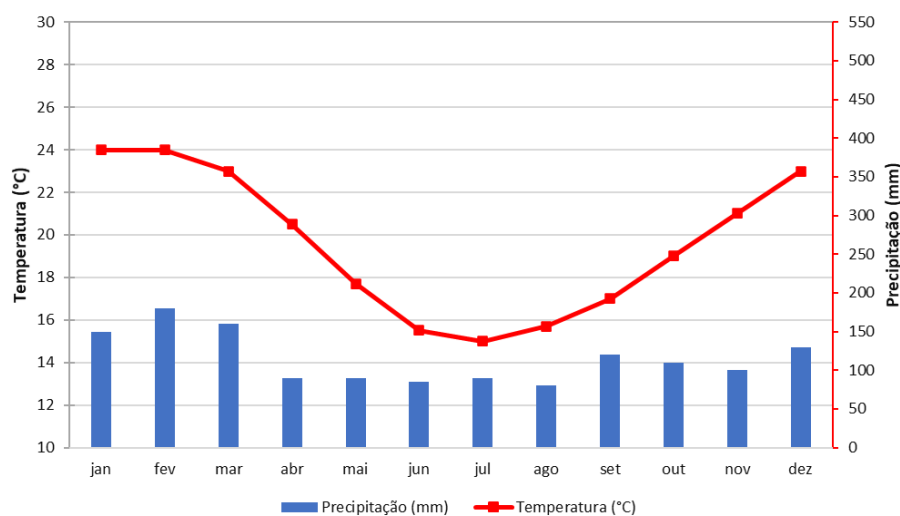
Figura 77: Metodologia de ensaio com umidade variável - rampa de umidade.



Fonte: o autor, 2022.

Os valores arbitrados para as rampas, isto é, valores mínimos e máximos empregados nos ajustes, foram definidos a partir das temperaturas médias mensais encontradas no clima do litoral sul e sudeste brasileiro, compreendido entre 15°C e 28°C, como demonstrado por (RODRIGUES; BULHÕES, 2017) no gráfico da Figura 78.

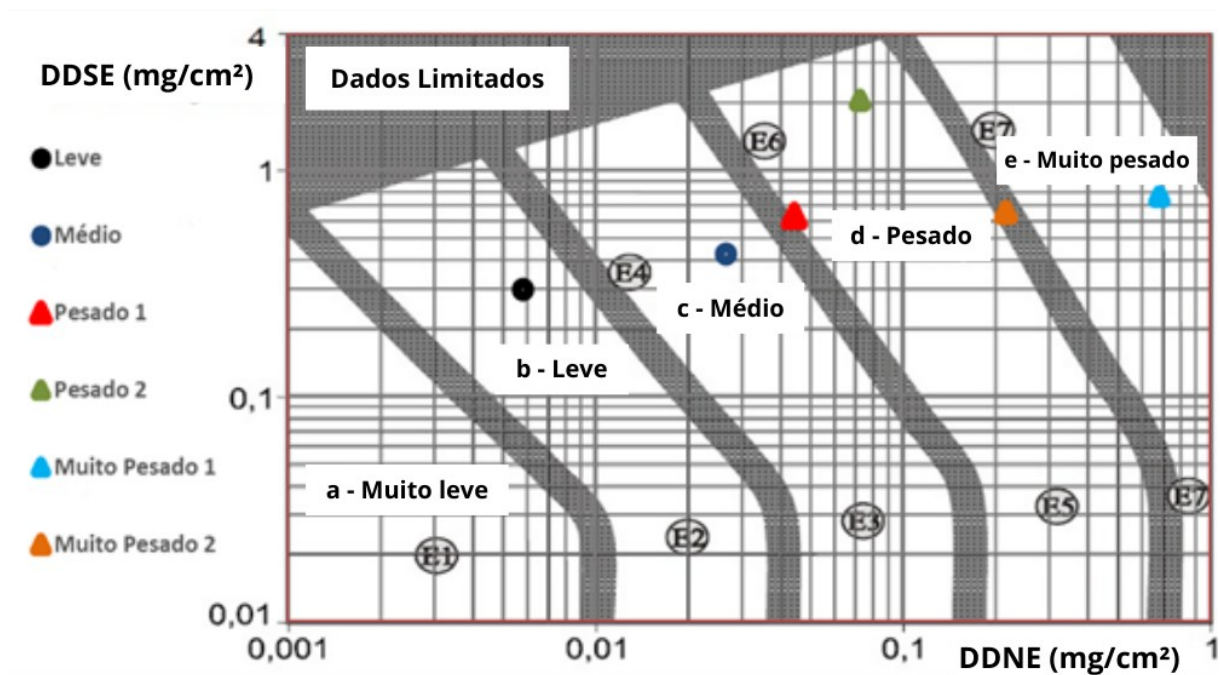
Figura 78: Climatologia das estações climáticas da região Sul e Sudeste.



Fonte: Adaptado de (RODRIGUES; BULHÕES, 2017).

Foram efetuadas medições para os níveis Leve, Médio, Pesado e Muito Pesado. Ainda, foram preparadas amostras nas faixas de transição Médio para Pesado e Pesado para Muito Pesado. Após cada rodada de medição os corpos de prova passaram pelo processo de coleta normatizado, a fim de garantir relação entre medições e valores da norma. Os resultados das coletas dos corpos de prova desta etapa são apresentando na Figura 79.

Figura 79: Coletas em isoladores aplicados à medição de resistividade superficial



Fonte: o autor, 2022.

4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A partir dos dados apresentados nas seções anteriores, algumas conclusões podem ser estabelecidas e serão abordadas na presente seção.

4.1 Métodos de aplicação e soluções poluentes

partir dos valores de DDSE e DDNS obtidos nas aplicações por imersão e por aspersão com borrifador pré-pressurizado, das duas soluções testadas, tem-se que a aplicação com terra diatomácea e dióxido de silício (solução 1) foi a que apresentou menor dispersão de resultados, bem como distribuição mais centralizada na faixa de definição da poluição leve. Além disso, visualmente apresentou o melhor recobrimento da superfície dos isoladores, ou seja, criou uma camada mais uniformemente distribuída para todos os métodos testados. Este é um resultado desejado, já que impõe maior severidade às amostras, promovendo maior perda de suportabilidade elétrica, como indicado por Banik e por Sufliis (2015; 2003). Por esse motivo, optou-se pela solução 1 para os demais desenvolvimentos deste trabalho.

Os métodos de condicionamento de amostras testados foram a imersão, a aspersão com borrifador pré-pressurizado (manual) e a aspersão com pistola de pintura. Para os testes com a formulação sem sal, os três obtiveram o índice de contaminação esperado inicialmente: o nível “Leve”.

O método de aplicação por imersão apresentou características que dificultam o processo de condicionamento das amostras, destacando-se: a solução poluente tende a decantar, implicando na necessidade de manter todo o volume em constante agitação; é necessária a preparação de grandes volumes de solução, pois o isolador precisa ser completamente submerso; há grande diferença de quantidade de material depositado entre as faces superior e inferior, minimizando a uniformidade da aplicação; este procedimento atribui uma margem de erro empírica, isto é, a forma de manuseio pode variar a intensidade de deposição.

Por sua vez, as aplicações por meio de aspersão se mostraram mais adequadas, uma vez que: atribuem maior controle de deposição; permitem variar o número de camadas, por conseguinte atribuem a possibilidade de ajuste na

faixa de intensidade de DDNS; e ainda, preparam uma superfície mais uniforme, se comparada à imersão. Contudo, para soluções com sal, o borrifador pré-pressurizado não obteve o funcionamento esperado. O sal agiu como um espessante, ocasionando entupimento do bico do borrifador. Este problema foi sanado ao ser utilizada a pistola de pintura, que mesmo com as soluções salinas, manteve a qualidade de distribuição da camada poluente, bem como uma distribuição aceitável nos índices de DDSE e DDNS. Ainda, a pistola permitiu o uso do equipamento de controle de aplicação, auferindo outro diferencial à replicabilidade de processos.

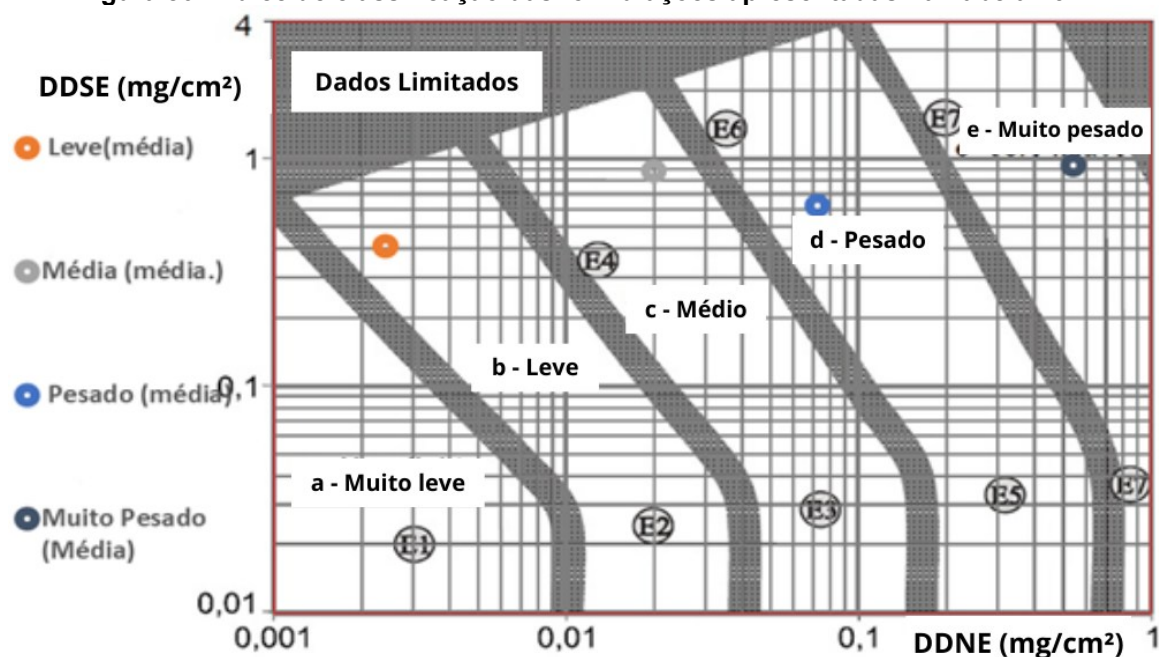
Assim, conforme os resultados apresentados, para a obtenção dos níveis de poluição definidos em norma, são apresentadas as proporções indicadas na Tabela 23, e suas respectivas distribuições médias pela classificação do gráfico apresenta na Figura 80.

Tabela 23: Soluções de poluição artificial para cada nível de poluição normatizado.

Nível de Poluição (IEC 60815-1)	Terra Diatomácea (g)	Dióxido de Silício (SiO₂) (g)	Cloreto de Sódio (NaCl) (g)
Leve	50	5	--
Média	50	5	1,0
Pesada	50	5	12,5
Muito Pesada	50	5	50,0

Fonte: o autor, 2022.

Figura 80: Índice de classificação das formulações apresentadas na Tabela 23.



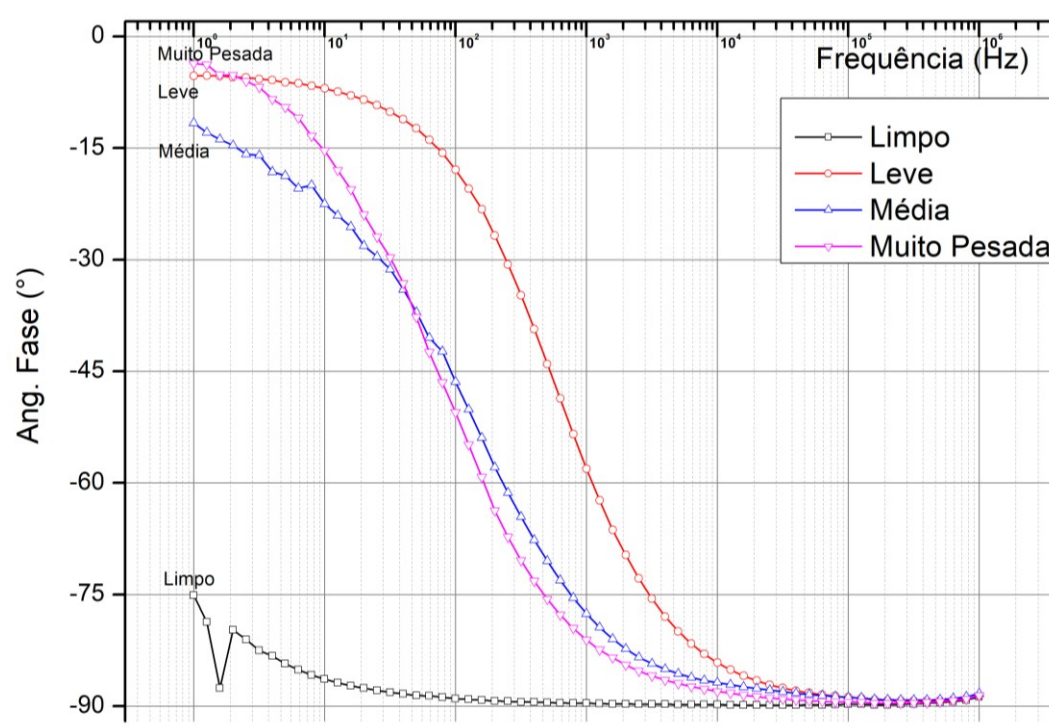
Fonte: o autor, 2022.

4.2 Espectroscopia de impedância

Inicialmente, a aplicação da técnica de espectroscopia foi utilizada para extrair o comportamento elétrico das poluições a partir da variação da frequência. Desta maneira, foram efetuadas medições com o substrato limpo e poluído com as formulações para poluição “Leve”, “Média” e “Muito Pesada”. No período de execução das atividades, a formulação para o nível Pesada não havia sido concluída, e por tal motivo não foi possível produzir os resultados para esta intensidade especificamente.

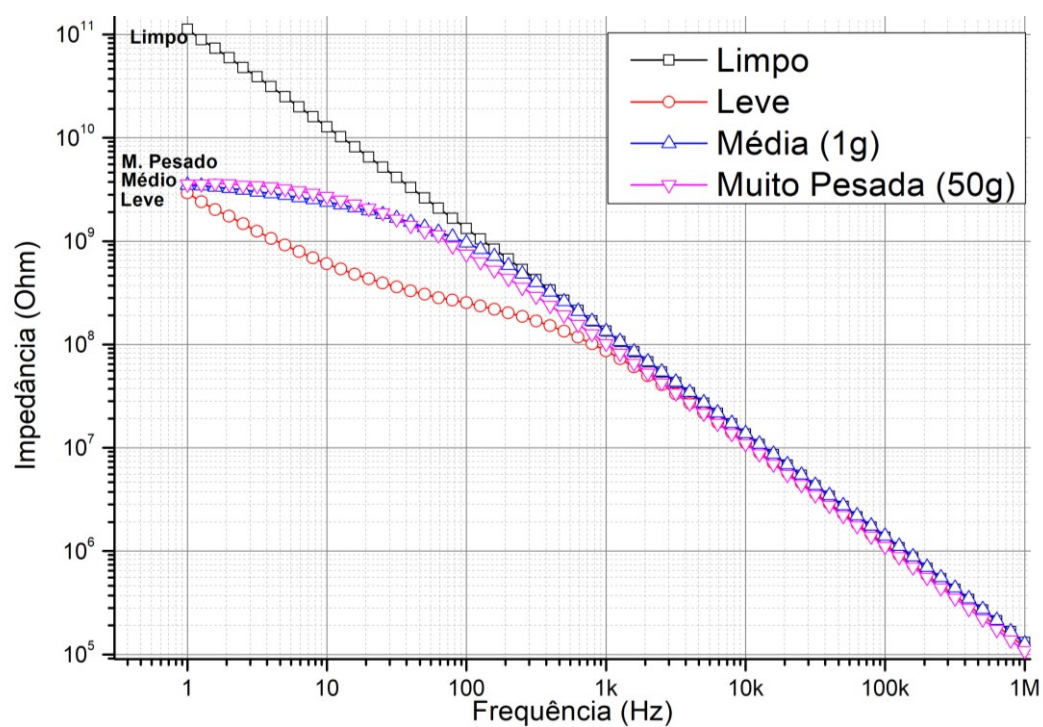
Observando os gráficos das Figura 81 e 82, pode-se verificar que, quando limpo, o substrato tem comportamento análogo a um capacitor ideal, ou seja, o ângulo de fase aproxima-se de 90° ao longo de todo o espectro de frequência testado. Por sua vez, a impedância encontra-se com magnitude elevada nessa condição. Após a poluição, o comportamento é modificado: o ângulo de fase aproxima-se de 0° , refletindo a entrada de efeitos dissipativos, para todos os poluentes testados. Também é observável que a impedância é substancialmente reduzida, caindo para valores na faixa de 10^9 , duas ordens de grandeza a menos que na situação de limpo.

Figura 81: Ângulo de fase - comparativo entre substrato limpo e poluído artificialmente.



Fonte: o autor, 2022.

Figura 82: Impedância - comparativo entre substrato limpo e poluído artificialmente.



Fonte: o autor, 2022.

Estes resultados indicam a capacidade da poluição em causar maior condução elétrica na superfície poluída. Fazendo uma analogia com um isolador, há a diminuição da capacidade de isolamento, em todos os cenários de poluição testados.

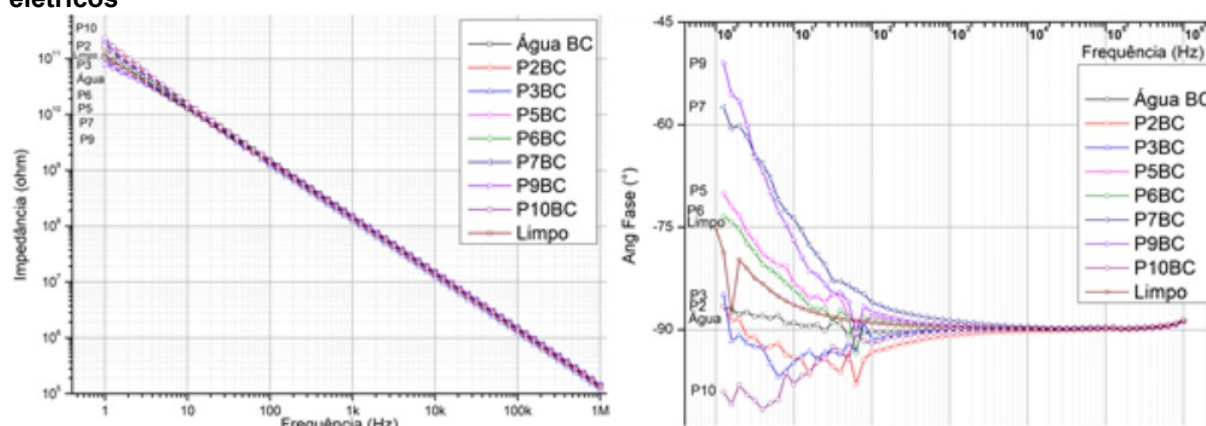
Em segunda instância, é possível observar e concluir que, em frequências baixas, isto é, inferiores a 100 Hz, há maior diferença de comportamento entre as curvas, seja para análise de impedância ou do ângulo de fase. Esta hipótese reforça a aplicabilidade da medição de resistividade superficial para avaliação do estado de poluição de isoladores para alta tensão. Também se destaca que, em frequência industrial - faixa de 50Hz a 60Hz - há diferença entre as curvas, indicando também ser válida análises de contaminação por meio da impedância ou do ângulo de fase.

4.2.1 Exemplo de aplicação da técnica de espectroscopia com uso da poluição artificial

A técnica de avaliação dos efeitos de poluição por meio da espectroscopia subsidiou um estudo paralelo aplicado a manutenção preventiva em isoladores.

Para a avaliação, foram preparados diferentes produtos de limpeza, com possibilidade de serem aplicados a limpeza de isoladores em campo e energizados. A aplicação da técnica de espectroscopia de varredura foi a de avaliar as alterações que os diferentes produtos de limpeza podem causar a superfície do isolador. Além disso, permitiu verificar entre os produtos qual deles removia o poluente sem deixar quantidades significativas de resíduos, ou seja, recuperava a condição elétrica de limpo.

Figura 83: Espectroscopia aplicada a avaliação de produtos de limpeza pra isoladores elétricos



Fonte: o autor, 2022.

Como destacado pelas curvas da Figura 83, a avaliação da impedância indicou que todos os produtos removeram sais presentes na superfície, uma vez que houve retorno da impedância para patamares de magnitude próxima ao estado limpo ($10^{11}\Omega$). Contudo, avaliando a impedância, observou-se a presença de resíduos no substrato, isso fica evidenciado pelos produtos com curvas de ângulo de fase mais próximas a -45° .

Assim, entende-se que o desenvolvimento da aplicação desta técnica pode vir a ser apropriado para avaliações de isoladores instalados em elementos do SEP e sujeitos a contaminações ambientais.

4.3 Medições de resistividade superficial

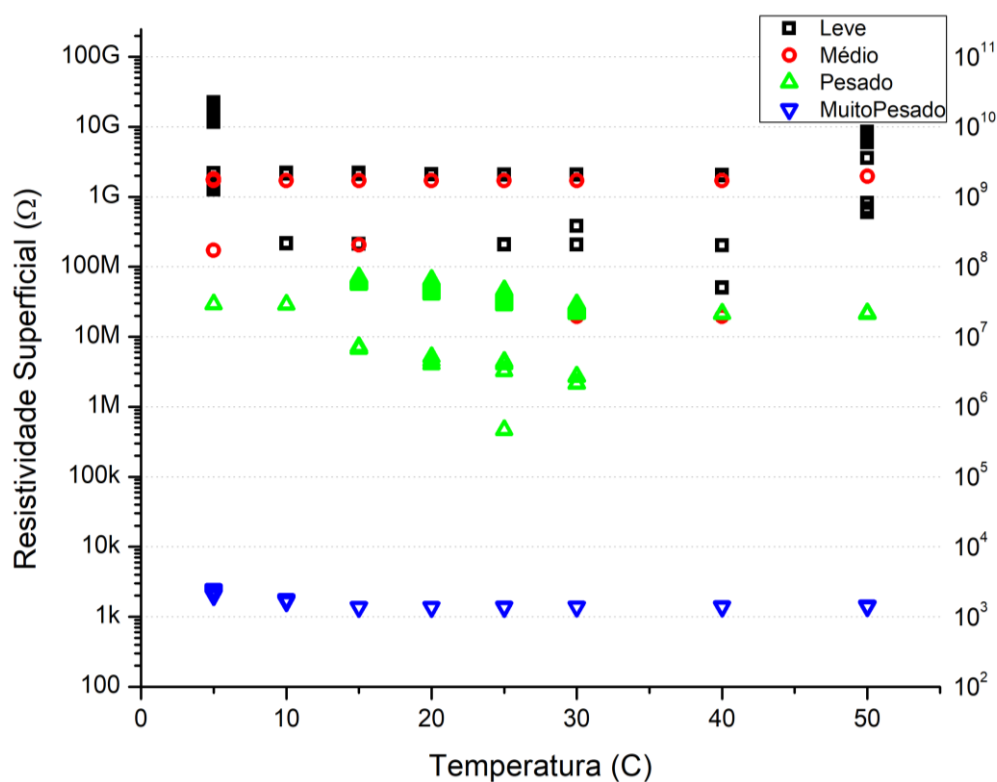
Foram executadas medições de resistividade superficial em isoladores padrão poluídos com todos os níveis de poluição, de “Leve” a “Muito Pesado”, conforme previsto em norma e utilizando as soluções poluentes apresentadas anteriormente. Não foram promovidos ensaios para o nível “Muito Leve”, uma vez que esta intensidade não interfere no desempenho do isolador (MELLO, 2017). Ainda, como citado anteriormente neste trabalho, foram executados ensaios com variação de temperatura e umidade fixada, e ensaios com variação de umidade com temperatura fixada, ou seja, apenas um parâmetro variava em cada série de medição.

Ainda, como citado anteriormente neste trabalho, foram executados ensaios com variação de temperatura e umidade fixada, e ensaios com variação de umidade com temperatura fixada, ou seja, apenas um parâmetro variava em

cada série de medição. Na Figura 84 são apresentados os resultados das medições, nela também se observa que há uma dispersão significativa para as poluições Leve e Média, as poluições Pesada e Muito Pesada apresentam maior regularidade. Conclui-se que, conforme aumenta a intensidade da poluição, menor é a resistividade, partindo de $10^{11} \Omega$ para cerca de $10^6 \Omega$ no nível de poluição mais crítico.

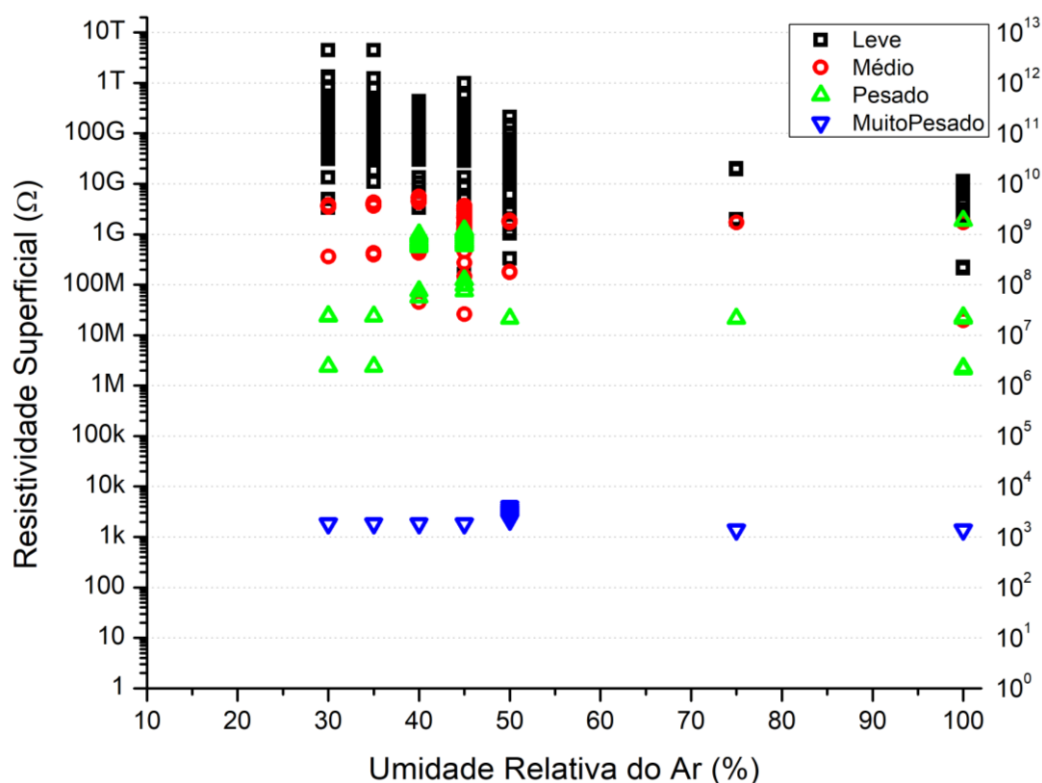
Um comportamento semelhante pode ser observado por meio dos valores da medição de resistividade obtidos com variação de U.R. com temperatura fixa - Figura 85.

Figura 84: Gráfico da Resistividade Superficial – Umidade fixa e variação de temperatura.



Fonte: o autor, 2022.

Figura 85: Gráfico da Resistividade Superficial - Temperatura fixa e umidade variável.



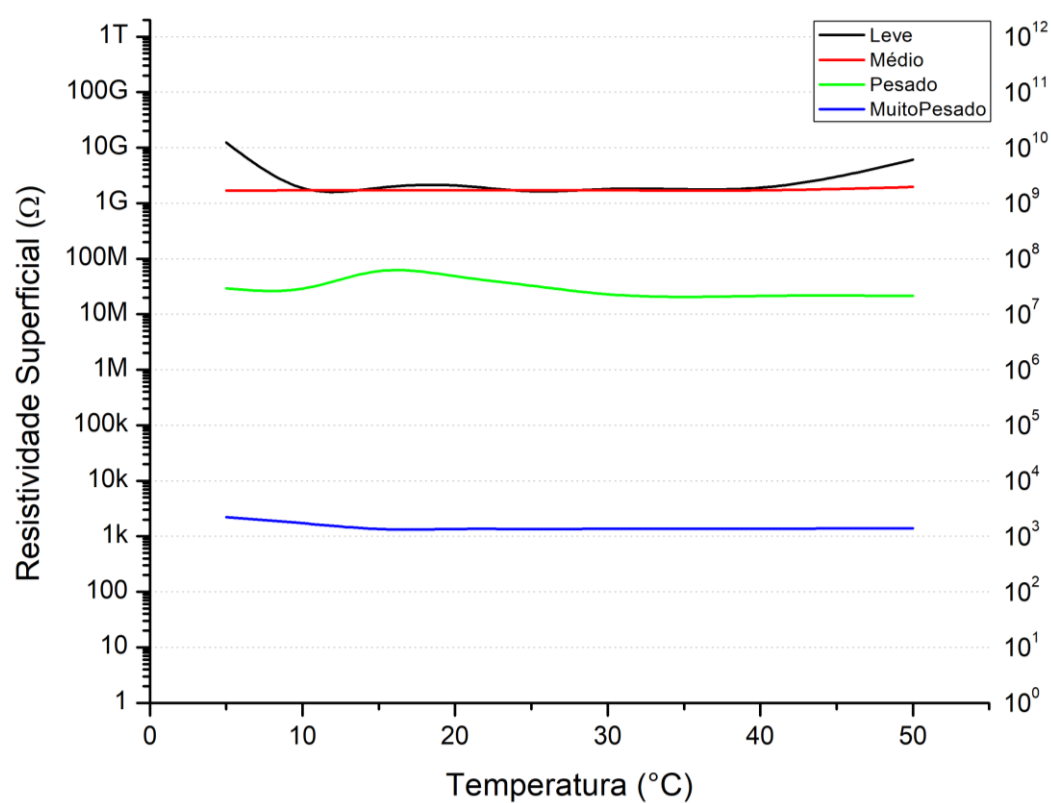
Fonte: o autor, 2022.

4.3.1.1 Resistividade Superficial - Valores Médios

A partir dos gráficos de dispersão, apresentados anteriormente no item 4.3, foi possível ajustar as curvas de tendência para cada nível de poluição. As curvas foram formadas pelos valores médios para cada conjunto de medidas e evidenciam o comportamento de cada intensidade de poluição, seja pela variação da temperatura (Figura 86) ou pela variação da umidade (Figura 87).

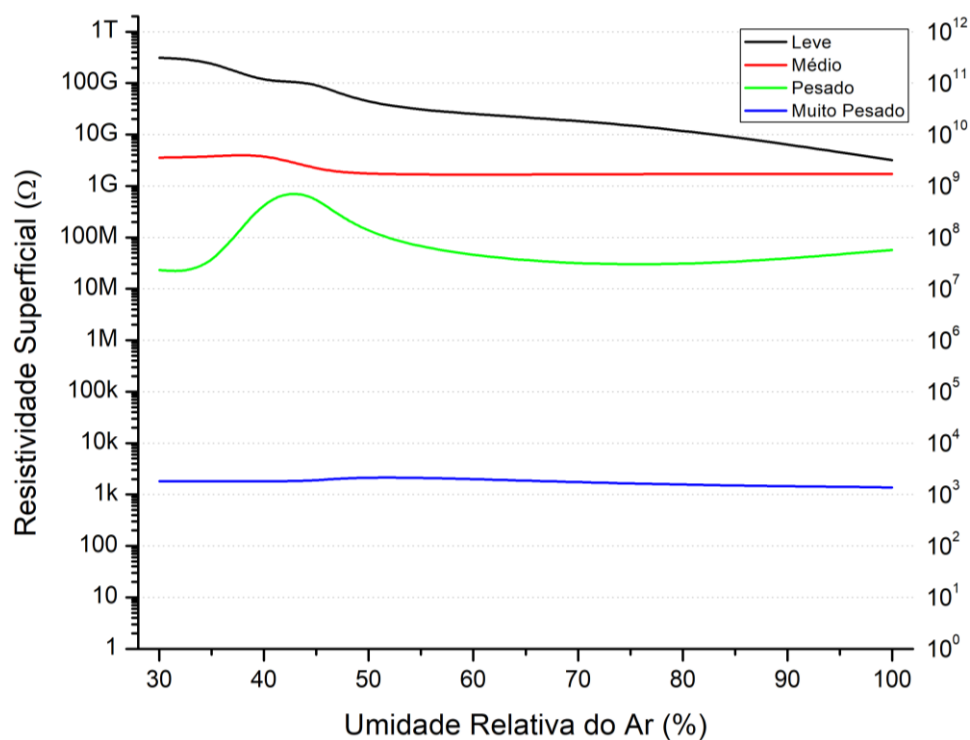
Neste caso, sobretudo na situação com variação de umidade, pode-se perceber distinção entre os valores de resistividade resultantes de cada nível de poluição. Este resultado expressa uma maior sensibilidade da resistividade superficial a variações da umidade.

Figura 86: Curvas Médias para Resistividade Superficial com Variação de Temperatura.



Fonte: o autor, 2022.

Figura 87: Curvas Médias para Resistividade Superficial com Variação de Umidade.



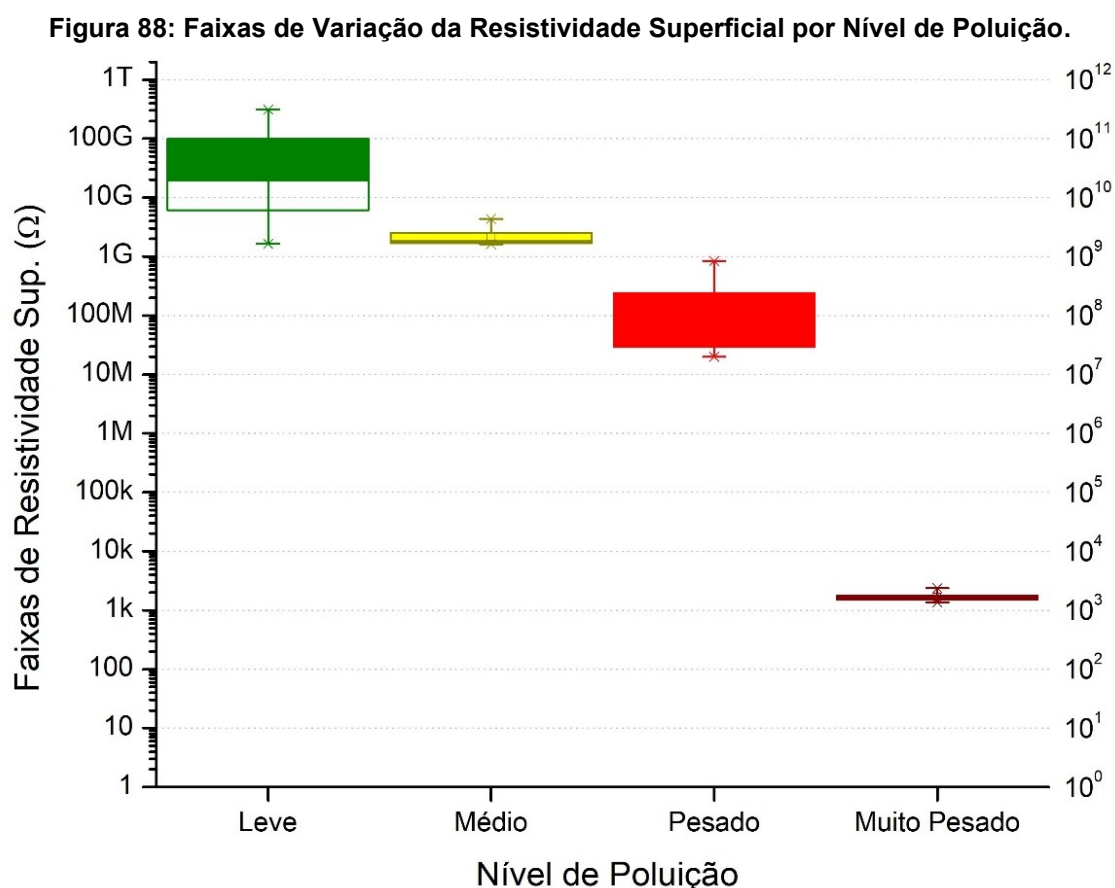
Fonte: o autor, 2022.

Observa-se ainda que, os valores obtidos na calibração (1011Ω) são ligeiramente superiores aos valores encontrados para o nível de poluição Leve. Esta característica reforça a hipótese de que este nível de poluição pouco contribui na diminuição de desempenho dos isoladores.

Por fim, pode-se concluir que os resultados convergem com o esperado, isto é, a cada nível de poluição há uma perda significativa na resistividade superficial do isolador, partindo de variações pouco perceptíveis, como em nível “Leve”, para mais expressivas, como a poluição “Pesada” e “Muito Pesada”.

4.3.1.2 Resistividade Superficial – Faixas de Variação

Um subproduto das medições de resistividade superficial é a proposição de faixas de classificação, relacionando a intensidade de poluição com a resistividade instantânea, conforme mostrado na Figura 88.

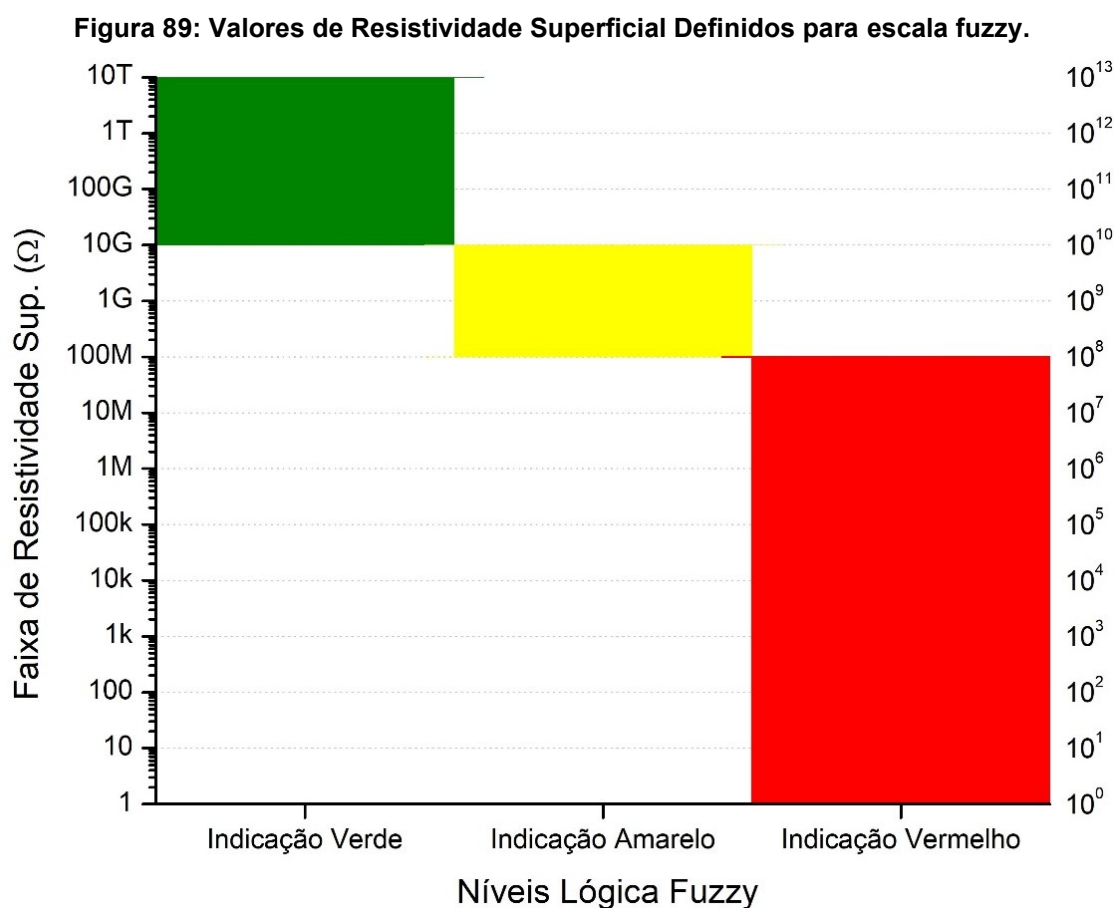


Fonte: O Autor (2024).

As faixas de variação foram produzidas considerando as duas situações de medição (variações de temperatura e umidade) combinadas, ou seja, utilizando todos os valores obtidos na leitura.

Assim, tem-se que, para o nível “Leve”, os valores variaram entre a ordem de dezenas de $G\Omega$ até alguns milhares de $G\Omega$ (ou dezenas de $T\Omega$). Já para o nível médio, os valores variaram na faixa de $G\Omega$, mais especificamente, entre 10^9 e $10^{10} \Omega$. Para os níveis Pesado e Muito Pesado, a distinção foi ainda mais significativa. No nível Pesado, os valores mais altos obtidos foram na faixa de $M\Omega$ ($10^8 \Omega$). Por fim, no nível Muito Pesado, os valores se reduziram consideravelmente, atingindo a faixa de $k\Omega$.

Com os resultados apresentados, pode-se ainda propor uma escala *fuzzy* de três níveis, como apresentada na Figura 89.



Fonte: O Autor (2024).

A proposta desta escala visa facilitar a visualização da condição instantânea do equipamento. Conforme demonstrado, a poluição de intensidade "Leve" exerce pouca influência no desempenho elétrico, razão pela qual foi

atribuída a cor verde, sinalizando uma condição ideal de operação. A intensidade "Média" ainda não representa um risco elevado, mas pode indicar o acúmulo de poluentes, o que provoca uma perda significativa de resistividade. Assim, a cor amarela foi escolhida como um sinal de atenção.

Por outro lado, as intensidades "Pesada" e "Muito Pesada" demonstram grande impacto na redução da resistividade superficial, servindo como indicadores de perdas elétricas intensas e de risco iminente de descargas disruptivas. Dessa forma, estabeleceu-se que o maior valor de resistividade observado na condição de poluição "Pesada" deve ser o ponto de alerta, representado pela cor vermelha, sinalizando perigo para o equipamento.

4.4 Considerações finais

Os resultados obtidos acerca do condicionamento de isoladores são promissores por apresentarem convergência de resultados no que concerne à intensidade de poluição objetivada. A metodologia desenvolvida e proposta permitiu obter com assertividade e replicabilidade todos os níveis de poluição previstos em norma. O método de jateamento/aspersão pressurizado, utilizando as soluções contaminantes preparadas e apresentadas, foi o que gerou melhores resultados, uma vez que ele implementa uniformidade de camada do contaminante sobre os isoladores. O controle de tempo de aplicação, da pressão, da rotação e a distância mostraram-se como elementos fundamentais para obtenção de superfícies uniformes.

Ao empregar medições de impedância em corpos de prova, observou-se que a poluição altera a condição elétrica dos isoladores, isto é, o comportamento da superfície varia de armazenativo, para a condição limpa, para majoritariamente dissipativo, quando poluído. Estes resultados confirmam, por meio do ângulo de fase e da magnitude da impedância, as indicações da literatura apresentada. A técnica também contribuiu indicando que, para frequências inferiores a 100 Hz, há maior diferença entre os efeitos de cada nível de poluição explorado neste trabalho. Este resultado contribui apresentando a melhor região de medição, no aspecto da frequência.

As medições de resistividade superficial, em ambiente climatizado, permitiram a produção de curvas que relacionam a umidade e temperatura.

Estes resultados foram produzidos para cada nível de poluição da norma ABNT IEC/TS 60815-1(2014). Assim, foi possível observar a alteração promovida pela poluição artificial nos isoladores, bem como traçar curvas características de resistividade superficial específicas por nível de poluição. Após a elaboração das curvas, foi evidenciado que a perda da resistividade superficial é gradativa e bem definida, sendo acentuada ao transitar do nível “Pesado” para o “Muito Pesado”, evidenciando o risco a que os isolados são submetidos nestas condições. Assim, estes dados podem vir a colaborar com estudos que objetivem desenvolver dispositivos destinados à classificação da SPL, de forma automatizada; ou mesmo para o planejamento de intervenções preditivas, por exemplo, a limpeza de isoladores, que visem minimizar perdas elétricas e descargas disruptivas ocasionadas por ação da poluição. Nesses casos, a medição funcionaria como uma fonte de dados fidedigna a partir de parâmetros elétricos obtidos na região de interesse de intervenção.

5 CONCLUSÃO

As contribuições deste trabalho abrangem aplicações laboratoriais normatizadas e não normatizadas, aplicações em testes direcionados aos desenvolvimentos de isoladores, bem como área de monitoramento de redes sob efeitos de poluição.

No âmbito de ensaios elétricos, ao propor um método de poluição assertivo e bem definido, soma-se ao assunto por permitir a validação da suportabilidade elétrica de isoladores sob condições de poluição de forma mais bem definida, isto é, ao aplicar a técnica, há maior clareza quanto à relação do nível de tensão e a intensidade de poluição que foram testados.

Acerca das medições elétricas, este trabalho contribui para caracterizar os efeitos da poluição no domínio da frequência. Os resultados destes testes podem auxiliar na preparação e calibração de equipamentos de testes destinados à medição de poluição em campo e perda de capacidade de isolamento.

Outro produto com capacidade de aproveitamento, apresentado neste trabalho, é a representação da relação da resistividade superficial de isoladores poluídos para cada intensidade de poluição definida em norma. As curvas demonstram o decaimento da capacidade de isolamento por meio da diminuição da resistividade superficial. Estas informações podem ser aplicadas em equipamentos que busquem demonstrar a condição ambiental instantânea. Como exemplo, foi indicada uma escala de cores, estilo fuzzy, que mostra três diferentes condições de poluição em que um isolador pode estar.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir de um dos produtos deste trabalho, que trata da técnica de aplicação controlada de poluição em isoladores de vidro, pode-se propor um estudo direcionado ao condicionamento de isoladores compostos, tais como os fabricados em polietileno, silicone e resina epóxi. A dinâmica de aderência da poluição nessas superfícies difere significativamente daquela observada em isoladores de vidro ou vitrificados. Isoladores de silicone, por exemplo, possuem a característica de hidrofobicidade, o que dificulta a impregnação de poluentes. Nesse contexto, podem ser desenvolvidas formulações específicas para o condicionamento desses materiais, a fim de realizar ensaios em alta tensão.

Além disso, é possível utilizar as caracterizações do comportamento das poluições, sob diferentes condições de umidade e temperatura, para a calibração de equipamentos voltados à medição e predição de eventos, bem como para manutenções preventivas. O aprofundamento desse estudo pode gerar avanços significativos na programação de intervenções, particularmente no que tange à limpeza de redes elétricas que apresentam falhas e desligamentos causados pela ação de poluentes.

Por fim, a coleta de dados sobre a resistividade superficial, em condições variáveis de umidade e temperatura, pode ser utilizada na criação de bancos de dados voltados à avaliação de redes e no desenvolvimento de modelos digitais para equipamentos e ensaios elétricos, como no conceito de "gêmeo digital" (*Digital Twin*).

REFERÊNCIAS

ABNT, A. B. de N. T. ABNT IEC TS 60815-1: Seleção e dimensionamento de isoladores para alta-tensão para uso sob condições de poluição: parte 1: definições, informações e princípios gerais. [S. l.]: ABNT, 2014. 2014.v. 1.

ABNT. ABNT NBR 10621: isoladores utilizados em sistemas de alta-tensão em corrente alternada: ensaios de poluição artificial. [S. l.]: ABNT, 2017. 2017.

ABNT. ABNT NBR 11873 - Cabos cobertos com material polimérico, classe de tensão de 15 kV, 25 kV e 35 kV, para redes de distribuição aérea de energia elétrica. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2021. 2021.

ARCANJO, A. M. de C. Avaliação de espaçadores de 13,8 kV em ambientes contaminados. 2017. 103 f. Dissertação - UFPE-Universidade Federal de Pernambuco, Recife -PE 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/24929/1/DISSERTAÇÃO%20Arlyrlw%20Maynysen%20de%20Carvalho%20Arcanjo.pdf>.

AZEVEDO, A. C. D. INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE ARGILA E TECIDOS DE FIBRA DE JUTA (*Corchorus capsularis*) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FLAMABILIDADE DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS. 2019. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso - UFPA - Universidade Federal do Pará, Ananindeua - PA 2019. Disponível em: https://bdm.ufpa.br/bitstream/prefix/2647/1/TCC_InfluenciaIncorporacaoArgila.pdf.

BANIK, A.; DALAI, S.; CHATTERJEE, B. Studies the effect of Equivalent Salt Deposit Density on leakage current and flashover voltage of artificially contaminated disc insulators. *Em*: 2015 1ST CONFERENCE ON POWER, DIELECTRIC AND ENERGY MANAGEMENT AT NERIST (ICPDEN), 2015, Itanagar, India. Anais [...]. Itanagar, India: IEEE, 2015. p. 1–5. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7084495/>. Acesso em: 30 mar. 2024.

DURGA SAI SURYA M, G. N.; PRABHA RANI, K.; MURTHY, K. V. S. R. Effect of Pollution on Insulators in High Voltage Transmission Line. *Em*: SINGARI, Ranganath M.; KANKAR, Pavan Kumar (org.). Advances in Transdisciplinary Engineering. [S. l.]: IOS Press, 2022. Disponível em: <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/ATDE220772>. Acesso em: 9 abr. 2024.

EDMINISTER, J. A.; NAHVI, M.; PERTENCE JÚNIO, A. P. J. Circuito elétricos. [S. l.]: Bookman, 2014. 2014.

ESPEC, C. ESPEC Discontinued models and successor. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://www.espec.co.jp/english/support/end_next. Acesso em: 1 maio 2023.

ESPINO-CORTES, F. P.; RAMIREZ-VAZQUEZ, I.; GOMEZ, P. Electric field analysis of spacer cable systems under polluted conditions. *Em*: 2014 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (EIC), 2014, Philadelphia, PA, USA. Anais [...]. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2014. p. 231–234. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6869382/>. Acesso em: 28 abr. 2024.

FANGRONG, Z.; ZHIJIN, Z.; GUOHUI, P.; YUTANG, M.; HUALONG, Z.; HAO, G. Electric field distribution of 110 kV insulator under uneven pollution. *Em*: 2023 IEEE SUSTAINABLE POWER AND ENERGY CONFERENCE (ISPEC), 2023, Chongqing, China. Anais [...]. Chongqing, China: IEEE, 2023. p. 1–5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10402967/>. Acesso em: 30 mar. 2024.

FARMAN, M.; AHMAD, S.; ALAM, A.; SHARMA, M. P. Chemical analysis of insulator contaminants and reliability improvement of T&D line for smart operation of grid under chemically polluted environment. *Em*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY AND INTELLIGENT SYSTEMS (SEISCON 2011), 2011, Chennai, India. Anais [...]. Chennai, India: IET, 2011. p. 539–544. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2011.0420>. Acesso em: 12 dez. 2023.

HERNANDEZ, G.; RAMIREZ, A. Dielectric Response Model for Transformer Insulation Using Frequency Domain Spectroscopy and Vector Fitting. *Energies*, [s. l.], v. 15, n. 7, p. 2655, 2022.

HERNANZ, J. A. R.; CAMPAYO MARTÍN, J. J.; MOTRICO GOGÉASCOECHEA, J.; ZAMORA BELVER, I. Insulator pollution in transmission lines. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, [s. l.], v. 1, n. 04, p. 124–130, 2006.

HILSDORF, E. R. UTILIZAÇÃO DE ISOLADORES CERÂMICOS TIPO PILAR NÚCLEO SÓLIDO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICAS TIPO COMPACTA. 2015. 69 f. Dissertação - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG 2015. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/177/1/dissertacao_hilsdorf_2015.pdf.

IBUDIALOR, C.; IFEANACHO, S. G.; IGOLO, V. S.; IGWE, H. V.; IHEBIGHI, C. P. ANALYSIS_OF_EFFECT_OF_CONTAMINATION_ON_I.pdf. NIEEE Nsukka Chapter, Nigerian Institute of Electrical and Electronic Engineers - NIEEE2023. Disponível em: https://www.academia.edu/107383399/ANALYSIS_OF_EFFECT_OF_CONTAMINATION_ON_INSULATOR?email_work_card=view-paper.

IEC, I. E. C. IEC 60507 Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems. Edition 3.0ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013. 2013.

IEC, I. E. C. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 1: Definitions, information and general principles. Edition 1.0ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2008. 2008.

JUNIOR, R. A. M.; MÜLLER, R. O. ESTIMATIVA DA UMIDADE RELATIVA ATRAVÉS DE MODELO – ESTUDO DE CASO DO LITORAL BRASILEIRO. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*, [s. l.], n. Especial, 2018. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/414/247>. Acesso em: 5 jan. 2023.

KARADY, G. G.; RAYAPPA, A. V.; MURALIDHAR, M.; RUFF, D. L. A new method for pre-contamination and testing of nonceramic insulators. *Em: CONFERENCE RECORD OF THE 1996 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION*, 1996, Montreal, Que., Canada. Anais [...]. Montreal, Que., Canada: IEEE, 1996. p. 263–266. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/549332/>. Acesso em: 14 maio 2024.

KONTARGYRI, V. T.; ILIA, N. C.; GONOS, I. F.; STATHOPOULOS, I. A. ELECTRIC FIELD AND VOLTAGE DISTRIBUTION ALONG INSULATORS UNDER POLLUTION CONDITIONS. [s. l.], 2004.

LIAO, Y.; WANG, Q.; YANG, L.; KUANG, Z.; HAO, Y.; ZHANG, C. Discharge Behavior and Morphological Characteristics of Suspended Water-Drop on Shed Edge during Rain Flashover of Polluted Large-Diameter Post Insulator. *Energies*, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 1652, 2021.

LIMA, R. A. de. CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO VIA SATÉLITE DO ESTADO DE POLUIÇÃO DE CADEIAS DE ISOLADORES DE ALTA TENSÃO. 2010. 93 f. Dissertação - UFPE, Recife -PE 2010. Disponível em: https://www.ufpe.br/documents/39830/1359036/191_RicardoLima/f5a24b4d-82db-4a3a-8886-77a045d10df3.

LV, Y.; ZHAO, W.; SONG, Q. Simulation on Deposition Characteristics of Contamination Particles in Fog-Haze Environment. *IEEE Access*, [s. l.], v. 8, p. 26119–26128, 2020.

MA, G.-M.; JIANG, J.; MU, R.-D.; LI, C.-R.; LUO, Y.-T. High Sensitive FBG Sensor for Equivalent Salt Deposit Density Measurement. *IEEE Photonics Technology Letters*, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 177–180, 2015.

MALIK, N. H.; AL-ARAINY, A. A.; QURESHI, M. I. Electrical insulation in power systems. New York: Marcel Dekker, 1998. 1998.(Power engineering, v. 3).

MEDEIROS, M. A. R. Propriedades mecânicas de compósitos de PVC reciclado reforçados com fibras de sisal e de nylon 6. 2006. Dissertação - UFBA - Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA 2006. Disponível em: <http://www.repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/9720>.

MELLO, D. R. de. Curso de Isoladores: Dimensionamento de isoladores sob condições de poluição. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017.

MELLO, D. R. de; JR, R. T. D. C.; BATISTA, J. T.; MELO, M. E. Avaliação do Grau de Poluição em Instalações de Transmissão, Subestações e Distribuição. [s. l.], 2001. Disponível em: <https://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20090107155442-33.pdf>.

MONTOYA, G.; RAMIREZ, I.; MONTOYA, J. I. Correlation among ESDD, NSDD and leakage current in distribution insulators. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, [s. l.], v. 151, n. 3, p. 334, 2004.

NÓBREGA, A. M. Estudo das Redes Áreas Compactas por Meio de Ensaios de Modelagens Utilizando o Método dos Elementos Finitos. 2011. 123 f. Dissertação - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG 2011.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica: eletromagnetismo. [S. l.]: Editora Edgard Blucher, 2022. 2022.

PORFIRIO, D. M. O INTEMPERISMO TROPICAL COMO AGENTE DE DEGRADAÇÃO DE CADEIAS DE ISOLADORES DE ALTA TENSÃO EM SUBESTAÇÕES NA AMAZÔNIA ORIENTAL: ESTUDO DE CASO EM BARCARENA-PA E SÃO LUÍS-MA. 2018. 261 f. Tese - UFPA - Universidade Federal do Pará, Belém, PA 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/10635>.

PORTELLA, K. F.; PIAZZA, F.; INONE, P. C.; RIBEIRO JR, S.; CABUSSÚ, M. S.; CERQUEIRA, D. P.; CHAVES, C. S. D. S. Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador. Química Nova, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 340–348, 2008.

PUCHALE, L. H. B. Metodologia para mitigação de desligamentos intempestivos em linhas de transmissão correlacionados a umidade elevada. [s. l.], 2019. Disponível em: <http://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/8941>. Acesso em: 19 mar. 2024.

QUEVEDO, C. P. Eletromagnetismo. Rio de Janeiro, RJ: McGraw-Hill do Brasil, 1993. 1993.

RAHUL SONI; MIHIR BHATT. Flashover Characteristics Performance Assessment under Contamination Possessions on the Surface of Porcelain Insulators. Journal on Today's Ideas - Tomorrow's Technologies, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 47–56, 2018.

RODRIGUES, T. N.; BULHÕES, E. M. R. Análise de séries históricas de dados de temperatura e precipitação no litoral brasileiro. Em: OS DESAFIOS DA GEOGRAFIA FÍSICA NA FRONTEIRA DO CONHECIMENTO. [S. l.]: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. p. 1679–1684. Disponível em: <http://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2104>. Acesso em: 6 jun. 2024.

ROSSETTO, M. B. Desenvolvimento e avaliação de nova metodologia de análise de materiais no ensaio de resistência ao trilhamento elétrico com base em análise térmica. 2021. 122 f. Dissertação - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, Curitiba - PR 2021. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/79509>.

SADIKU, M.; ALEXANDER, C. K. Fundamentos de circuitos elétricos. [S. l.]: Amgh, 2021. 2021.

SALEM, A. A.; ABD-RAHMAN, R.; ISHAK, M. T. B.; LAU, K. Y.; ABDUL-MALEK, Z.; AL-AMERI, S.; AL-GAILANI, S. A.; GHONEIM, S. S. M. Influence of contamination distribution in characterizing the flashover phenomenon on

outdoor insulator. *Ain Shams Engineering Journal*, [s. l.], v. 14, n. 12, p. 102249, 2023.

SALEM, Ali. A.; ABD-RAHMAN, R.; KAMARUDIN, M. S.; OTHMAN, N. A.; JAMAIL, N. A. M.; HUSSIN, N.; HAMID, H. A.; RAWI, I. M. Flashover Voltage Prediction on Polluted Cup-Pin the Insulators Under Polluted Conditions. *Em: PROCEEDINGS OF THE 11TH NATIONAL TECHNICAL SEMINAR ON UNMANNED SYSTEM TECHNOLOGY 2019*, 2021, Singapore. Anais [...]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2021. p. 1053–1065. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-981-15-5281-6_75. Acesso em: 7 dez. 2023.

SALLES, C. de; NÓBREGA, A. M.; MARTINEZ, M. L. B.; BATISTA, E. L.; UCHOA, J. I. L. Compatibilidade Dielétrica nas Redes de Distribuição Spacer de 25 kV. VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL), [s. l.], 2011. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Compatibilidade-Dielétrica-nas-Redes-de-Distribuição-Spacer-de-25-kV.pdf>.

STEFENON, S. F. ESTUDO DAS TÉCNICAS DE INSPEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM ISOLADORES ATRAVÉS DO USO DO ULTRASSOM. 2015. 93 f. - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau - SC 2015.

SUFLIS, S. A.; GONOS, I. F.; TOPALIS, F. V.; STATHOPOULOS, I. A. Study of the dielectric behaviour of non-uniformly polluted insulators. [s. l.], 2003.

SURYA, D. S. G. N. M.; RANI, K. P.; MURTHY, K. V. S. R. Effect of Pollution on Insulators in High Voltage Transmission Line. *Em: ADVANCES IN TRANSDISCIPLINARY ENGINEERING*. [S. l.]: IOS Press, 2022. Disponível em: <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/ATDE220772>. Acesso em: 9 abr. 2024.

TARÉIEV, B. M. Física de los materiales dieléctricos. Moscou - RU: Editorial MIR, 1978. 1978.v. 1.

VOSLOO, W. L.; ENGELBRECHT, F.; HEGER, N.; HOLTZHAUSEN, J. P.; STRAUSS, J. Insulator pollution monitoring program for Namibia. *Em: AFRICON 2007*, 2007, Windhoek, South Africa. Anais [...]. Windhoek, South Africa: IEEE, 2007. p. 1–7. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4401630/>. Acesso em: 30 mar. 2024.

WALUYO; PAKPAHAN, P.; SUWARNO. Study On The Electrical Equivalent Circuit Models of Polluted Outdoor Insulators. *Em: 2006 IEEE 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS*, 2006, Bali, Indonesia. Anais [...]. Bali, Indonesia: IEEE, 2006. p. 546–549. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4062725/>. Acesso em: 22 abr. 2024.

YANG, Z.; LIU, D.; ZENG, X.; FAN, C.; YANG, X.; HUANG, Y. Modelling and simulation study on dynamic pollution accumulation process of composite insulator. *High Voltage*, [s. l.], p. hve2.12413, 2024.

ABNT. ABNT NR 10296 - Material isolante elétrico: avaliação da resistência e erosão sob condições ambientais severas. [S. l.]: ABNT, 2014. 2014.