



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Giovanni Helbert Quaresma

**Avaliação do Desempenho de Isoladores Elétricos
de Porcelana através do Uso de Recobrimentos
Poliméricos Hidrofóbicos**

Belo Horizonte

2018

Giovanni Helbert Quaresma

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ISOLADORES ELÉTRICOS
DE PORCELANA ATRAVÉS DO USO DE RECOBRIMENTOS
POLIMÉRICOS HIDROFÓBICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Claudinei Rezende Calado

Belo Horizonte

2018

Q1a Quaresma, Giovanni Helbert.
Avaliação do desempenho de isoladores elétricos de porcelana através do uso de recobrimentos poliméricos hidrofóbicos / Giovanni Helbert Quaresma. - 2018.
146 f. : il.
Orientador: Claudinei Rezende Calado.

Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.
Bibliografia.

1. Isoladores e isolamentos elétricos. 2. Porcelana. 3. Polímeros. 4. Hidrofobicidade. I. Calado, Claudinei Rezende. II. Título.

CDD: 620.195

Dedico este trabalho a Deus e à minha família,
pela compreensão e o apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela sabedoria e conhecimento que me fizeram caminhar em mais um projeto na minha vida.

À minha esposa e filha, pela compreensão nos momentos de ausência para que eu pudesse dedicar-me à elaboração deste trabalho.

Ao meu Orientador Claudinei Rezende Calado pelo apoio, entusiasmo e incentivo.

A todos os professores do Mestrado em Engenharia de Materiais do CEFET- MG, pela disponibilidade e repasse de conhecimentos que proporcionaram o aprimoramento da minha formação profissional.

Ao CEFET-MG e ao SENAI-CIT/ MG pela disponibilização da infraestrutura de laboratórios e equipamentos, o que tornou possível a realização dos ensaios e análises necessárias ao meu tema de pesquisa.

À empresa Isoladores Santana S.A e ao Engenheiro Mauro Maurício pela colaboração e contribuição para o fornecimento dos corpos de prova cerâmicos usados na realização dos trabalhos experimentais.

À aluna de graduação de Química Débora Souza do CEFET-MG, pelo apoio na realização dos ensaios e análises referentes ao trabalho em questão.

À COPASA, empresa onde trabalho e que permitiu a realização de mais uma etapa no meu desenvolvimento profissional.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram até aqui para a realização deste trabalho.

“A experiência mostra que os homens são governados por aquilo que costumam ver e fazer, a ponto de mesmo as melhorias mais simples e óbvias nas ações mais comuns, serem adotadas com hesitação, relutância e lentidão.”

Alexander Hamilton, 1791.

RESUMO

As propriedades dielétricas e a resistência mecânica dos isoladores cerâmicos de porcelana são fundamentais para garantir ao sistema elétrico, índices aceitáveis de continuidade no fornecimento de energia através das linhas de transmissão e redes de distribuição elétrica. Contudo, as condições atmosféricas e o teor de poluentes nela existentes, podem comprometer severamente a eficiência do funcionamento dos referidos isoladores. Tal situação se deve ao fato de que os mesmos possuem superfícies constituídas de óxidos metálicos que possuem alta molhabilidade, principalmente quando expostos a condições úmidas como névoa, orvalho e chuva. Essa característica pode ocasionar a formação de película de água que, se for contínua por toda a superfície do isolador, é capaz de conduzir corrente elétrica e fechar um arco (fenômeno conhecido como *flashover*). No presente trabalho, visando melhorar a hidrofobicidade da superfície de tais isoladores, realizou-se a deposição de polímeros em substratos de porcelana utilizados como isoladores elétricos através da utilização das técnicas de gotejamento e aerógrafo. Medidas de ângulo de contato entre as superfícies e a água foram efetuadas por meio de goniômetro, para caracterizar o comportamento dos recobrimentos usados. Para avaliar o desempenho dos diversos recobrimentos, incluíram-se nos ensaios corpos de prova com recobrimento de esmalte cerâmico, apenas para efeito comparativo. Os três revestimentos que apresentaram os resultados mais promissores no aspecto da hidrofobicidade foram o EPS(Poliestireno Expandido) +THF, EPS+Tolueno e o EPS + Clorofórmio aplicados através de aerógrafo. O revestimento de EPS + Clorofórmio apresentou ângulo de contato médio de 109,63°, comportamento 3,6% superior ao EPS+THF e 14,5% superior ao EPS+Tolueno. Já o recobrimento de esmalte cerâmico, como esperado, apresentou comportamento hidrofílico. Desta forma, os dados obtidos experimentalmente revelam que o EPS apresenta um grande potencial de aplicação como alternativa aos materiais já utilizados atualmente no mercado, pelo fato de ser um material de reuso, totalmente reciclável e economicamente viável.

Palavras-Chaves: Isoladores; Porcelana; Polímeros; Hidrofobicidade.

ABSTRACT

The dielectric properties and mechanical strength of ceramic porcelain insulators are fundamental to guarantee to the electrical system, acceptable rates of continuity in the supply of energy through transmission lines and electric distribution networks. However, atmospheric conditions and the amount of pollutants present therein can severely compromise the efficiency of the operation of said insulators. This situation is due to the fact that they have surfaces composed of metallic oxides that have high wettability, especially when exposed to humid conditions such as mist, dew and rain. This characteristic can cause the formation of water film which, if continuous throughout the surface of the insulator, is capable of conducting electric current and closing an arc (a phenomenon known as flashover). In the present work, in order to improve the hydrophobicity of the surface of such insulators, the deposition of polymers was carried out on porcelain substrates used as electrical insulators through the use of drip and airbrush techniques. Measurements of contact angle between surfaces and water were performed using a goniometer to characterize the behavior of the used coatings. In order to evaluate the performance of the various coatings, specimens with ceramic enamel coating were included for comparison purposes only. The three coatings that presented the most promising results in terms of hydrophobicity were EPS (Expanded Polystyrene) + THF, EPS + Toluene and EPS + Chloroform applied through an airbrush. The EPS + Chloroform coating had a mean contact angle of 109.63° , 3.6% higher than EPS + THF and 14.5% higher than EPS + Toluene. The ceramic enamel coating, as expected, presented hydrophilic behavior. In this way, the data obtained experimentally reveal that the EPS presents a great potential of application as an alternative to the materials already used in the market, because it is a reuse material, totally recyclable and economically viable.

Key words: Insulators; Porcelain; Polymers; Hydrophobicity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Detalhe de um material condutor.....	26
Figura 2 : Detalhe de um material isolante.....	27
Figura 3 : Condutor de eletricidade com área de seção transversal A e comprimento total L.....	29
Figura 4: Exemplo de falhas ao longo da superfície de isoladores em função de misturas e contaminantes adsorvidos.....	37
Figura 5: Detalhe de distâncias de projeto de isoladores.....	41
Figura 6: Detalhe da contaminação em cadeia de isoladores.....	42
Figura 7: Fenômeno da condutividade superficial.....	42
Figura 8: Detalhe da condutividade da massa de um isolador.....	44
Figura 9: Detalhe da perfuração da massa de um isolador	45
Figura 10: Representação esquemática da ocorrência de flashover: a) Deposição de contaminantes; b) Umidificação da Superfície; c) Formação de bandas secas e arcos parciais; d) Flashover.....	46
Figura 11: Valores de tensões disruptivas e de impulso a 60 Hz.....	47
Figura 12: Fenômenos de ocorrência do flashover.....	48
Figura 13: Sistema com robô instalado em berço hidráulico de caminhão com água pressurizada.....	49
Figura 14: Lavagem convencional de isoladores de porcelana em linha de distribuição de forma manual com o uso de pistola com água pressurizada.....	50
Figura 15: Lavagem convencional de isoladores de porcelana em subestação de forma manual com o uso de pistola com água pressurizada.....	50
Figura 16: Lavagem de isoladores de porcelana através de utilização de helicóptero com o uso de pistola com água pressurizada.....	51
Figura 17 : Gotas de água na superfície da folha da flor de Lótus.....	54

Figura 18: Estruturas hierárquicas na superfície da folha de Lótus (papilas e as ceras epicuticulares).....	54
Figura 19: Micrografia de uma folha de Lótus e esquema das nano tiras.....	55
Figura 20: Diagrama do ângulo de contato θ entre uma gota líquida e uma superfície plana horizontal.....	56
Figura 21 : Ângulo de contato θ entre uma gota líquida e uma superfície plana horizontal x molhabilidade.....	57
Figura 22: Esquema ilustrativo de uma gota líquida em uma superfície homogênea (a) x heterogênea (b).....	57
Figura 23: Constante dielétrica de diversos polímeros a 20-25°C.....	61
Figura 24: Detalhe de superfície de isolador cerâmico com e sem revestimento hidrofóbico.....	62
Figura 25 : Estruturas das cadeias de silicones.....	64
Figura 26 : Representação da estrutura do monômero estireno e do poliestireno (PS).....	66
Figura 27 : Detalhe do poliestireno expandido (EPS).....	68
Figura 28: Produção e consumo nacional do EPS entre 1999 e 2017.....	69
Figura 29 : Fluxograma geral da metodologia experimental adotada.....	70
Figura 30 : Substratos cerâmicos sem revestimento.....	71
Figura 31: Substrato cerâmico sem revestimento.....	71
Figura 32 : Substratos cerâmicos revestidos com esmalte vítreo.....	72
Figura 33 : Substrato cerâmico revestido com esmalte vítreo.....	72
Figura 34: Detalhe da balança eletrônica utilizada para pesagem do EPS e estearato de magnésio.....	74
Figura 35: Detalhe da preparação de solução com o EPS + solvente THF.....	74
Figura 36: Detalhe da aplicação da solução pela técnica de gotejamento.....	75

Figura 37: Detalhe da bomba de ar/ vácuo, aerógrafo e mangueiras.....	75
Figura 38: Detalhe da aplicação de revestimento através de aerógrafo.....	76
Figura 39 : Instrumento de FRX/EDX Shimadzu - Modelo EDX 720.....	77
Figura 40 : Goniômetro Kruss GMBH - Modelo DAS 100S.....	79
Figura 41 : Goniômetro Tilt Controller Phoenix - Phoenix Multi/Tilting.....	79
Figura 42 : Instrumento de DRX Shimadzu - Modelo XRD 7000.....	80
Figura 43.a.: Esquema de corte e observação através do MEV.....	81
Figura 43.b. : Detalhe do instrumento recobridor de amostras e do MEV Hitachi (Modelo-TM3000).....	81
Figura 44.a. : Sistema da Linha Média.....	83
Figura 44.b. : Instrumento de perfilometria Modelo Bruker Contour GT-K.....	85
Figura 45 - Configuração básica para medidas de resistividade superficial.....	86
Figura 46 - Câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	87
Figura 47 : Imagem de uma gota de água e de um substrato sem revestimento.....	89
Figura 48: Imagem de uma gota de água e de um substrato revestido com esmalte vítreo.....	90
Figura 49: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em silicone SIKA W (gotejamento).....	98
Figura 50: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em silicone SILISO (gotejamento).....	99
Figura 51: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + THF (gotejamento).....	99
Figura 52: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + THF+ Mg (2,2 %) (gotejamento).....	100

Figura 53: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + [Acetona+Ciclohexano (7:3)] (gotejamento).....	100
Figura 54: Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + [Acetona+Ciclohexano (7:3) + Mg (2,2 %)](gotejamento).....	100
Figura 55: Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS +Tolueno (gotejamento).....	101
Figura 56: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + Tolueno+ Mg (2,2 %) (gotejamento).....	101
Figura 57: Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + Clorofórmio (gotejamento).....	101
Figura 58: Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + Clorofórmio + Mg (2,2 %) (gotejamento).....	102
Figura 59: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em silicone SIKA W (aerógrafo).....	102
Figura 60: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em silicone SILISO (aerógrafo).....	102
Figura 61: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + THF (aerógrafo).....	103
Figura 62: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + THF+ Mg (2,2 %)(aerógrafo).....	103
Figura 63: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + [Acetona+Ciclohexano (7:3)] (aerógrafo).....	103
Figura 64: Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + [Acetona +Ciclohexano(7:3) + Mg (2,2 %)] (aerógrafo).....	105
Figura 65: Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS +Tolueno(aerógrafo).....	104
Figura 66: Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + Tolueno+ Mg (2,2 %)(aerógrafo).....	104

Figura 67: Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + Clorofórmio (aerógrafo).....	105
Figura 68: Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + Clorofórmio + Mg (2,2 %) (aerógrafo).....	105
Figura 69: Espectro do infravermelho do EPS comercial.....	106
Figura 70: MEV da superfície da amostra sem revestimento.....	110
Figura 71: MEV da superfície da amostra com revestimento em esmalte vítreo.....	111
Figura 72: MEV da espessura do revestimento com esmalte vítreo na amostra.....	111
Figura 73: MEV da superfície da amostra com revestimento de EPS+THF.....	112
Figura 74: MEV da espessura do revestimento de EPS+THF.....	112
Figura 75: MEV da superfície da amostra com revestimento de EPS+Tolueno.....	113
Figura 76: MEV da espessura do revestimento de EPS+Tolueno.....	113
Figura 77: MEV da superfície da amostra com revestimento de EPS+Clorof.....	114
Figura 78: MEV da espessura do revestimento de EPS+ Clorofórmio.....	114
Figura 79: Imagem tridimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 2 (amostra sem revestimento).....	116
Figura 80: Imagem bidimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 2 (amostra sem revestimento).....	116
Figura 81: Imagem tridimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 1 (com revestimento vítreo).....	117
Figura 82: Imagem bidimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 1 (com revestimento vítreo).....	118

Figura 83: Imagem tridimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 2 (EPS+Tolueno).....	119
Figura 84: Imagem bidimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 2 (EPS+Tolueno).....	119
Figura 85: Imagem tridimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 3 (EPS+Clorofórmio).....	120
Figura 86: Imagem bidimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 3 (EPS+Clorofórmio)	121
Figura 87 : Detalhe das amostras de EPS + Clorofórmio, EPS + Tolueno, EPS + THF, esmalte vítreo e sem nenhum revestimento <u>antes do</u> ensaio de UV.....	126
Figura 88 : Detalhe das amostras de EPS + Clorofórmio, EPS + Tolueno, EPS + THF, esmalte vítreo e sem nenhum revestimento <u>após</u> o ensaio de UV.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Classificação dos materiais isolantes em relação à sua estabilidade térmica em serviço (ABNT NBR 7034).....	28
Tabela 2 - Valores de resistividade elétrica de alguns materiais.....	30
Tabela 3 - Características de porcelanas para isoladores elétricos	35
Tabela 4 - Dados do setor de isoladores no Brasil.....	35
Tabela 5 - Classes de contaminação e caracterização ambiental.....	43
Tabela 6 - Composição do substrato cerâmico sem revestimento.....	88
Tabela 7 - Composição do substrato cerâmico com revestimento de esmalte vítreo.....	88
Tabela 8 - Resultados comparativos dos valores de ângulo de contato com aplicação por gotejamento de acordo com os regimes de molhabilidade definidos por (ZHIJIN, 2013).....	93
Tabela 8.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (ângulo de contato com aplicação por gotejamento).....	94
Tabela 8.b - Resultado Anova (Fator único) - ângulo de contato com aplicação por gotejamento.....	94
Tabela 9 - Resultados comparativos dos valores de ângulo de contato com aplicação por aerógrafo de acordo com os regimes de molhabilidade definidos por (ZHIJIN, 2013).....	96
Tabela 9.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (ângulo de contato com aplicação por aerógrafo).....	97
Tabela 9.b - Resultado Anova (Fator único) - ângulo de contato com aplicação por aerógrafo.....	97
Tabela 10 - Resultados de rugosidade da amostra sem revestimento por critério de Parâmetros RD (Restauração de Dados).....	115

Tabela 11 - Resultados de rugosidade da amostra com revestimento vítreo por critério de Parâmetros RD (Restauração de Dados).....	117
Tabela 12 - Resultados de rugosidade da amostra com revestimento em EPS+Tolueno por critério de Parâmetros RD (Restauração de Dados).....	118
Tabela 13 - Resultados de rugosidade da amostra com revestimento em EPS+Clorofórmio por critério de Parâmetros RD (Restauração de Dados).....	120
Tabela 14 - Resultados de rugosidade Sa das amostras ensaiadas por critério de Parâmetros RD.....	122
Tabela 14.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (Rugosidade Sa).....	122
Tabela 14.b - Resultado Anova - Rugosidade Sa (Fator único).....	122
Tabela 15 - Resultados de rugosidade Sq das amostras ensaiadas por critério de Parâmetros RD.....	123
Tabela 15.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (Rugosidade Sq).....	123
Tabela 15.b - Resultado Anova - Rugosidade Sq (Fator único).....	123
Tabela 16 - Resultados de rugosidade Sz das amostras ensaiadas por critério de Parâmetros RD.....	124
Tabela 16.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (Rugosidade Sz).....	124
Tabela 16.b - Resultado Anova - Rugosidade Sz (Fator único).....	124
Tabela 17 - Resultados obtidos de resistividade e condutividade elétrica.....	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 : Medidas do ângulo de contato em graus para substrato sem revestimento.....	90
Gráfico 2: Medidas do ângulo de contato em graus para substrato revestido com esmalte vítreo	91
Gráfico 3: Comparativo do valor médio das medidas de ângulos de contato obtidas.....	92
Gráfico 4: Espectro da difração de raios - X (revestimento esmalte vítreo).....	107
Gráfico 5: Espectro da difração de raios - X (revestimento em EPS +THF).....	108
Gráfico 6: Espectro da difração de raios - X (revestimento em EPS +Tolueno)..	109
Gráfico 7: Espectro da difração de raios - X (revest. em EPS + Clorofórmio).....	109

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ASTM = American Society for Testing and Materials

ABC = Associação Brasileira de Cerâmica

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEFET- MG = Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CELESC = Centrais Elétricas de Santa Catarina

CETESB = Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

IEC = International Electrotechnical Commission

MEV = Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR = Norma Brasileira

PIB = Produto Interno Bruto

PDMS = Polidimetilsiloxano

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Área da seção transversal;
- ϵ_0 - Permissividade do vácuo;
- ϵ_r - Permissividade relativa;
- i - Corrente elétrica;
- L - Comprimento;
- V - Tensão elétrica;
- σ - Condutividade;
- ρ - Resistividade;
- α - Coeficiente de expansão térmica linear;
- μm - Micrômetros
- δ - deformação angular simétrica no plano
- ω - deformação angular simétrica fora do plano

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
2. OBJETIVOS	25
2.1 Objetivo Geral.....	25
2.2 Objetivos Específicos.....	25
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1 Materiais Condutores e Isolantes.....	26
3.1.1 Condutores.....	26
3.1.2 Isolantes.....	26
3.2 Propriedades Elétricas dos Materiais Isolantes.....	29
3.2.1 Resistividade Elétrica.....	29
3.2.2 Rigidez Dielétrica.....	31
3.2.3 Constante Dielétrica.....	32
3.2.4 Resistência ao Arco.....	32
3.3 Isoladores Elétricos.....	32
3.3.1 Aspectos Gerais	32
3.4 Isoladores Elétricos de Porcelana.....	33
3.4.1 Características Gerais.....	33
3.4.2 Aspectos Econômicos.....	35
3.4.3 Comportamento Eletromagnético dos Materiais Cerâmicos.....	36
3.4.4 Esmaltes Cerâmicos.....	37
3.4.5 Distâncias de Projeto para Eficiência Elétrica.....	40
3.4.6 Principais Causas de Falhas.....	41
3.5 Alternativas para Atenuação de Flashovers.....	48
3.5.1 Aumento da Distância de Escoamento.....	48
3.5.2 Eliminação de Sujeira Através de Lavagens.....	49
3.5.3 Recobrimento com Esmaltes Semicondutores.....	51
3.5.4 Deposição de Polímeros Hidrofóbicos.....	51
3.6 Aspectos da Hidrofobia.....	52
3.6.1 Hidrofobicidade e Hidrofilicidade.....	52
3.6.2 Molhabilidade.....	56
3.6.3 Ângulo de Contato.....	56

3.7 Materiais Poliméricos	58
3.7.1 Características Gerais.....	58
3.7.2 Comportamento Elétrico dos Polímeros.....	60
3.8 Polímeros Hidrofóbicos.....	61
3.8.1 Silicone.....	62
3.8.2 Poliestireno (PS)	66
3.8.3 Poliestireno Expandido (EPS).....	67
4. METODOLOGIA.....	70
4.1 Materiais e Métodos.....	71
4.1.1 Substratos.....	71
4.1.2 Recobrimentos Utilizados	72
4.1.3 Preparação e Aplicação dos Revestimentos.....	73
4.2 Ensaio de Caracterização.....	77
4.2.1 Fluorescência de Raios X (FRX).....	77
4.2.2 Ângulo de Contato.....	78
4.2.3 Espectroscopia na Região de Infravermelho	79
4.2.4 Difração de Raios X (DRX).....	80
4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	81
4.2.6 Análise de Rugosidade das Superfícies por Perfilometria Óptica.....	82
4.2.7 Ensaio de Resistividade Elétrica.....	85
4.2.8 Envelhecimento Acelerado por Radiação Ultravioleta.....	86
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	88
5.1 Fluorescência de Raios X (FRX).....	88
5.2 Ângulo de Contato.....	89
5.3 Espectroscopia na Região de Infravermelho.....	106
5.4 Difração de Raios X (DRX).....	107
5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	110
5.6 Análise de Rugosidade das Superfícies por Perfilometria Óptica	115
5.7 Ensaio de Resistividade Elétrica.....	125
5.8 Envelhecimento Acelerado por Radiação Ultravioleta.....	126
6. CONCLUSÃO.....	128
7. AÇÕES FUTURAS.....	130
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131

APÊNDICE A - DADOS TÉCNICOS DO ESTEARATO DE MAGNÉSIO E SOLVENTES UTILIZADOS.....136

APÊNDICE B - TIPOS DE ISOLADORES.....138

1. INTRODUÇÃO

O tema proposto se refere à avaliação do desempenho de isoladores elétricos de porcelana por meio do uso de recobrimentos poliméricos hidrofóbicos, com o intuito de minimizar os problemas de descargas disruptivas que ocorrem nas linhas de transmissão e redes de distribuição de energia elétrica.

Tendo em vista as condições severas de trabalho em que são expostos, os isoladores devem apresentar notáveis características dielétricas, ótimas propriedades mecânicas, resistir bem aos choques térmicos suportando às exposições ao tempo, mesmo em atmosfera de elevado grau de poluição.

Sabe-se ainda que as linhas de transmissão e redes de distribuição elétrica no Brasil, demandam atenção especial no aspecto de manutenção para evitar a ocorrência de falhas e desligamentos. Com o intuito de assegurar a plena continuidade e bom funcionamento das mesmas, deve-se manter o monitoramento preditivo para a antecipação de possíveis falhas.

Uma das causas principais de interrupções e de diminuição de desempenho nas linhas de transmissão e redes de distribuição de energia elétrica são as correntes de fuga nos isoladores, que são intensificadas em ambientes sob poluição industrial ou com atmosfera muito salina.

Portanto, há a necessidade de diminuir estas perdas de energia elétrica visando desenvolver isoladores com melhor desempenho sob tais condições ambientais e reduzindo os prejuízos às empresas transmissoras e distribuidoras de energia elétrica. Estas podem sofrer muitos prejuízos com os isoladores danificados, em função da necessidade de manutenção e da energia que deixa de ser entregue aos seus clientes, podendo inclusive, sofrer prejuízos decorrentes dos pagamentos de indenizações por perdas e danos aos consumidores que forem lesados de alguma forma pela falta da energia.

Os isoladores elétricos mais usados são a base de porcelana com o recobrimento de uma camada fina e contínua de esmalte vítreo, que contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e elétricas. Esses isoladores cerâmicos apresentam um bom desempenho na transmissão de energia elétrica em grandes distâncias porque a porcelana apresenta propriedades adequadas, é um excelente dielétrico

e tem boa resistência superficial às intempéries. São inertes e estáveis, podendo suportar considerável quantidade de arcos elétricos sem degradação que comprometa a superfície por causa da capacidade de suportar descargas (LIMA, 2006).

Porém, um inconveniente desses isoladores é o fato das suas superfícies serem constituídas de óxidos metálicos que possuem alta molhabilidade. Essa característica pode ocasionar a formação de película de água que, se for contínua por toda a altura do isolador, é capaz de conduzir corrente elétrica e fechar um arco (conhecido como *flashover*).

Em decorrência disso, pode haver a interrupção da passagem de energia elétrica pela linha ou rede. Esse problema vem se agravando com o aumento da poluição ambiental, pois ela e os sais com o decorrer do tempo, vão se depositando sobre a superfície dos isoladores até alcançar uma concentração tal que, em um momento de chuva ou neblina, podem tornar a película contínua condutora e causar o *flashover* (LIEBERMANN, 2002).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Identificar e avaliar polímeros hidrofóbicos para o recobrimento da superfície de isoladores elétricos de porcelana usados em linhas de transmissão e redes de distribuição de energia elétrica.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos estabelecidos são:

- Avaliar através de medidas de ângulo de contato, o comportamento das amostras de substratos cerâmicos de isoladores de porcelana sem recobrimento e com o recobrimento de esmalte vítreo comum, o qual servirá de padrão para comparações de resultados com os outros recobrimentos definidos.
- Preparar os recobrimentos poliméricos a serem aplicados nas superfícies das amostras de substratos cerâmicos.
- Depositar os polímeros selecionados sobre a superfície dos substratos cerâmicos sem nenhum recobrimento, empregando as técnicas de aplicação por gotejamento e dispersão por aerógrafo.
- Avaliar o comportamento dos polímeros aplicados no recobrimento das amostras de substratos cerâmicos, através de medidas de ângulo de contato, a fim de selecionar a técnica e os polímeros mais promissores no que se refere à hidrofobicidade.
- Caracterizar os revestimentos poliméricos que obtiveram maiores valores nas medições no ensaio de ângulo de contato, empregando as técnicas de Espectroscopia na região do infravermelho (IV), difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), rugosidade através de perfilometria óptica 3D e 2D, resistividade elétrica e avaliação do envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta (UV).
- Avaliar e classificar o desempenho dos polímeros considerados mais promissores, em função dos diversos ensaios realizados e resultados obtidos.

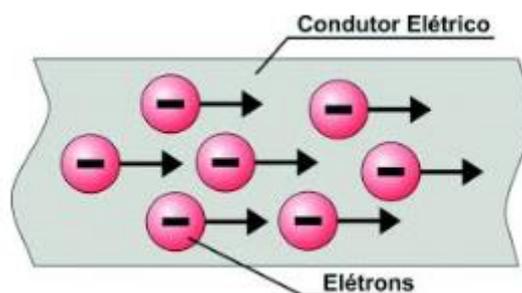
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATERIAIS CONDUTORES E ISOLANTES

3.1.1 Condutores

Os materiais condutores de eletricidade caracterizam-se por terem muitos elétrons livres, os quais são elétrons das órbitas mais distantes do núcleo do átomo e que se encontram mais fracamente ligados ao mesmo. A própria energia térmica à temperatura ambiente, é suficiente para gerar uma grande quantidade de elétrons livres em alguns materiais, como nos metais. Essa enorme quantidade de elétrons livres nos materiais condutores faz com que eles possam se movimentar livremente, sem nenhuma resistência, conduzindo facilmente a eletricidade. Tal situação pode ser verificada na Figura 1, a seguir:

Figura 1 - Detalhe de um material condutor



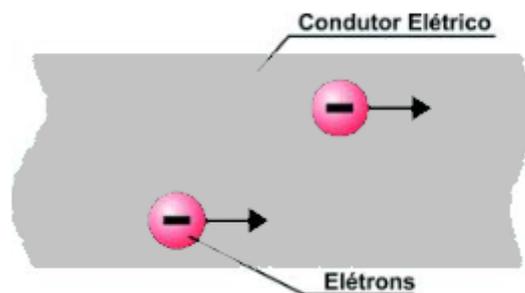
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Os melhores condutores são a platina, o ouro, a prata, o cobre e o alumínio. Ao longo dos anos, o cobre tem sido o mais utilizado, sobretudo na fabricação de condutores isolados, devido principalmente às suas propriedades elétricas e mecânicas (CRUZ e ANICETO, 2011).

3.1.2 Isolantes

Os materiais isolantes, ao contrário dos condutores, caracterizam-se por terem pouquíssimos elétrons livres, de modo que eles não permitem facilmente, a condução da eletricidade, oferecendo bastante resistência a ela (CRUZ e ANICETO, 2011). Tal situação pode ser verificada na Figura 2 (p.27).

Figura 2 - Detalhe de um material isolante



Fonte: Produzida pelo próprio autor

Muitas das substâncias industrialmente empregadas como isolantes não são inteiramente homogêneas, especialmente as de origem orgânica. Uma primeira classificação dos isolantes pode ser feita de acordo com o seu estado:

I - Gases: ar, anidrido carbônico, azoto, hidrogênio, gases raros, hexafluoreto de enxofre.

II - Líquidos:

a) Óleos minerais: óleos para transformadores, interruptores e cabos; b) Dielétricos líquidos à prova de fogo: Askarel; c) Óleos vegetais: tung, linhaça; d) Solventes: (empregados nos vernizes e compostos isolantes) - álcool, tolueno, benzeno, benzina, terebentina, petróleo, nafta, acetatos amílicos e butílicos, tetracloreto de carbono e acetona.

III - Sólidos aplicados em estado líquido ou pastoso:

a) Resinas e plásticos naturais: resinas fósseis e vegetais, materiais asfálticos, goma laca; b) Ceras: cera de abelhas de minerais, parafina; c) Vernizes e lacas: preparados de resinas e óleos naturais, produtos sintéticos, esmaltes para fios, vernizes solventes, lacas; d) Resinas sintéticas: (plásticos moldados e laminados) resinas fenólicas, caseína, borracha sintética, silicones; e) Compostos de celulose: (termoplásticos) - acetato de celulose, nitrocelulose; f) Plásticos moldados a frio: cimento Portland empregado com resinas ou asfaltos.

IV - Sólidos:

a) Minerais:quartzo, pedra sabão, mica, mármore, ardósia, asbesto; b) Cerâmicas: porcelana, vidro, mica; c) Materiais da classe da borracha: borracha natural, gutapercha, neoprene, buna; d) Materiais fibrosos (tratados e não tratados): algodão, seda, linha, papel, vidro, asbesto, madeira, celofane, rayon e nylon.

Além da classificação cujo critério é a natureza dos materiais isolantes, os isolantes podem ser classificados visando a sua aplicação, especialmente na construção de máquinas e aparelhos elétricos, cuja temperatura é limitada não pelos materiais condutores ou magnéticos (que são metálicos) e sim pelos isolantes. A durabilidade destes depende de fatores diversos, entre os quais predomina a temperatura, como mostrado na Tabela 1. A duração dos materiais utilizados para isolamento de máquinas e aparelhos elétricos depende de vários fatores, tais como a temperatura, os esforços elétricos e mecânicos, as vibrações, a exposição a produtos químicos, umidade e a sujeira de qualquer espécie.

Tabela 1 - Classificação dos materiais isolantes em relação à sua estabilidade térmica em serviço

Classe	Temperatura máxima admissível em serviço
Y(O)	90°C (algodão, seda e papel sem impregnação)
OA	105°C (algodão, seda e papel com impregnação)
OE	120°C (alguns vernizes, esmaltes e fibras)
OB	130°C (mica, asbesto com aglutinante, EPR)
OF	155°C (mica, fibra de vidro com aglutinante)
OH	180°C (elastômeros de silicato)
OC	>180°C (porcelana, vidro, quartzo, cerâmicas)

Fonte: (ABNT NBR 7034)

Reconhece-se que os materiais isolantes poderão não suportar as temperaturas a eles atribuídas na classificação acima, se estas forem mantidas durante tempo ilimitado. Essas temperaturas, todavia são tais, que permitirão uma duração adequada do material se forem mantidas durante longos períodos de tempo com temperatura mais baixa. As normas de equipamentos elétricos especificam geralmente a elevação de temperatura permissível acima do ar ambiente ou de outro meio refrigerante (ANDREOLI, 2010).

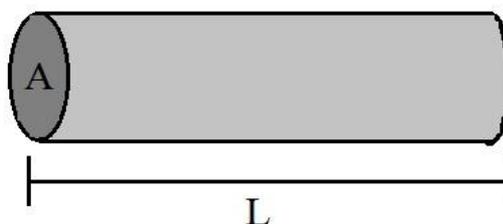
3.2 PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS MATERIAIS ISOLANTES

Para um melhor entendimento dos materiais isolantes, deve-se salientar e detalhar algumas de suas propriedades elétricas fundamentais, tais como: resistividade elétrica, rigidez dielétrica, constante dielétrica, resistência ao arco e tensão disruptiva).

3.2.1 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica é uma medida da oposição de um material ao fluxo de corrente elétrica. Quanto mais baixa for a resistividade, mais facilmente o material permite a passagem de uma carga elétrica. Sua unidade no SI é ohm metro (Ωm). Para entender a resistividade elétrica, vejamos primeiro o conceito de resistência elétrica. Quando um material é submetido a uma diferença de potencial, é estabelecida uma corrente elétrica entre os seus terminais, que é caracterizada pelo movimento das cargas de elétrons livres em seu interior. Durante esse movimento desordenado, vários elétrons chocam-se uns com os outros e com os átomos que constituem o condutor (normalmente algum metal), dificultando a passagem da corrente elétrica. Este fenômeno é denominado resistência elétrica (SARAIVA, 1988). A resistência elétrica depende das características e do material de que é feito o condutor, conforme observa-se na Figura 3, a seguir:

Figura 3 - Condutor de eletricidade com área de seção transversal A e comprimento L



Fonte: Produzida pelo próprio autor

Quanto maior for a área de seção transversal A , menor será a resistência do condutor, uma vez que é mais fácil a passagem das cargas elétricas por uma área maior. Quanto maior for o comprimento L do condutor, maior será a resistência, pois maior será o espaço que as cargas elétricas percorrerão, aumentando a probabilidade de colisões internas e perda de energia. A natureza elétrica do material também influencia na resistência: quanto maior for a quantidade de elétrons livres, maior será a facilidade de uma corrente elétrica ser estabelecida. Essa característica específica de cada material é a resistividade elétrica. A Tabela 2 descreve o valor de resistividade de determinados materiais.

Tabela 2 - Valores de resistividade elétrica de alguns materiais

Material	Resistividade ($\Omega.m$)
Prata	$1,6.10^{-8}$
Cobre	$1,7.10^{-8}$
Ouro	$2,4.10^{-8}$
Silício	$2,5.10^2$
Vidro	10^{10} a 10^{13}
Cerâmica	10^{10} a 10^{14}
Borracha	10^{13}

Fonte: Teixeira (2017)

Salienta-se ainda que conhecendo essas relações de proporcionalidade entre a resistência e as dimensões do material condutor, pode-se obter a Equação (1) para a resistência elétrica:

$$R = \rho.L/A \quad (1)$$

Sendo que:

ρ é a resistividade elétrica específica do material;

L é o comprimento do condutor;

A é a área de seção transversal do material condutor.

A equação (1) acima pode ser reescrita para que obtenha-se matematicamente, a resistividade elétrica do material, segundo a Equação (2):

$$\rho = R.A/L \quad (2)$$

Pode-se observar que os materiais que possuem maior resistividade elétrica são os isolantes. Sendo assim, apresentam menor resistência elétrica e, por isso, os mais indicados a serem utilizados nas linhas de transmissão e redes de distribuição de eletricidade. O valor da resistividade nem sempre é constante, pois ela aumenta com a temperatura. Isso ocorre porque o calor aumenta a agitação atômica, ocasionando colisões no interior do condutor, o que aumenta a resistência do material (TEIXEIRA, 2017). A relação entre a temperatura e a resistividade elétrica é dada pela Equação (3):

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (3)$$

Sendo que:

ρ_0 é a resistividade do material a uma temperatura inicial t_0 , que normalmente é considerada de 20°C .

3.2.2 Rigidez Dielétrica

A rigidez dielétrica é uma propriedade que indica em que grau um material é isolante. É medida pela tensão elétrica que o material pode suportar antes da ocorrência da perda das propriedades isolantes sendo expressa em V/mm.

A falha do material é revelada pela excessiva passagem da corrente elétrica, com a destruição parcial da peça (MANO, 2003).

Salienta-se ainda que a rigidez dielétrica de uma superfície isolante se reduz quando submetida a condições climáticas como chuva ou alta umidade, e se torna ainda mais acentuada quando a superfície isolante é exposta a uma atmosfera poluída. Uma atmosfera poluída, do ponto de vista elétrico, é uma atmosfera que propicia a formação, sobre a superfície isolante, de uma camada constituída por substâncias que quando dissolvidas em água produzem soluções condutoras. Se ocorrer um processo de umidificação, que dissolva os sais contidos na camada, pode ocorrer a formação de arcos elétricos sobre a superfície, iniciando um processo que poderá terminar em uma descarga elétrica. Os arcos elétricos formados, também geram ozônio (agente oxidante), que é responsável pela corrosão elétrica nos materiais (MELLO *et al.*, 2001; TOPALIS *et al.*, 2001).

3.2.3 Constante Dielétrica

É a medida da capacidade do material de armazenar cargas elétricas e traduz, a razão entre a permissividade de um meio (que é uma constante física que descreve como um campo elétrico afeta e é afetado nesse meio) e a permissividade do vácuo ϵ_0 . É também chamada com frequência, de constante dielétrica relativa ou permissividade relativa ϵ_r (CALLISTER, 2012).

3.2.4 Resistência ao Arco

É uma medida das condições de perda das propriedades dielétricas ao longo da superfície de um material isolante, causada pela formação de caminhos condutivos na superfície do mesmo. Altos valores de resistência ao arco indicam maior resistência à falha elétrica (MANO, 2003).

3.3 ISOLADORES ELÉTRICOS

3.3.1 Aspectos Gerais

Os isoladores elétricos usados em linhas de transmissão e redes de distribuição elétrica, são dispositivos que tem a principal finalidade de assegurar o isolamento dos condutores entre si e a terra, além de serem responsáveis pelos esforços mecânicos de sustentação e fixação dos mesmos. Existe uma tendência natural que muitas vezes leva os técnicos do setor elétrico a não priorizarem a importância que os isoladores elétricos possuem na performance dos sistemas de energia. Afinal de contas, especialmente quando falamos de isoladores, estamos focando componentes de elevadíssima robustez elétrica e mecânica, estáticos e que parecem não ter a mesma complexidade estrutural de outros componentes da instalação. Mas os isoladores elétricos são componentes cujos processos de engenharia, produção, testes e aplicação em campo são muito mais complexos do que se pode julgar em um primeiro olhar. Presentes em todas as linhas de transmissão, redes de distribuição, subestações, usinas e equipamentos elétricos de relevância no sistema elétrico, os isoladores são utilizados em qualquer nível de tensão (da baixa tensão até os 800.000 V no caso do Brasil ou 1.000.000 V em alguns sistemas asiáticos). Os principais tipos de isoladores existentes no

mercado fornecedor são os de vidro, cerâmicos e poliméricos. Os isoladores mais utilizados nos sistemas elétricos são os fabricados com porcelana vitrificada e vidro temperado, devido às suas propriedades mecânicas e elétricas, preços reduzidos das matérias-primas, processos de fabricação mais simples e a elevada rigidez dielétrica dos mesmos. Sabe-se também, que os isoladores são os elementos mais vulneráveis das linhas e redes elétricas de distribuição. Por isso, as concessionárias investem na conscientização das populações, no intuito de coibir as ações de vandalismo que danificam os isoladores, que provocam interrupções da energia elétrica e custos de manutenções corretivas. No que se refere à sua função de suportabilidade mecânica, os isoladores são submetidos à solicitações mecânicas de três tipos : forças verticais que são devidas ao próprio peso dos condutores, forças horizontais axiais no sentido dos eixos longitudinais das linhas para que os condutores se mantenham suspensos sobre o solo e forças horizontais transversais, em sentido ortogonal (perpendicular) aos eixos longitudinais das linhas, devido à ação da pressão do vento sobre os próprios cabos. Esses esforços são transmitidos pelos isoladores às estruturas que devem absorvê-los. Já no que se diz respeito às solicitações de natureza elétrica a que um isolador deve resistir, salienta-se as tensões mais elevadas que podem ocorrer nas linhas e redes elétricas, as quais são: tensão nominal e sobretensões em frequência industrial, surtos de sobretensão de manobra que são de curta duração, e que podem atingir níveis de 3 a 5 vezes a tensão normal entre fase e terra e por fim, sobretensões de origem atmosférica, cujas intensidades podem ser muito elevadas e variadas (FUCHS, 1977).

3.4 ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA

3.4.1 Características Gerais

As porcelanas são cerâmicas produzidas com matérias-primas naturais e utilizadas na fabricação de uma grande variedade de produtos, para aplicação na indústria eletroeletrônica. Os isoladores elétricos de porcelana estão classificados no segmento chamado de “cerâmica branca” e para a sua fabricação, são

utilizados os seguintes componentes principais: o quartzo, feldspato, argila, caulim e alumina. O quartzo é uma das formas cristalinas da sílica (SiO_2), sendo as outras duas a cristobalita e a tridimita. Ele cristaliza no sistema hexagonal, apresenta densidade $2,65\text{g/cm}^3$, dureza 7 e ponto de fusão da ordem de $1.720\text{ }^\circ\text{C}$. O termo feldspato cobre uma série de alumino-silicatos alcalinos ou alcalinos terrosos. Os feldspatos naturais são normalmente uma mistura em diversas proporções de alumino-silicatos de potássio, de sódio, de cálcio, de lítio e ocasionalmente de bário e de cério. A argila é um material natural, de textura terrosa, de granulação fina, constituída essencialmente de argilominerais, outros minerais que como quartzo, mica, pirita, hematita, etc, matéria orgânica e outras impurezas. Os argilominerais são os minerais característicos das argilas sendo que quimicamente são silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, contendo em certos tipos, outros elementos como ferro, potássio, lítio e outros. O termo caulim deriva da palavra Kauling (colina alta, em chinês), originário da colina de Jauchau Fu, ao norte da China, de onde o material tem sido obtido há décadas. É um minério composto de silicatos hidratados de alumínio, como a caulinita e a haloisita, e apresenta características especiais que permitem sua utilização na fabricação de papel, cerâmica, tintas, etc. É um dos seis minerais mais abundantes da crosta terrestre e ocorre à profundidade até 10 metros, fundindo-se a temperatura nominal de $1800\text{ }^\circ\text{C}$. A alumina apesar de ser um termo químico específico para definir o óxido de alumínio (Al_2O_3), na prática comercial existe uma grande variedade que recebem uma série de adjetivos, tais como calcinada, baixa soda, hidratada, gama, tabular, eletrofundida e outras. Para que tenham um bom desempenho é necessário que os isoladores tenham um formato que assegure uma distribuição balanceada de potenciais, visando tensões de descarga adequadas. Portanto, quanto à aplicação a que se destinam, há diversos modelos de isoladores de porcelana distintos: tipo disco, castanha, pino, bastão, pilar, roldana, suporte, pedestal e bucha (CETESB, 2006).

Os isoladores elétricos de porcelana devem possuir baixa porosidade, isenta de bolhas de ar e impurezas, além de apresentar alta resistência mecânica e ao impacto. A superfície dos mesmos deve ser cuidadosamente vitrificada a fim de vedar os seus poros, impedindo a absorção da água e evitando a redução de sua resistência dielétrica. A vitrificação deve ser resistente a temperaturas elevadas,

devendo resistir ao calor oriundo de eventuais arcos elétricos, sem se danificar. Contudo, a grande dificuldade da eletrocerâmica, consiste na obtenção de peças espessas e de grandes dimensões capazes de satisfazer tais exigências (FUCHS, 1977).

As propriedades dielétricas da porcelana são dependentes de um grande número de parâmetros, entre os quais se destacam a composição química, a espessura, as condições superficiais e a temperatura de sinterização (processo no qual após compactação, ocorre o tratamento térmico, no qual a temperatura de processamento é sempre menor que a temperatura de fusão (SCHMIDT, 2010). A Tabela 3 detalha tais propriedades.

Tabela 3 - Características de porcelanas para isoladores elétricos

Propriedades	Porcelana para isoladores elétricos
Constante dielétrica (ϵ_r)	4 - 5,5
Rigidez dielétrica média a 60 Hz (Kv/mm)	100 - 200
Resistividade elétrica ($\Omega.m$)	$10^{10} - 10^{14}$
Peso específico (g/cm^3)	2,3 - 2,5
Resistência à tração (Kg/cm^2)	200 - 300
Resistência à compressão (Kg/cm^2)	4000 - 5000
Condutividade térmica ($W/cm \times ^\circ C$)	0,0015
Coefficiente de expansão térmica (20 -100 $^\circ C$)	$3,5 - 9,1 \times 10^{-6} / ^\circ C$

Fonte: Adaptado de Schmidt (2010)

3.4.2 Aspectos Econômicos

Os isoladores de porcelana estão entre os componentes mais produzidos no setor elétrico do Brasil representando um importante segmento de faturamento para o país. A Tabela 4 apresenta os levantamentos da Associação Brasileira de Cerâmica (ABC).

Tabela 4 - Dados do setor de isoladores no Brasil

Isoladores Elétricos de Porcelana	
Número de Empresas	6
Número de Fábricas	9
Capacidade Instalada (t/ano)	44.000
Produção (t/ano)	28.000
Faturamento (US\$ milhões)	39
Exportação (US\$ milhões)	13
Importação (US\$ milhões)	1,2
Empregos Diretos	1700

Fonte: Adaptado de Cetesb (2006)

A indústria cerâmica desempenha importante papel na economia do país, com participação estimada em 1% no PIB (Produto Interno Bruto). A evolução das indústrias brasileiras, em função da abundância de matérias-primas naturais, fontes de energia e disponibilidade de tecnologias embutidas nos equipamentos industriais fez com que diversos tipos de produtos do setor atingissem valores apreciáveis nas exportações do país. Em função de diversos fatores, como matérias-primas empregadas, propriedades e utilização dos produtos fabricados, diversos segmentos compõem o setor cerâmico, especialmente o de cerâmica branca, o qual compreende os produtos obtidos a partir de uma massa de coloração branca, em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor, como é o caso dos isoladores elétricos (CETESB, 2006).

3.4.3 Comportamento Eletromagnético dos Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são conhecidos pelo seu uso como isolantes elétricos. Como resultado de suas altas constantes dielétricas, suas reações piezoelétricas e seu comportamento dielétrico, os materiais cerâmicos atendem os fundamentos dos circuitos eletromagnéticos (VAN VLAC,1984).

Entretanto, materiais normalmente considerados isolantes podem falhar no isolamento, quando submetidos a altas tensões elétricas. Geralmente esta falha é um fenômeno de superfície. No caso dos isoladores elétricos, os mesmos são projetados de forma a terem caminhos mais longos possíveis na sua superfície, a fim de se diminuir a possibilidade de um curto-circuito. Como há a possibilidade da existência da presença de poros e fissuras no processo de fabricação dos isoladores de porcelana, fato que facilita a condução elétrica, as superfícies dos mesmos geralmente são vitrificadas, o que as torna não absorventes. A falha de isolamento através do volume do material ocorre apenas em gradientes de tensão elétrica extremamente elevados (Figura 4 p.37).Um campo elétrico muito forte (o qual representa o gradiente de tensão elétrica em V/cm) , pode ser suficiente para romper os dipolos induzidos no isolador, e , quando se atinge o valor crítico dessa ruptura, o material deixa de ser isolante (VAN VLAC,1984).

Figura 4 - Exemplo de falhas ao longo da superfície de isoladores em função de misturas e contaminantes adsorvidos



Fonte: Van Vlack (1984)

3.4.4 Esmaltes Cerâmicos

Muitos produtos cerâmicos, como os isoladores elétricos e outros, recebem uma camada fina e contínua de esmalte cerâmico ou vidrado, que após a queima adquire o aspecto vítreo. Esta camada vítrea contribui para os aspectos estéticos, higiênicos e melhoria de algumas propriedades como a mecânica e a elétrica. Os esmaltes podem ser classificados em cru, de fritas ou uma mistura de ambos. Os esmaltes crus são constituídos de uma mistura de matérias-primas com pequena granulometria, sendo aplicada à superfície da peça cerâmica, na forma de suspensão. Na operação de queima, a mistura se funde e adere ao corpo cerâmico, adquirindo o aspecto vítreo durante o resfriamento. Esse tipo de vidrado é aplicado em peças que são queimadas em temperaturas superiores a 1200 °C, como sanitários e peças de porcelana e também podem ser aplicados em isoladores elétricos. Os esmaltes de fritas são obtidos a partir da aplicação das fritas sobre os suportes. As fritas cerâmicas são vidros preparados e fabricados a partir da fusão de diferentes matérias-primas em temperaturas elevadas e submetidas a um resfriamento rápido em ar ou água, resultando num material não cristalino, fragmentado com determinado tamanho de partículas e com a mesma estrutura vítrea. Os esmaltes contendo fritas são utilizados em produtos submetidos a temperaturas inferiores a 1200°C. As fritas devem apresentar as seguintes características: Expansão térmica similar ao suporte que

vai ser esmaltado, fusibilidade conforme o ciclo de queima, tensão superficial compatível com o uso, amplo intervalo de cura do esmalte, baixa solubilidade, menor custo possível da matéria-prima.

Após a moagem, as fritas são transformadas em partículas com tamanhos normalmente inferiores a 40µm, em moinhos de bola a úmido ou a seco, são misturadas, homogeneizadas e depositadas sobre um suporte cerâmico a verde (caracterizando o processo de monoqueima), onde a massa argilosa que constitui o suporte e o esmalte são queimados simultaneamente em temperaturas elevadas, entre 900°C e 1100°C, conferindo uma maior ligação do esmalte ao suporte, maior resistência à abrasão superficial, maior resistência química e mecânica, e uma absorção de água relativamente menor. Permite ainda, produzir peças com qualidades estéticas e excelentes características de resistência. O processo de biqueima, onde a sinterização é realizada apenas no esmalte, porque o suporte já sofreu processo de queima anterior, possui desvantagens em relação à monoqueima, como maior consumo de energia, maior ciclo de produção e mão-de-obra intensiva. A aplicação das fritas resulta em uma camada consolidada de partículas na superfície do suporte. Esta camada muito fina de partículas de fritas é aplicada a massa (suporte), que durante o processo de queima, sinteriza, ocorrendo várias transformações que depois do resfriamento consolida o esmalte sobre o suporte. Os métodos de aplicação das partículas sobre os suportes cerâmicos antes do processo de queima são realizados de duas formas diferentes: por via úmida e por via seca. No processo via úmida uma suspensão aquosa é preparada a partir das fritas e de algumas outras matérias-primas tais como o filito, talco, caulim e mais alguns tipos de argilas plásticas e não-plásticas. Depois de preparadas são aplicadas sobre o suporte cerâmico, mas antes disso, uma composição de engobe pode ser depositada na interface entre o suporte e o esmalte que tem a finalidade de melhorar a adesão entre eles e podendo também, atuar como filtro contra possível volatilização dos gases. Estes engobes devem possuir características tendendo ao branco para não interferir na coloração do esmalte, ter boa trabalhabilidade, ter ausência de fase vítrea pelo menos até 1000°C, inércia química, impermeabilidade a líquido após a queima e uma boa adesão à massa cerâmica após o processo de queima. No processo via seca, que ocorre após a preparação da superfície do suporte com aplicação de engobe, a

composição da mistura da matéria-prima, é realizada por moinhos a seco, onde as fritas obtidas são transformadas em partículas finas com forma e tamanhos ideais para serem aplicadas uniformemente na superfície do suporte cerâmico, previamente recoberto por uma camada de engobe, destinado a reter as partículas. Este processo é considerado pelos fabricantes, como sendo o mais econômico do que o processo por via úmida, porém a qualidade do produto acabado é inferior aos apresentados por via úmida. No recobrimento de isoladores no Brasil utiliza-se normalmente o processo via úmida e usualmente, não é aplicado o engobe. A maneira como os esmaltes são aplicados nos suportes depende da forma, do tamanho, da quantidade, da estrutura das peças e também dos efeitos que se deseja obter na superfície esmaltada. No caso dos isoladores elétricos a aplicação é feita por imersão (CETESB, 2006).

As composições dos esmaltes são inúmeras e sua formulação depende das características do corpo cerâmico, das características e propriedades finais do esmalte e do tratamento térmico. As matérias primas utilizadas para revestimentos em isoladores, podem ser classificadas na sua forma natural, encontradas livre na natureza ou combinadas, e mediante temperatura, juntas são transformadas em compostos com características ideais para a formação do esmalte. De acordo com a função do esmalte as matérias-primas podem ser classificadas em: modificadores ou fundentes como óxido de chumbo, magnésio, cálcio e sódio que tem a função de baixar a temperatura de fusão da mistura das matérias-primas; acessórios e aditivos (opacificantes, corantes e mateantes) que têm a função de conferir as propriedades finais do esmalte (óxidos de estanho, zircônio, antimônio, zinco, cromo, outros); intermediários ou estabilizantes (óxidos alumina, chumbo, outros) que tem a função de garantir estabilidade química do esmalte; formadores que tem a função de formar o corpo do esmalte cerâmico (óxidos de silício, boro, outros). As matérias-primas principais são constituídas de óxidos ácidos, básicos e anfóteros que são elementos responsáveis pela formação dos esmaltes cerâmicos com as características e qualidades desejadas. Existem também os elementos acessórios que são introduzidos na formulação dos esmaltes, quando necessário, sempre em quantidades pequenas e com uma função específica, como corantes, opacificantes e mateantes, para dar uma

tonalidade diferente ao esmalte (óxido de cromo, óxido de ferro, óxido de cobalto, óxido de cobre, óxido de manganês e óxido de níquel) (MAIA, 2003).

3.4.5 Distâncias de Projeto para Eficiência Elétrica

Para corpos geometricamente definidos, o grau de oposição à passagem da corrente elétrica é a resistência do componente, enquanto que a ocorrência de descarga elétrica caracteriza a ruptura elétrica do elemento. Assim, de acordo com o formato, um isolador pode apresentar ruptura dielétrica sob tensões mais elevadas que outro de mesmo material, porém com geometria diferente. Portanto, para uma maior eficiência elétrica na aplicação, existem limites e distâncias que devem ser bem definidas quando da elaboração dos projetos dos isoladores. No que se diz respeito a tais considerações, faz-se necessário esclarecer alguns conceitos os quais são citados abaixo, conforme (CELESC, 2009).

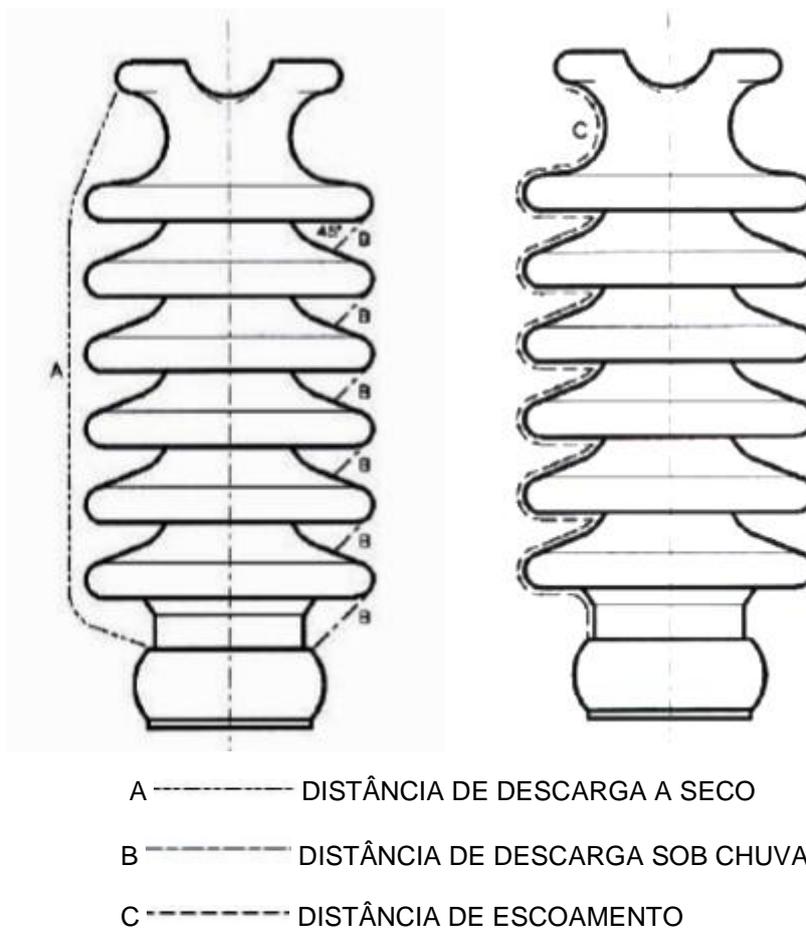
Distância de descarga a seco: É a distância que percorre o isolador desde o topo até a base, externamente às saias.

Distância de descarga sob chuva: É a distância que existe entre duas saias consecutivas do isolador e medida segundo um ângulo de 45°.

Distância de escoamento: É a distância medida entre o ponto de contato metálico energizado e o ponto de fixação do isolador, considerando todo o percurso externo entre os dois pontos.

Tais distâncias podem ser melhor entendidas respectivamente, conforme as letras A, B e C da Figura 5 (p.41).

Figura 5 - Detalhe de distâncias de projeto de isoladores



Fonte: Celesc (2009)

3.4.6 Principais Causas de Falhas de Isoladores

A diminuição da capacidade dielétrica de um isolador pode ter como origem um aumento da passagem da corrente elétrica de fuga (que é um fluxo de corrente anormal ou indesejada em circuito devido a caminhos de baixa impedância entre seus terminais, ou seja, o aumento da condutividade superficial). Este aumento se deve principalmente, ao grau de contaminação por agentes poluentes que modificam a resistividade elétrica da sua superfície. Estas contaminações podem ser o depósito de poeira, de minerais inertes condutivos como carbono e óxidos metálicos, soluções de água e sal conforme Figura 6 (p.42), as quais acarretam comportamentos semelhantes ao de um resistor variável e não-linear (varistor) , sendo em muitos casos, instáveis à presença de um campo elétrico (MELLO,2001).

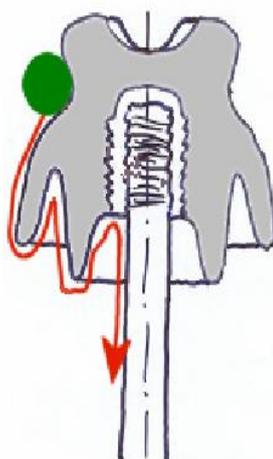
Figura 6 - Detalhe da contaminação em cadeia de isoladores



Fonte: Produzida pelo próprio autor

O fenômeno da condutividade superficial é mostrado na Figura 7 a seguir. Nela é evidenciado o fluxo de corrente mostrado em vermelho ao longo da superfície do isolador. Os principais processos de transporte e deposição de materiais na superfície dos isoladores e outros acessórios da rede elétrica são decorrentes de forças gravitacionais, atração eletrostática das partículas eletricamente carregadas, migração de partículas de alta permissividade para regiões com campo elétrico intenso e evaporação de soluções ou suspensões (PORTELLA, 2008).

Figura 7 - Fenômeno da condutividade superficial



Fonte: Ferreira (2004)

Salienta-se que os diferentes níveis de poluição em isoladores elétricos podem ser caracterizados em quatro níveis, segundo a norma IEC 60815 (Tabela 5 a seguir):

Tabela 5 - Classes de contaminação e caracterização ambiental

Classe de contaminação	Caracterização ambiental
I Baixo nível de Contaminação	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas sem instalações industriais. • Áreas agrícolas ou montanhosas. • Áreas distantes 10 km a 20 km do mar, não sujeitas à névoa salina.
II Médio nível de contaminação	<ul style="list-style-type: none"> • Área com indústrias que não emitem poluentes atmosféricos ou áreas com média densidade populacional e industrial. • Áreas com alta densidade populacional e/ou alta densidade de instalações industriais, freqüentemente expostas ao vento e/ou chuva. • Áreas distantes da costa (alguns quilômetros) e expostas a ventos marinhos.
III Alto nível de Contaminação	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas com desenvolvimento industrial, alta densidade demográfica ou grandes cidades. • Áreas marinhas, ou não, expostas a tempestades relativamente fortes.
IV Muito alto nível de Contaminação	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas expostas à intensa emissão industrial (poeira condutora ou fumaça). • Áreas próximas a costa marinha sujeitas a névoa salina e ventos marinhos fortes. • Áreas desérticas com extenso período sem chuva expostos a tempestades de areia, névoa salina e condensação regular.

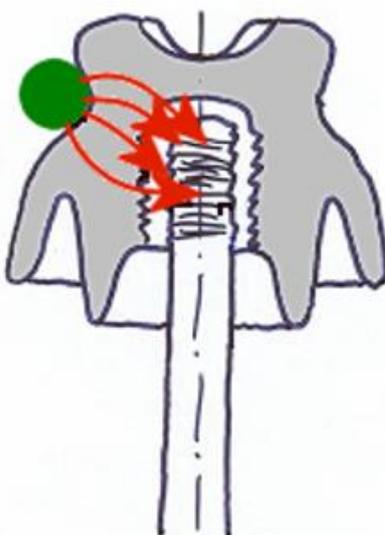
Fonte: Liebermann (2002)

Após todas as considerações citadas, vale lembrar que o problema da condutividade superficial pode ser melhorado aumentando-se a distância de escoamento com a associação de isoladores em série ou efetuando-se a limpeza preventiva dos isoladores. Conforme conceito já citado anteriormente para a distância de escoamento, pode-se afirmar que a referida distância está diretamente ligada à forma construtiva e ao comprimento do isolador. Os valores dessa grandeza, assim como, os diversos tipos de isoladores de porcelana utilizados e suas principais características são mostrados no Apêndice B, o qual é citado no final deste trabalho.

Outros fenômenos que podem ocorrer nos isoladores são a condutividade da massa do isolador, a perfuração da sua massa e a descarga disruptiva (o chamado *flashover*).

A condutividade da massa de um isolador é a perda da capacidade dielétrica do mesmo. É um incidente muito grave, mas com os materiais utilizados na sua fabricação, a corrente resultante pode ser considerada insignificante. O fenômeno citado é mostrado na Figura 8, onde o fluxo de corrente é mostrado em vermelho ao longo da sua massa.

Figura 8 - Detalhe da condutividade da massa de um isolador

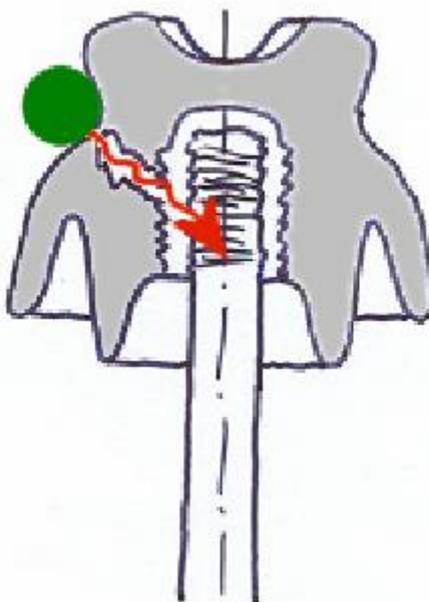


Fonte: Ferreira (2004)

Com relação à perfuração da massa de um isolador, em baixa tensão este problema praticamente não se coloca, dada a pequena espessura do mesmo, sendo possível garantir a homogeneidade do material que o constitui. Em alta e extra-alta tensão a espessura de um isolador é grande, o que implica em cuidadosos processos de fabricação de forma a evitar a existência de heterogeneidades no interior da massa do mesmo, que possam conduzir ao perigo de perfurações.

Caso as mesmas sejam verificadas, a rigidez dielétrica do isolador estará definitivamente comprometida e a energia que se desenvolve no seu interior, devido ao arco resultante, poderá levar à explosão do mesmo e à consequente queda do condutor. O fenômeno citado é mostrado na Figura 9, evidenciando-se o fluxo de corrente indicado em vermelho.

Figura 9 - Detalhe da perfuração da massa de um isolador



Fonte: Ferreira (2004)

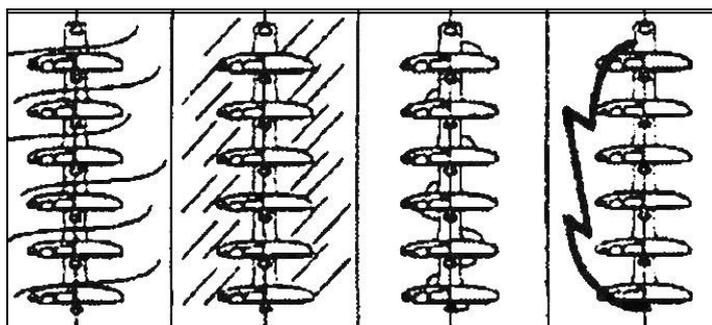
Já a descarga disruptiva é produzida através do ar sob o aspecto de uma faísca ou arco, ou ainda de um conjunto de faíscas e arcos, que estabelecem conexão elétrica entre as peças metálicas do isolador, submetidas à tensão de serviço. Sabe-se que a superfície do isolador é composta de óxidos metálicos que possuem alta energia superficial e que confere elevado caráter hidrofílico ao mesmo. Esta alta molhabilidade pode ocasionar a formação de uma película de água sobre a peça, que, se for contínua pode conduzir corrente e fechar um arco elétrico. Em decorrência disto fica incapacitada a transmissão e distribuição de energia elétrica pela rede, o que caracteriza a descarga disruptiva (o chamado *flashover*). O referido fenômeno é um problema que constantemente se agrava com o aumento contínuo da poluição e a crescente concentração de indústrias

próximas ao litoral. A poluição e os sais depositam-se com o passar do tempo sobre a superfície do isolador até alcançar uma concentração tal que, em presença de umidade, podem formar uma película contínua condutora e causar o flashover (LIEBERMANN, 2002).

A causa destas descargas é decorrente do depósito de resíduos de poluição ou névoa salina que, associados à presença de umidade, resultam em um eletrólito que permite a passagem de corrente ao longo do isolador. Com base nestes aspectos, há duas maneiras de se atuar sobre o problema: evitar a contaminação do isolador ou evitar a presença de umidade.

Para o entendimento da macrodinâmica de formação dos arcos, segue ilustração das etapas do processo conforme Figura 10, a seguir:

Figura 10 - Representação esquemática da ocorrência de flashover



a) Deposição de contaminantes; b) Umidificação da Superfície;
c) Formação de bandas secas e arcos parciais; d) *Flashover*

Fonte: Abdelaziz (2004)

a) Deposição de contaminantes: correntes de ar levam poluição seca à superfície do isolador.

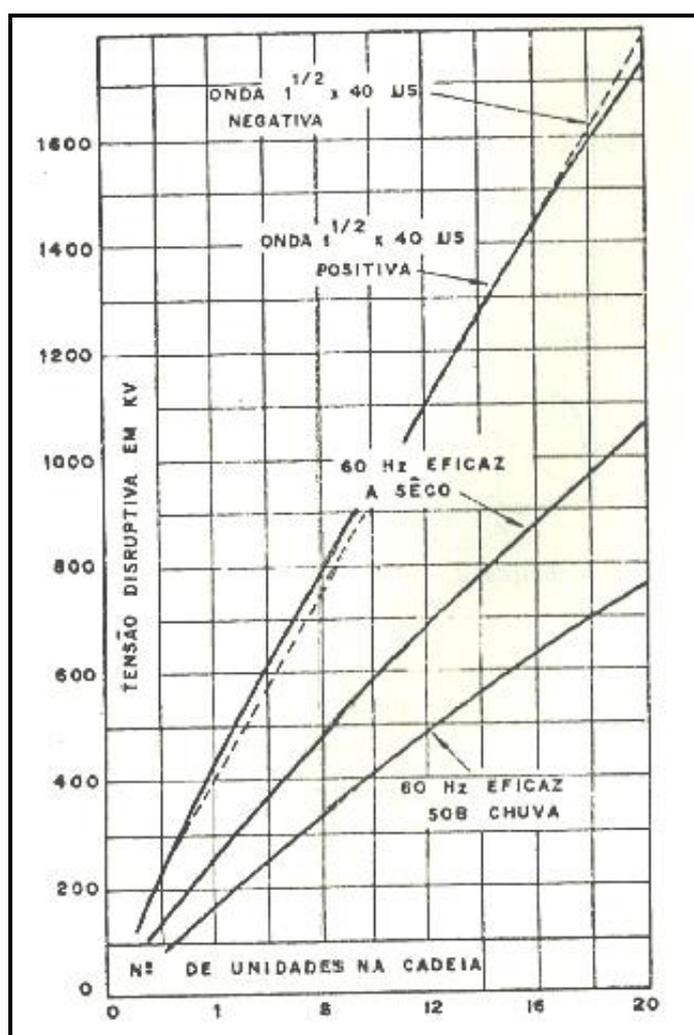
b) Umidificação da superfície: umidade, orvalho, névoas e chuvas umedecem a superfície do isolador, que dissolve os contaminantes e forma um eletrólito condutor. Este eletrólito diminui a resistência na superfície e uma corrente de fuga é gerada.

c) Aquecimento ôhmico e formação de bandas secas: a energia é dissipada pela corrente de fuga na forma de calor, o resultado é a evaporação da umidade. Devido à geometria do isolador a corrente tende a se concentrar em determinadas regiões (locais de menor secção reta), com isso, estas são secas mais

rapidamente. Devido à secagem não uniforme na superfície do isolador são formadas bandas secas, interrompendo o fluxo de corrente ao longo da superfície.

d) Formação de arcos parciais e correntes disruptivas: a tensão existente entre as bandas secas, que podem ter apenas alguns centímetros de altura, gera descargas no ar e a banda seca é ultrapassada por arcos elétricos. A corrente disruptiva (ou flashover) ocorre quando as descargas ultrapassam as regiões úmidas ainda existentes no isolador. A Figura 11 mostra um gráfico com detalhes dos valores de tensão disruptivas em função do número de unidades na cadeia de isoladores e a Figura 12 (p.48), mostra uma ocorrência de um *flashover* em isolador de uma linha de transmissão e em ensaio de isolador em laboratório.

Figura 11 - Valores de tensões disruptivas e de impulso a 60 Hz em cadeias de isoladores



Fonte: Fuchs (1977)

Figura 12 - Fenômenos de ocorrência do flashover em isolador de linha de transmissão e em ensaio de isolador em laboratório



Fonte: <http://www.wacker.com/cms/en/products>

A tendência é a utilização de projetos de isoladores com grandes distâncias de contorno, que permitem o funcionamento seguro do isolador ainda que em condições de condensação e deposição de poluentes ao longo do tempo (CAMARGO, 1984).

3.5 ALTERNATIVAS PARA ATENUAÇÃO DE *FLASHOVERS*

Tendo em vista os problemas gerados pelos *flashovers*, algumas alternativas são utilizadas no sentido de atenuar a sua formação.

3.5.1 Aumento da Distância de Escoamento

Refere-se ao aumento da distância de escoamento através da modificação do design do isolador. Atualmente uma distância mínima de escoamento (expressa em mm/kV) é adotada dependendo do grau de poluição existente. Porém, mesmo com a utilização de grandes distâncias, os *flashovers* não são evitados por completo.

3.5.2 Eliminação de sujeiras através de lavagens

Trata-se da eliminação da sujeira através de lavagens periódicas, sendo que além de dispendioso, é um processo que não soluciona por completo o problema, uma vez que o acúmulo de contaminantes ocorre entre os períodos das lavagens. O sistema de lavagem convencional utiliza a água como fluido de limpeza, a qual no final do processo, é totalmente descartada. Contudo, sabe-se que a água doce é um bem natural cada vez mais escasso e do ponto de vista ambiental, tal procedimento não é vantajoso. A frequência de lavagem dos isoladores depende do nível de contaminação dos mesmos e das condições ambientais, que no caso do Brasil, é mais relevante na região Nordeste, onde a ocorrência de chuvas é mais escassa.

A lavagem com o uso de água ocorre basicamente de 03 (três) formas:

a) Uso de uma estrutura através de um robô instalado em um braço hidráulico de um caminhão, via um sistema de bombeamento que pressuriza a água do tanque, sendo operado remotamente do solo por dois profissionais (COELCE, 2006).

Tal lavagem com o sistema citado, pode ser vista na Figura 13, a seguir:

Figura 13 - Sistema com robô instalado em berço hidráulico de caminhão com água pressurizada.



Fonte: Coelce (2006)

b) Uso de método de limpeza manual, onde um profissional se posiciona junto a estrutura e efetua a atividade de lavagem das cadeias de isoladores utilizando também água pressurizada. Contudo, a aplicação é feita manualmente, através de uma pistola adequada, sendo obrigatória a realização da atividade com a instalação desenergizada. Um outro profissional acompanha a atividade em solo para garantia de confiabilidade e segurança na execução da tarefa (COELCE, 2006). Tal lavagem é mostrada nas Figuras 14 e 15, a seguir:

Figura 14 - Lavagem convencional de isoladores de porcelana em linha de distribuição de forma manual com o uso de pistola com água pressurizada



Fonte: Coelce (2006)

Figura 15 - Lavagem convencional de isoladores de porcelana em subestação de forma manual com o uso de pistola com água pressurizada



Fonte: Coelce (2006)

c) Uso de helicóptero com o uso de pistolas com água pressurizada, o qual é mais utilizado para limpeza de isoladores de linhas de transmissão de alta tensão. Tal lavagem é mostrada na Figura 16.

Figura 16 - Lavagem de isoladores de porcelana através da utilização de helicóptero com o uso de pistola com água pressurizada



Fonte: <https://goo.gl/images/MqSr45>

3.5.3 Recobrimento com esmaltes semicondutores

Em um isolador fabricado com esmalte semicondutor, quando ocorre a formação de uma banda seca, isolante, a corrente elétrica tende a continuar em fluxo e, como a condutividade do esmalte é ligeiramente maior que a do ar, esta inevitavelmente busca o meio que oferece menor resistência à sua passagem.

Dessa forma, a corrente elétrica é desviada para a camada de esmalte que a distribui uniformemente e, devido ao efeito Joule, aquece a superfície e acelera sua secagem. Isto aumenta ainda mais a distância entre as bandas secas, o que dificulta a ocorrência de *flashover* (AGUIAR, 2004).

3.5.4 Deposição de polímeros hidrofóbicos

Uma vez que os materiais cerâmicos são tipicamente hidrofílicos, a utilização de recobrimento com polímeros hidrofóbicos repele as gotículas de água, o que dificulta a formação de uma película contínua condutora e a conseqüente passagem de corrente elétrica. Uma prática desenvolvida na década de 90 para dificultar o flashover, foi a de utilizar recobrimento de filmes de borracha de silicone

vulcanizada à temperatura ambiente sobre os isoladores cerâmicos. A finalidade é melhorar o desempenho elétrico na superfície em presença de poluição e maresia. Esta prática alia a resistência mecânica e dielétrica da cerâmica à hidrofobicidade do filme polimérico que repele a água e tem baixa aderência de impurezas. Nos isoladores, a película hidrofóbica cria um filme protetor sobre os isoladores cerâmicos, não deixando a água formar um caminho contínuo para a corrente de fuga. Desta maneira, os polímeros sobre a cerâmica retardam o aparecimento da corrente de fuga e uma conseqüente descarga disruptiva (LIEBERMANN, 2002).

Os isoladores com revestimento de silicone exibem um comportamento mais favorável frente às correntes de fuga. O *flashover*, ocorre somente em um nível muito elevado de contaminação. Esta característica superior surge da hidrofobicidade do silicone. A propriedade desse material em repelir a água, impede a formação de películas de água e de zonas contínuas de condução (LIEBERMANN, 2002).

Dentro do contexto em questão, salienta-se que existem atualmente no mercado empresas que prestam serviços de revestimentos em isoladores elétricos de porcelana com a finalidade de se obter uma superfície hidrofóbica, utilizando-se de diferentes formas de aplicação, como simples pintura, deposição através de PVD (Physical Vapor Deposition) ou mesmo Spraycoating, porém, com custos expressivos.

Salienta-se portanto, que esta alternativa é a que foi devidamente analisada e caracterizada no trabalho em questão, com ênfase a avaliar outras opções de polímeros hidrofóbicos com maior viabilidade econômica de aplicação.

3.6 ASPECTOS DA HIDROFOBIA

3.6.1 Hidrofobicidade e Hidrofilicidade

A hidrofobicidade define o baixo nível de molhabilidade, pela água, de uma superfície. Uma superfície hidrofóbica possui baixa tensão superficial e, portanto, é repelente à água.

A tensão superficial é uma região de espessura finita (usualmente menor que $0,1\mu\text{m}$) na qual a composição e a energia variam continuamente de uma fase de carga para outra.

Já a hidrofiliidade define o alto nível de molhabilidade, pela água, de uma superfície. Uma superfície hidrofílica possui alta tensão superficial e, portanto, não é repelente à água (ABNT IEC/TS 62073, 2010).

Como os materiais cerâmicos são normalmente hidrofílicos, em função do caráter covalente de suas ligações químicas, um filme de água é facilmente formado na superfície. Dessa forma, pode-se alterar o caráter de uma superfície de diversas maneiras, seja pelo recobrimento da superfície com polímeros ou outros compostos hidrofóbicos.

A superfície hidrofóbica funcionaria evitando a formação de um filme contínuo de água, uma vez que todo o vapor de água ou névoa salina que entre em contato com a superfície, forma pequenas gotículas que são facilmente removidas pela ação da gravidade.

A natureza é uma fonte de superfícies funcionais, em que plantas e animais desenvolveram superfícies com molhabilidades especiais (LI *et al.*, 2010). Estas superfícies naturais apresentam ângulos de contato com a água maiores do que 150° (ABBAS *et al.*, 2014). As asas de borboleta, pernas de insetos e a folha de lótus, são exemplos de superfícies naturais, em que a super-hidrofobicidade está associada à propriedade de autolimpeza.

Quando gotas de água caem sobre uma superfície super-hidrofóbica, elas adquirem um formato quase esférico e movem-se livremente sobre o material (BHUSHAN; JUNG 2009). Tal situação é mostrada na Figura 17(p.54). Neste processo as partículas de sujeira também se aderem às gotículas de água, gerando um efeito de autolimpeza. Esse comportamento incomum de molhamento é chamado de efeito Lotus (XUE *et al.*, 2009).

Figura 17 - Gotas de água na superfície da folha da flor de Lótus



Fonte: Pereira (2010)

A superfície da folha de lótus foi inspecionada por Barthlott (botânico alemão) em 1970, empregando a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ele verificou que a superfície da folha possuía microssaliências recobertas por substâncias com baixa energia superficial (ABBASET al., 2014). Anos mais tarde, Barthlott patenteou a sua descoberta sob o nome de Efeito Lótus - Lótus-Effect® (PEREIRA *et al.*, 2010).

As folhas de lótus repelem a água devido às suas características superficiais e à presença de papilas, saliências/nervuras com 10 a 20 μm de altura e 10 a 15nm de largura, nas quais se encontram as ceras epicuticulares, conforme mostrado na Figura 18. Essas ceras são compostas de uma mistura complexa de lipídios que permite a redução da área de contato entre as folhas e as gotas de água, tendo como consequência a hidrofobicidade característica das folhas de lótus (PEREIRA *et al.*, 2010).

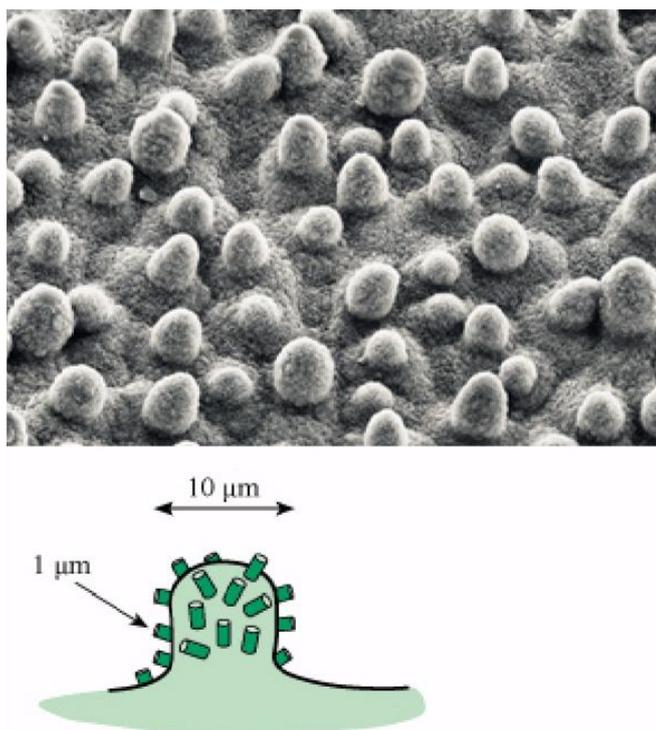
Figura 18 - Estruturas hierárquicas na superfície da folha de Lótus (papilas e as ceras epicuticulares)



Fonte: Dumé (2005)

O caráter super-hidrofóbico da folha de Lótus deve-se a uma combinação de fatores em sua superfície, microestruturas (células) e nanoestruturas (cristais de cera) que minimizam a área de contato superficial, como pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 - Micrografia de uma folha de Lótus e esquema das nano ceras



Fonte: DUMÉ (2005)

A dificuldade existente em produzir um isolador elétrico com a superfície super-hidrofóbica, como a folha de Lótus, é devido ao fato de que durante o transporte ou na colocação pode haver choques e arranhões nas superfícies, dessa forma as microestruturas ou nanoestruturas podem ser danificadas e assim, não cumpririam a função para qual foram projetadas.

O desenvolvimento de superfícies super-hidrofóbicas é uma área de pesquisa com grande potencial de geração de conhecimento e inovação, e vem despertando interesses econômicos e comerciais, devido principalmente à propriedade de autolimpeza (LI *et al.*, 2010).

Tais superfícies são constituídas por uma combinação de materiais de baixa energia superficial com uma topografia específica com rugosidade. Estruturas em escalas micro e nano provaram ser vitais para geração de superfícies hidrofóbicas com propriedades autolimpantes (XUE et al.,2009).

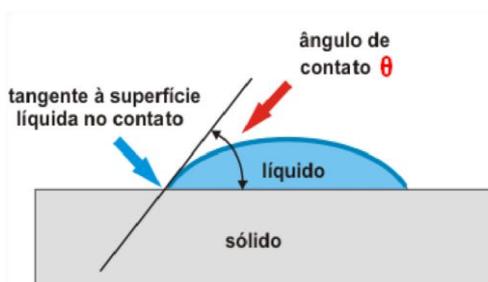
3.6.2 Molhabilidade

A molhabilidade e a repelência nas superfícies sólidas são propriedades importantes na seleção de materiais para determinadas aplicações industriais. A molhabilidade está associada à interação entre uma substância na fase líquida e a superfície de um material na fase sólida. Tal interação pode levar a três situações diferentes: o escoamento do líquido sobre a superfície na forma de gota, o espalhamento do líquido sobre a superfície ou a penetração do líquido nos poros da superfície (QUERE, 2008).

3.6.3 Ângulo de Contato

O método usado para determinar a hidrofobicidade de materiais é a medição de ângulos de contato entre as superfícies e uma gota de água. A medição do ângulo de contato, formado por um líquido sobre uma superfície sólida, permite avaliar a molhabilidade dessa superfície. Se esse líquido é a água, o ângulo de contato está diretamente relacionado com a hidrofobicidade da superfície. Portanto, quando uma gota de um líquido (mais comumente a água), repousa sobre uma superfície plana, o ângulo de contato é a medida do ponto em que a interface líquido-vapor encontra a superfície sólida, traçando-se uma reta tangente nesse ponto chamada de fronteira trifásica (CHOI *et al.*, 2009). A Figura 20 a seguir, detalha o processo dessa medição.

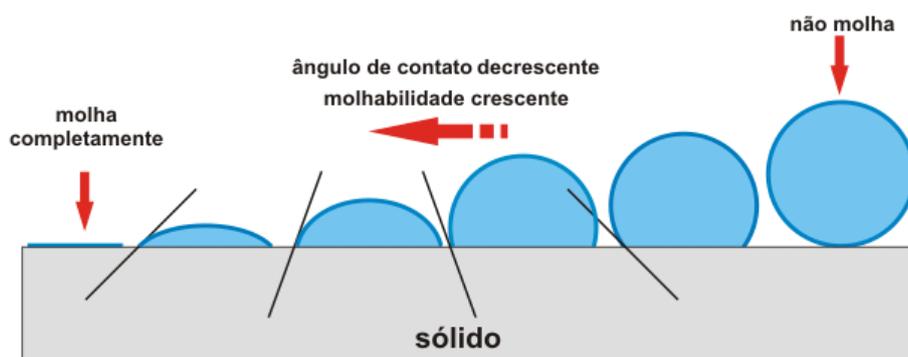
Figura 20 - Diagrama do ângulo de contato θ entre uma gota líquida e uma superfície plana horizontal



Fonte: Domínio Público

De modo geral, quanto maior o valor do ângulo de contato menor a molhabilidade da superfície até a situação em que o ângulo de contato se torna zero para superfícies que se molham completamente, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Ângulo de contato θ entre uma gota líquida e uma superfície plana horizontal x molhabilidade

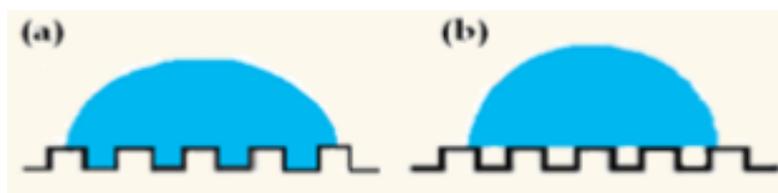


Fonte: Domínio Público

Quando as gotas de um líquido entram em contato com uma superfície sólida lisa e homogênea, elas estabelecem um ângulo de contato de equilíbrio.

No caso de superfícies não homogêneas há variação do molhamento ocasionando a histerese do ângulo de contato. Por outro lado, quando algumas gotas estão em contato com a superfície rugosa, que apresenta uma textura apropriada em sua superfície, o líquido não pode penetrar totalmente dentro da textura da superfície, formando assim uma interface composta, como mostrado na Figura 22. Essa interface composta aumenta a repelência ao líquido pela superfície, uma vez que a gota do líquido fica parcialmente no ar (CHOI *et al.*, 2009).

Figura 22 - Esquema ilustrativo de uma gota líquida em uma superfície homogênea (a) x heterogênea (b)



Fonte: Domínio Público

A molhabilidade das superfícies pode ser dividida em quatro regimes diferentes, de acordo com o ângulo de contato da água (ZHIJIN, 2013).

Regimes mais convencionais:

Hidrofílicos com ângulos de contato na faixa de $10^\circ < \theta < 90^\circ$

Hidrofóbicos com ângulos de contato na faixa de $90^\circ \leq \theta < 150^\circ$

Regimes menos convencionais:

Superhidrofílicos com ângulos de contato na faixa $0^\circ < \theta \leq 10^\circ$

Superhidrofóbicos com ângulos de contato na faixa de $150^\circ \leq \theta < 180^\circ$

3.7 MATERIAIS POLIMÉRICOS

3.7.1 Características Gerais

Os polímeros são macromoléculas orgânicas constituídos por unidades repetitivas ao longo da cadeia principal, chamadas de meros, que são ligados entre si por ligações covalentes. Os meros, ou reagentes de partida, são obtidos em grande parte do Petróleo e Gás, hulha, carvão mineral ou carvão de pedra e ainda produtos naturais (CALLISTER, 2012).

Quanto à sua natureza, os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Além das macromoléculas encontradas na natureza, muitos produtos químicos obtidos por via sintética podem apresentar longas cadeias e dentre eles, se encontram importantes materiais de engenharia. As propriedades dos polímeros dependem bastante dos materiais de partida (isto é os monômeros), além do tipo da reação empregada na sua obtenção e também da técnica de preparação. Há três tipos gerais de reação pelos quais se pode produzir um polímero: a poliadição, a policondensação e a modificação química de outro polímero. Conforme a natureza química do monômero, o tipo de reação visada e a aplicação desejada para o polímero, varia-se a técnica de sua preparação (em massa, em solução, em emulsão, em suspensão e interfacial (MANO, 2003)).

Por exemplo, o polietileno (PE), produzido a partir do monômero etileno (ou eteno), é composto pela repetição de milhares de unidades (meros), que neste

caso, são representados por $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)-$. Em alguns casos a repetição é linear e em outros são ramificadas ou conectadas formando retículos tridimensionais. Geralmente, o monômero é um líquido, vapor ou gás orgânico. Ele ainda pode estar unido a um elemento inorgânico. A obtenção do polímero ocorre normalmente por mecanismos químicos convencionais, resultando em materiais constituídos de estruturas químicas moleculares regulares e bem comportados (SHIRAKAWA e IKEDA, 1971).

Os polímeros podem ser classificados baseando-se em suas propriedades térmicas, como termofixos e termoplásticos. Os termofixos ou termorrígidos possuem em sua estrutura química uma grande quantidade de ligações cruzadas, dessa forma, depois de acabados, esses polímeros não fundem, mesmo sob adição de solvente. No geral, não são recicláveis (AZEREDO, 2010).

Os polímeros classificados como termoplásticos apresentam interações intermoleculares fracas entre suas cadeias, sendo possível reprocessá-los sob aquecimento. À temperatura ambiente, os polímeros podem ser maleáveis, rígidos e frágeis (RABELLO, 2011).

Segundo Rabello (2011), de forma geral os polímeros são leves, flexíveis, necessitam de baixas temperaturas de processamento, são resistentes a corrosão, possuem uma alta reciclabilidade, podem ser facilmente aditivados para ajuste de propriedades físicas, térmicas e mecânicas.

Os polímeros são amplamente utilizados, contudo quando comparados às cerâmicas e aos metais apresentam como desvantagem a sua baixa estabilidade térmica. Em temperaturas da ordem de 400°C eles degradam.

A principal característica que diferencia os materiais poliméricos dos outros tipos de materiais está relacionada à presença de cadeias moleculares de grande extensão constituídas principalmente por carbono. Em função do arranjo atômico e das ligações químicas presentes, os materiais poliméricos possuem: baixa densidade, baixa resistência ao calor e são bons isolantes térmicos e elétricos.

Os materiais poliméricos também experimentam deterioração nas interações ambientais. Essas degradações são de natureza físico-química e podem ocorrer de diversas maneiras. Por inchamento e por dissolução; por ruptura de ligações

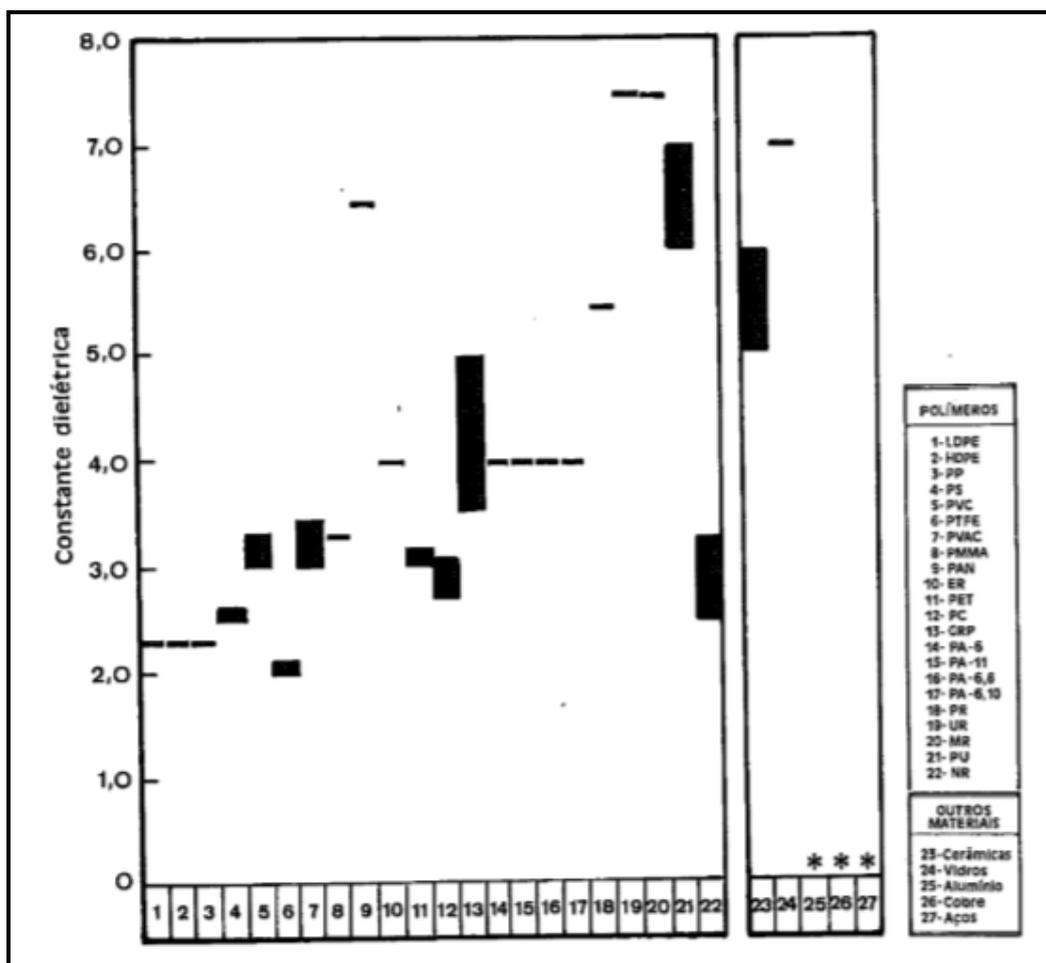
covalentes, como resultado da ação da energia térmica, de reações químicas e da radiação. Devido a complexidade química dos polímeros, os seus mecanismos de degradação não são bem compreendidos (CALLISTER, 2012).

3.7.2 Comportamento Elétrico dos Polímeros

Os polímeros possuem baixas condutividades elétrica e térmica, sendo altamente indicados para aplicações onde se requeira isolamento elétrico. A explicação está no fato de que os polímeros não contém elétrons livres, responsáveis pela condução de eletricidade nos metais. A adição de cargas especiais condutoras (limalha de ferro e negro de fumo) pode tornar polímeros fracamente condutores, evitando acúmulo de eletricidade estática, o que é perigoso em certas aplicações. A Figura 23 (p.61), detalha a constante dielétrica de diversos polímeros a 20 - 25°C, através de barras correspondentes aos números dos materiais indicados.

Além disso, apresentam ótimas vantagens, a saber: podem ser rígidos ou flexíveis, podem se constituir numa película bem fina e podem ser aplicados como um fluído parcialmente polimerizado em torno de um fio durante o processamento deste, formando uma camada uniforme que poderá ser polimerizada a *posteriori*. Alguns plásticos já tendem, naturalmente, a formar filmes e são particularmente úteis como materiais elétricos. É de particular importância o fato de que a predominância de ligações covalentes em todos os polímeros, limita a condução elétrica dos mesmos (VAN VLAC, 1984).

Figura 23 - Constante dielétrica de diversos polímeros a 20-25°C



Fonte: MANO (2003)

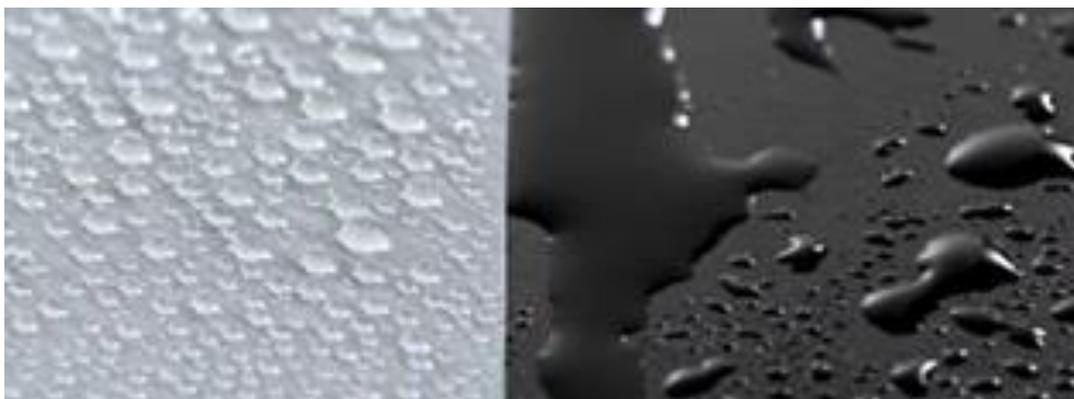
3.8 POLÍMEROS HIDROFÓBICOS

Em uma superfície hidrofóbica, a água coalesce em gotas separadas umas das outras por áreas secas, o que torna impossível a ocorrência de uma corrente de fuga, mesmo em níveis elevados de contaminação. Tais graus elevados de isolamento raramente são alcançados em isoladores de porcelana (Figura 24 p.62), mesmo com perfis adequados, a menos que sua superfície seja convertida de hidrofílica em hidrofóbica (LIEBERMANN, 2002).

A premissa para a aplicação de revestimentos nos isoladores elétricos de porcelana, é a de se utilizar materiais poliméricos de baixa energia superficial e que sejam resistentes ao trilhamento elétrico, às intempéries e à radiação ultravioleta.

Dentro desse contexto, a seguir será apresentada uma revisão bibliográfica com ênfase especial nos materiais poliméricos hidrofóbicos utilizados neste trabalho de pesquisa.

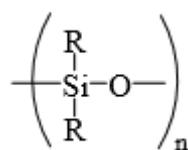
Figura 24 - Detalhe de superfície de isolador cerâmico com e sem revestimento hidrofóbico



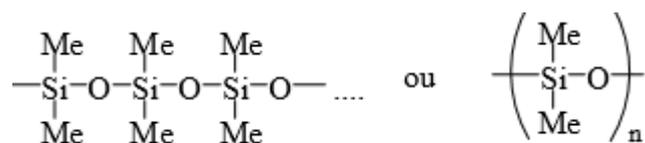
Fonte: <http://www.wacker.com/cms/en/products>

3.8.1 Silicone

Pela analogia com as cetonas, o nome “silicone” foi criado em 1901 por Kipping, para descrever novos compostos da fórmula bruta R_2SiO . Estes foram rapidamente identificados como polímeros, cuja fórmula correspondente pode ser indicada como:



O nome silicone foi adotado pela indústria e, geralmente, refere-se a polímeros lineares, onde $R = Me$, o polidimetilsiloxano (PDMS):



As resinas de silicone são geralmente preparadas por processo de hidrólise e autocondensação de compostos organossilícicos conhecidos como clorossilanos.

São polímeros de cadeia carbônica da classe dos heteropolímeros, apresentando uma ligação -SiO- formando a cadeia principal, sendo que as duas outras ligações do átomo de silício são com radicais metila - CH₃ (CANEVAROLO JR., 2002).

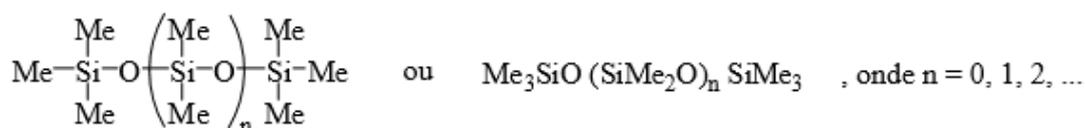
Os grupos metilas da cadeia podem ser substituídos por vários outros grupos (por exemplo, fenil, vinil ou trifluorpropil). A presença simultânea de grupos "orgânicos" ligados a uma coluna "inorgânica" proporciona aos silicones uma combinação única de propriedades. Devido a sua estrutura química ser formada por cadeias alternadas de átomos de silício e oxigênio, a resina de silicone apresenta características e propriedades particulares, diferentes dos outros tipos de resinas naturais e sintéticas. Os silicones suportam temperaturas de - 65°C a 400°C e são usados em inúmeros segmentos da indústria aeroespacial, eletroeletrônica, mecânica e construção civil, sem perder as suas características de impermeabilidade, elasticidade, brilho e, principalmente, em recobrimentos onde se requer alta resistência ao calor e a intempéries e são também usadas como produtos de secagem (NOLL, 1968).

O desenvolvimento da química dos silicones inclui vários marcos históricos e nomes famosos. Em 1871, Ladenburg observou que, na presença de um ácido diluído (dietildietoxissilano, $(C_2H_5)_2Si(OC_2H_5)_2$), houve o aparecimento de um óleo que se decompunha somente em temperaturas muito elevadas. Mas foi Kipping quem podemos chamar de pai dos silicones e da química organo-silício, porque foi ele que preparou, entre outras coisas, vários silanos por meio de reações do tipo Grignard, e a hidrólise de clorossilanos levou a "moléculas grandes". A natureza polimérica dos silicones foi confirmada pelos trabalhos de Stock. Na década de 1940, os silicones tornaram-se materiais comerciais, após Hyde da Dow Corning, que demonstrou a estabilidade térmica e alta resistência elétrica de resinas de silicone e Rochow da General Electric, que encontrou um método direto para preparar silicones a partir de Si metálico e cloreto de metila. Os primeiros elastômeros de silicone foram desenvolvidos na busca de melhores materiais isolantes para motores elétricos e geradores. Fibras de vidro impregnadas de resina eram os materiais mais avançados naquela época. O vidro era muito resistente ao calor, mas as resinas fenólicas não aguentaram as temperaturas mais altas, geradas pelos novos motores elétricos mais compactos e de altas rotações. Então os químicos da Corning Glass e da General Electric

pesquisaram materiais resistentes ao calor para utilização como aglutinantes resinosos. Em virtude destes estudos sintetizaram as primeiras resinas de silicone, mostraram seu bom funcionamento e indicaram rotas para produzi-las comercialmente. Corning Glass em uma joint venture com a Dow Chemical, criaram a Dow Corning em 1943 para produzir esta nova classe de materiais. As propriedades únicas dos silicones foram estudadas mais detalhadamente e o seu potencial para o uso mais amplo foi reconhecido. A General Electric abriu sua própria fábrica para produzir silicones em 1947 (agora Momentive Performance Materials). A Wacker Chemie no sul da Alemanha iniciou a produção de silicones também em 1947 e a empresa japonesa Shin-Etsu Chemical, começou a produção em massa de silicones em 1953.

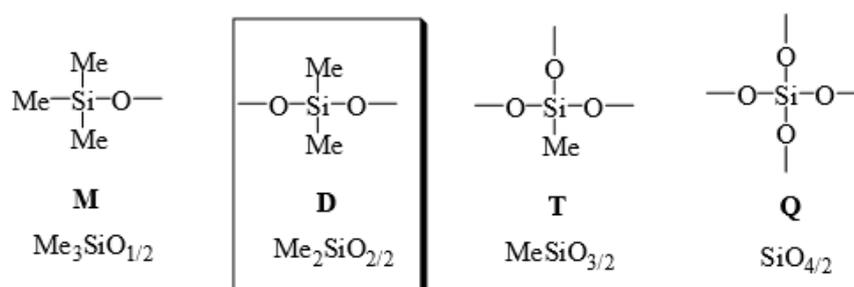
As empresas mencionadas são ainda hoje, os principais *players* neste setor industrial (FEARON,1986) e (ROCHOW,1987).

Os silicones mais comuns são os polidimetilsiloxanos terminados com grupos trimetilsililoxi, com a seguinte estrutura:



Estes são polímeros lineares e líquidos, mesmo aqueles com grandes valores de n . A principal unidade da cadeia, (SiMe_2O) , é muitas vezes abreviada pela letra D de “Difuncional”. Ela, quando ligada através de dois átomos de oxigênio forma o elo para o polímero linear. De um modo semelhante se explicam as siglas M, T e Q que corresponde às seguintes unidades conforme figura 25 a seguir:

Figura 25 - Estruturas das cadeias de silicones



Fonte: HARDMAN (1989)

Salienta-se que expressões semelhantes são comumente confundidas: O silício (Si, um elemento semimetálico), a sílica (SiO_2 , um composto inorgânico) e o silicone (um composto polimérico, contendo grupos orgânicos). Espécies monoméricas são denominadas por substituição baseado em SiH_4 (= silano; um composto volátil e pirofórico). Então, Me_2SiCl_2 é nomeado de dimetildiclorossilano (BURNS e LANE, 1996).

A extraordinária atividade superficial dos silicones se evidencia pelo fato de que o polidimetilsiloxano tem uma baixa tensão superficial (apenas 20,4 mN/m), sendo que a película de silicone é bastante hidrofóbica e proporciona uma superfície com boas propriedades de libertação, em particular, se a película for curada após a aplicação. Polidimetilsiloxanos são usados como ingredientes em inúmeros bens de consumo (por exemplo, em cosméticos ou produtos selantes domésticos), mas também em muitos processos industriais (por exemplo, agentes de desmoldagem, lubrificantes, líquidos hidráulicos e outros). Seu sucesso está acoplado à sua excelente resistência ao intemperismo: baixa reatividade dos grupos funcionais frente ao ar poluído ou água, a natureza hidrofóbica e a transparência frente à luz UV explicam o desempenho extraordinário dos silicones. Ainda outras propriedades tornam os silicones adequados como selantes da construção civil. Sua pigmentação é fácil já que são transparentes também nos comprimentos de onda da luz visível. As baixas interações entre as cadeias dos polissiloxanos (somente interações Van der Waals) explicam os baixos módulos destes elastômeros, o que reduz as tensões permanentes em juntas e aumenta a longevidade (OWEN, 2004).

Um grande número de estudos tem sido realizado para avaliar o destino e os efeitos de silicones sobre o ambiente ao longo do seu ciclo de vida. A produção de polidimetilsiloxanos é rigorosamente controlada e as emissões para o meio ambiente a partir desta etapa, são muito pequenas. Subsequentemente, o destino ambiental de silicones depende principalmente da forma física do material e o método de disposição. Silicones “sólidos” (por exemplo, elastômeros de silicone, vedantes, mangueiras) entram no ambiente como resíduo doméstico ou municipal, daí devem ser depositados em aterros ou incinerados. No último caso, eles são convertidos (no sentido reverso da sua síntese) a ingredientes inorgânicos: sílica amorfa, dióxido de carbono e vapor de água. Silicones

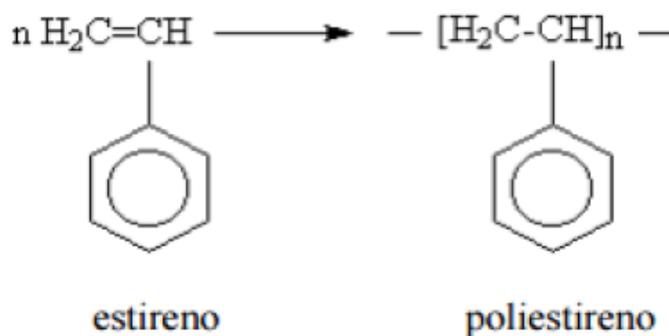
“líquidos” usados em produtos destinados a serem enxaguados, como shampoo e condicionadores de cabelo ou antiespumantes em detergentes, tornam-se parte de águas residuais municipais. O mesmo vale para silicones usados em produtos farmacêuticos, por exemplo, em antiflatulentes. Como a maioria dos silicones é praticamente insolúvel na água e em combinação com seu alto potencial de ligação para a matéria orgânica, eles são efetivamente removidos das águas residuais municipais e levados ao lodo, durante o tratamento das águas servidas. Amplos estudos mostram que mais de 95% dos silicones são removidos dos efluentes deste modo e que a concentração de silicones levados pelos efluentes está próximo do nível mínimo de detecção de 5 µg/l (WATTS,1995).

3.8.2 Poliestireno

As resinas de poliestireno (PS) possuem grande importância na indústria. Na década de 90 foi um dos termoplásticos mais consumidos, devido ao baixo custo, menor peso e boas propriedades elétricas(resistividade, rigidez e constante dielétrica), transparência, alto brilho e boa resistência a alguns ácidos fortes (FERRAROLI, 2003).

A Figura 26 ilustra as estruturas químicas do monômero estireno e do PS após polimerização desse monômero.

Figura 26 - Representação da estrutura do monômero estireno e do poliestireno (PS)



Fonte: Domínio Público

O PS tem a mesma composição (C_8H_8) do monômero de baixa massa molar, o estireno, de onde o poliestireno é sintetizado. O número de unidades repetitivas é indicado pelo índice n , que indica o grau de polimerização. No caso de graus comerciais do poliestireno, o valor médio de n pode ser 1000 ou superior. O estireno oligomérico com 7 unidades ($n=7$) é um líquido viscoso a temperatura ambiente, enquanto o PS comercial, de alta massa molar, é um sólido frágil que acima de 100°C deixa seu estado rígido (BORRELLY, 2002).

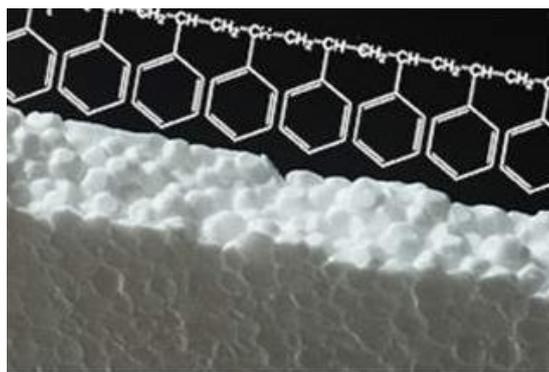
3.8.3 Poliestireno Expandido

O poliestireno expandido, o qual é conhecido comercialmente como Isopor®, é uma espuma rígida obtida por meio da expansão do poliestireno (PS) durante o processo de polimerização. Essa expansão é realizada injetando-se um agente químico na fase de reação da polimerização. O processo de fabricação do isopor é um processo que consiste em uma transformação física e, por isso, não interfere nas propriedades químicas do PS (FERREIRA, 2016).

O processo de produção do poliestireno expandido consiste inicialmente em expandir pérolas de até 3 milímetros de diâmetro. No processo de transformação, essas pérolas são submetidas à expansão de até 50 vezes o seu tamanho original, fundindo-se e moldando-se em formas diversas. O gás pentano é o mais utilizado como agente expansivo. Após a expansão a peça moldada contém até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno em volume. Em 1 m^3 de EPS expandido existem de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar (ABRAPEX, 2016).

Quimicamente, o EPS consiste de dois elementos, o carbono e o hidrogênio. O EPS não contém qualquer produto tóxico ou perigoso para o ambiente ou para a camada de ozônio, pois o gás contido nas células é o ar. Cabe ainda ressaltar as características ecológicas do EPS: além de ser 100% reciclável e reaproveitável, sua queima gera apenas gás carbônico e vapor de água, e quando depositado em aterros sanitários permanece inerte e não contamina o solo ou lençóis freáticos (OLIVEIRA, 2013). A Figura 27(p.68), detalha o poliestireno expandido(EPS).

Figura 27 - Detalhe do poliestireno expandido



Fonte: Domínio Público

O poliestireno expandido apresenta as seguintes vantagens em relação a outros materiais poliméricos:

- Baixa condutividade térmica: a estrutura de células fechadas, cheias de ar, dificulta a passagem do calor o que confere ao isopor um grande poder isolante.
- Baixo peso: as densidades do isopor variam entre os 10^{-3} kg/m³, permitindo uma redução substancial do peso das construções.
- Resistência mecânica: apesar de muito leve, o isopor tem uma resistência mecânica elevada.
- Baixa absorção de água: o isopor não é higroscópico. Mesmo quando imerso em água, o isopor absorve apenas pequena quantidade de água. Tal propriedade garante que o isopor mantenha as suas características térmicas e mecânicas mesmo sob a ação da umidade.
- Resistência ao envelhecimento: todas as propriedades do isopor mantêm-se inalteradas ao longo da vida do material, há estimativas de que em meio à natureza demore cerca de 150 anos para se degradar (FERREIRA, 2016; ABIQUIM, 2017).

O EPS está associado a um número cada vez maior de consumo: das bandejas de padarias e supermercados às embalagens de proteção e até peças da construção civil.

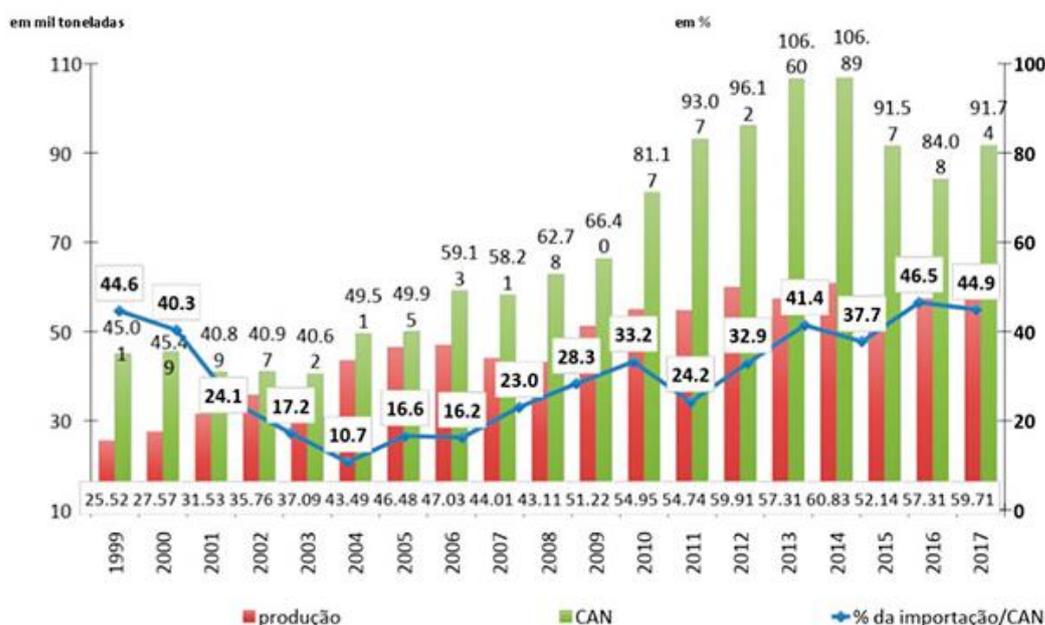
Além disso, foram produzidas 82,9 mil toneladas do material no Brasil em 2015 e outras 2 mil toneladas foram importadas junto a equipamentos eletrônicos e diferentes bens trazidos do exterior. Mas, ao contrário da crença espalhada no

país, o poliestireno expandido é totalmente reciclável e já existem várias empresas no Brasil que o reutilizam. A reciclagem consiste na transformação do isopor, em poliestireno com as mesmas características do poliestireno envolvido no processo inicial da produção (ABRAPEX, 2015).

Após a etapa de coleta do resíduo, o EPS passa por processo de trituração e compactação para retirada do ar, moagem e reprocessamento, uma vez que o material é um termoplástico (EPS Brasil, 2017).

A Figura 28 exibe o consumo aparente nacional (CAN) de poliestireno expandido entre os anos de 1999 e 2017. É possível observar que de 1999 a 2017, o CAN e a produção de EPS cresceram, respectivamente, a uma taxa anual de 4,0% e 4,8%. Na mesma base de comparação, as exportações cresceram a 6,3% a.a. e as importações a 3,2% a.a.

Figura 28 - Produção e consumo nacional do EPS entre os anos 1999 e 2017



Obs: CAN (Consumo Aparente Nacional) = (Produção + Importação) – Exportação

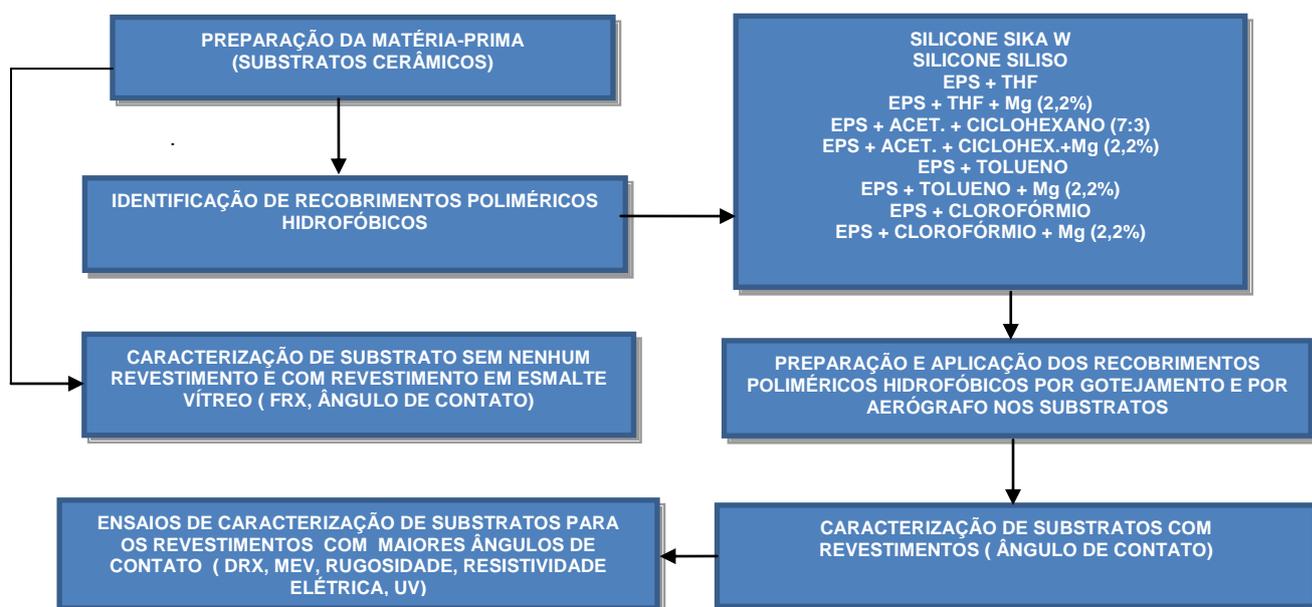
Fonte: EPS Brasil

4. METODOLOGIA

No presente capítulo serão descritos os métodos analíticos e instrumentais que foram utilizados na execução do trabalho experimental. Serão também referidas as metodologias e equipamentos utilizados na preparação dos corpos de prova (tanto dos substratos como dos recobrimentos).

O fluxograma mostrado na Figura 29, apresenta as etapas executadas durante a metodologia experimental deste trabalho.

Figura 29 - Fluxograma da Metodologia experimental adotada



Fonte: Produzida pelo próprio autor

4.1. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.1 Substratos

Os substratos (corpos de prova de isoladores elétricos cerâmicos sem revestimento), foram fabricados pela empresa Isoladores Santana S.A, a qual fica situada em Pedreira/SP. Os mesmos foram preparados a partir de massa padrão de porcelana elétrica em forma de discos, sendo cada um com 100 mm de diâmetro e 10 mm de espessura, obtidos a partir de tarugos de extrusoras da linha de produção. Este tipo de porcelana apresenta as propriedades mecânicas e dielétricas adequadas, sendo não porosa e não necessitando de recobrimentos para obter sua impermeabilidade.

Os discos passaram pelo processo de secagem ao ar durante 24 h e depois por 6 h em estufa. A queima foi efetuada em forno câmara, por volta de 1200°C por 36 h. Depois, as superfícies dos mesmos foram lixadas em três etapas (com lixa nº 60, lixa nº 80 e lixa nº 100) e, em seguida, limpas através de um jato de ar para retirar todas as partículas de poeira e outros contaminantes.

Foram preparados também, corpos de prova idênticos aos anteriores, porém revestidos com esmalte vítreo de uso comum. Estes corpos de prova serviram de padrão para comparação com os resultados apresentados pelos outros recobrimentos hidrofóbicos que serão aplicados nos substratos. As Figuras 30 e 31 a seguir e 32 e 33 (p.72) , referenciam os substratos acima citados.

Figuras 30 e 31- Substratos cerâmicos sem revestimento



Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figuras 32 e 33 - Substratos cerâmicos revestidos com esmalte vítreo



Fonte: Produzida pelo próprio autor

4.1.2 Recobrimentos Utilizados

Os recobrimentos hidrofóbicos poliméricos utilizados foram devidamente identificados e definidos, assim como, os métodos para a sua aplicação nos corpos de prova cerâmicos usados.

Além do revestimento por esmalte vítreo, foram utilizados produtos a base de silicone disponíveis no mercado e nanocompósitos de EPS sintetizados em laboratório usando-se alguns tipos de solventes e também estearato de magnésio.

O desempenho entre eles foi devidamente avaliado através de ensaios que estão detalhados no decorrer deste trabalho.

Abaixo, seguem dados e características dos recobrimentos utilizados e detalhes de aplicação dos mesmos:

- **ESMALTE VÍTREO** : fabricado na empresa Isoladores Santana S.A, constituído de quartzo, caulim, feldspato, aditivo fundente (dolomita ou calcita), pigmento e agente suspensor. Como já citado, este recobrimento serviu de padrão para comparação com os resultados apresentados pelos outros recobrimentos.

- **SILICONE W**: produto fabricado pela empresa Sika®, o qual é uma impregnação repelente à água (agente hidrofugante), à base de uma emulsão de silano e siloxano, dispersa em água, que protege e impermeabiliza as superfícies contra a absorção da água das chuvas, evitando eflorescências, manchas e o escurecimento do rejuntamento, sem alterar a aparência das superfícies. O referido produto possui densidade de aproximadamente 1 Kg/l a + 20 °C.

- **SILISO**: produto fabricado pela empresa Souza Filho Impermeabilizantes, o qual é um silano siloxano hidrofugante de última geração, a base de água, isento de solventes orgânicos, com baixa emissão de voláteis, ótima ancoragem e excelente efeito gota. O referido produto torna a superfície hidro-repelente pelo seu princípio químico que proporciona a hidrofugação e, desta forma, impede a penetração de água, mas, ao mesmo tempo, permite a passagem de vapor.

- **POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)**: A fonte de EPS utilizada para o preparo do compósito, foi uma placa de isopor comercial com dimensões de 100 x 40 cm e espessura de 0,5 cm.

4.1.3 Preparação e Aplicação dos Revestimentos

Para a preparação das soluções e realização dos ensaios, usou-se 0,1 g de EPS solubilizado em 10 mL dos solventes definidos (THF - tetraidrofurano, acetona com ciclohexano na proporção (7:3), clorofórmio e tolueno, sendo a intenção final obter-se resinas com perfil hidrofóbico. Os mesmos ensaios foram repetidos acrescentando-se 0,22 gramas de estearato de magnésio. As características técnicas dos materiais referenciados, são citadas no Apêndice A deste trabalho.

A utilização de mais de um tipo de solvente foi efetuada para avaliar os possíveis impactos que essa mudança acarretaria. A escolha dos solventes acima citados, se deu basicamente pelos seguintes fatores: apresentar boa solubilidade do EPS, boa transparência e nenhuma formação de precipitado.

Para a realização dos experimentos foram também utilizadas vidrarias de trabalho como béqueres, provetas e micropipetas.

Nas Figuras 34 e 35 (p.74), são mostrados alguns detalhes da preparação das soluções.

Figura 34 - Detalhe da balança eletrônica utilizada para pesagem do EPS e estearato de magnésio



Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 35 - Detalhe da preparação de solução com o EPS + solvente THF



Fonte: Produzida pelo próprio autor

A atividade foi realizada utilizando-se duas técnicas diferentes. A primeira foi a técnica de aplicação dos revestimentos por gotejamento, através do uso de uma pipeta Pasteur e em seguida, foi efetuado o processo de secagem do substrato em estufa a temperatura de 80 °C por 15 minutos. Nas Figuras 36 e 37 a seguir e na Figura 38 (p.76), são mostrados alguns detalhes das aplicações das soluções:

Figura 36 - Detalhe da aplicação da solução pela técnica de gotejamento



Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 37 - Detalhe da bomba de ar/vácuo, aerógrafo e mangueiras



Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 38 - Detalhe da aplicação de revestimento através de aerógrafo



Fonte: Produzida pelo próprio autor

4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Foram adotadas as seguintes técnicas de caracterização para os estudos pertinentes no presente trabalho:

- Fluorescência de raios X (FRX)
- Medição do ângulo de contato
- Espectroscopia na região de infravermelho
- Difração de raios X (DRX)
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
- Análise de rugosidade das superfícies por perfilometria óptica
- Ensaio de resistividade elétrica
- Envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta

4.2.1. Fluorescência de Raios X

Neste trabalho, esta técnica foi empregada na determinação da composição dos substratos cerâmicos sem revestimento e com recobrimento em esmalte vítreo, em termos de seus óxidos constituintes.

Os materiais foram caracterizados no Laboratório do DEMAT/CEFET-MG por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX). Os ensaios foram realizados em um equipamento SHIMADZU Modelo EDX 720, sendo a condição de operação com colimador de 3 mm. A Figura 39 apresenta o instrumento usado na caracterização acima citada.

Figura 39 - Instrumento de FRX/EDX Shimadzu - Modelo EDX 720



Fonte: Produzida pelo próprio autor

4.2.2 Medição do Ângulo de Contato

Para a execução das medições do ângulo de contato no trabalho em questão, foi utilizado o método da gota séssil. Nesse método, uma gota de água deionizada é colocada sobre a superfície do polímero e é medido o ângulo de contato entre a gota e a superfície através de um goniômetro.

Foram feitas medidas do ângulo de contato estático mantendo constante o volume da gota e para o cálculo do ângulo, o método da inclinação da tangente foi usado para todas as medidas.

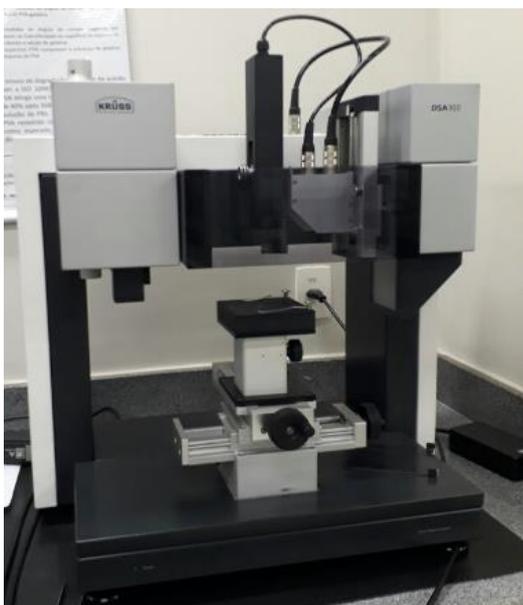
Para as medições de ângulo de contato realizadas, foram utilizadas amostras de substratos cerâmicos sem revestimento, com o recobrimento de esmalte vítreo e com os demais revestimentos definidos, as quais foram cuidadosamente limpas com etanol.

Foram efetuadas 8(oito) medições para cada situação acima citada, considerando um volume de gota de água depositada sobre a superfície de 5,0 μl , sendo que as medidas foram efetuadas em pontos distintos das amostras.

As medições de ângulo de contato foram efetuadas no Laboratório de Biomateriais do CEFET/MG, em Belo Horizonte - MG através de um goniômetro Marca Kruss GMBH, modelo DAS 100S equipado com uma micro-seringa capaz de produzir gotas de diferentes volumes e com alcance para medições de ângulo de contato de até 180° e também no Laboratório de Análise de Superfícies do SENAI CIT/MG através de um goniômetro Tilt Controller Phoenix - Phoenix Multi/Tilting e com alcance para medições de ângulo de contato também de até 180° e precisão de $\pm 0.1^\circ$.

As Figuras 40 e 41 (p.79), apresentam os goniômetros usados para a execução das medições dos ângulos de contato.

Figura 40 - Goniômetro Kruss GMBH - Modelo DAS 100S



Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 41 - Goniômetro Tilt Controller Phoenix - Phoenix Multi/Tilting



Fonte: Produzida pelo próprio autor

4.2.3 Espectroscopia na Região de Infravermelho

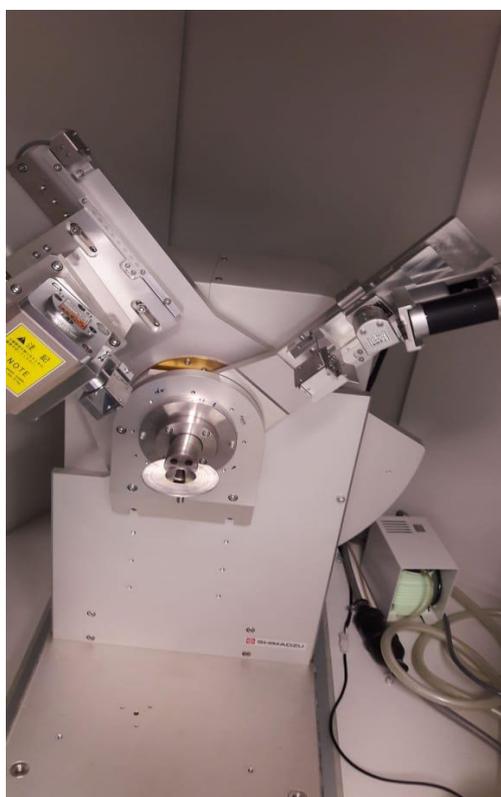
A fim de se verificar a pureza do EPS de reuso que foi utilizado no recobrimento dos substratos cerâmicos, foi realizada a sua caracterização através das análises de Espectroscopia na Região do Infravermelho, no Laboratório de Química Analítica do CEFET/MG, sendo que a maior utilidade da espectroscopia infravermelha encontra-se na identificação de moléculas orgânicas e organometálicas.

O espectro de infravermelho para o EPS foi obtido a partir da dissolução de um pequeno cubo de EPS (1,0 cm de aresta) em cerca de 10 ml de tetraidrofurano (THF). Após rápida dissolução do EPS, uma gota de solução foi espalhada sobre uma pastilha de KBr (Brometo de potássio), sendo o solvente evaporado. Os espectros de infravermelho foram obtidos em um Espectrômetro SHIMATZU, modelo Prestige-21 com auxílio de acessório ATR, Faixa de medição: 4500 a 500 cm^{-1} ; Número de medidas: 60; Resolução: 4.0.

4.2.4 Difração de Raios X

As análises por difração de raios X para as amostras estudadas neste trabalho, foram realizadas no Laboratório de Caracterização do DEMAT/CEFET-MG no Difratorômetro de Raios X marca SHIMADZU XRD - modelo XRD 7000 (Figura 42), usando radiação Cu ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$), produzidos sob condição 40kV e 30 mA. Os espectros de difração foram coletados varrendo no intervalo de 2θ , 10° a 80° , passo 0,02, velocidade de $2^\circ/\text{min}$. Para identificação das fases presentes, utilizou-se o Banco de Dados XPOWDER Versão 2004.04.70 PRO.

Figura 42 - Instrumento de DRX Shimadzu - Modelo XRD 7000

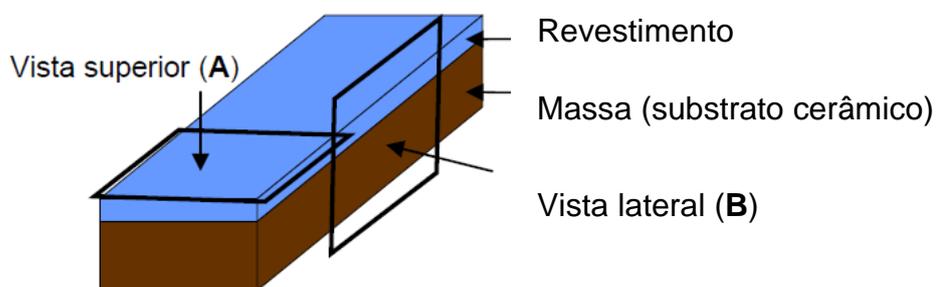


Fonte: Produzida pelo próprio autor

4.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a realização do ensaio em questão, todas as amostras envolvidas no presente trabalho foram recobertas com ouro, para a obtenção de micrografias com alta definição. Em seguida, as amostras já devidamente cortadas, foram analisadas conforme esquema mostrado na figura 43.a. O objetivo foi o de obter-se micrografias vistas de cima (vista A) para a análise das superfícies e morfologia e também micrografias pela lateral (vista B), para a análise da espessura da camada dos revestimentos aplicados nos substratos cerâmicos.

Figura 43.a - Esquema de corte e observação através do MEV



Fonte: Produzido pelo próprio autor

As medições foram obtidas com um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi (Modelo-TM3000) com sputtering (Figura 43.b). O equipamento permite a visualização do material em estudo com uma ampliação nítida de até 30 mil vezes e possui aceleração variável de 5 KV.

Figura 43.b - Detalhe do instrumento recobridor de amostras e do MEV Hitachi (Modelo-TM3000)



Fonte: Produzida pelo próprio autor

4.2.6 Análise de Rugosidade das Superfícies por Perfilometria Óptica

A norma ABNT NBR ISO 4287 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade, estabelece os termos e parâmetros de amplitude conforme abaixo citados, os quais serão necessárias para entendimento dos resultados referenciados no item 5.6 do presente trabalho.

Salienta-se que os parâmetros S de rugosidade, são os equivalentes 3D aos parâmetros R em 2D. São os seguintes, os parâmetros de amplitude:

Rt~St : altura total do perfil. Corresponde à altura entre o vale mais profundo e o pico mais alto no comprimento de avaliação.

Rp~Sp : altura máxima do pico do perfil. Corresponde à altura do pico mais alto da linha média, definida no comprimento da amostragem.

Rv~Sv : profundidade máxima do vale do perfil. Corresponde à profundidade do vale mais profundo a partir da linha média, definida no comprimento da amostragem.

Rz~Sz : altura máxima do perfil definida no comprimento de amostragem. Este parâmetro é frequentemente usado para verificar se o perfil tem picos salientes que podem afetar a função de contato estático ou deslizante.

Ra~Sa : desvio médio aritmético do perfil avaliado definido no comprimento da amostra. É usado como uma avaliação global da amplitude da rugosidade em um perfil. Não diz nada sobre a frequência espacial das irregularidades ou a forma do perfil. É significativo para a aspereza de superfície aleatória (estocástica) usinada com ferramentas que não deixam marcas na superfície, como jateamento de areia, moagem, polimento

Rq~Sq : desvio médio quadrático do perfil avaliado. Corresponde ao desvio padrão da distribuição de altura, definido no comprimento da amostra. Fornece a mesma informação que Ra~Sa.

Rsk~Ssk : assimetria do perfil avaliado. Corresponde à assimetria da distribuição de altura, definida no comprimento da amostragem. Este parâmetro é importante, pois fornece informações sobre a morfologia da textura da superfície. Os valores

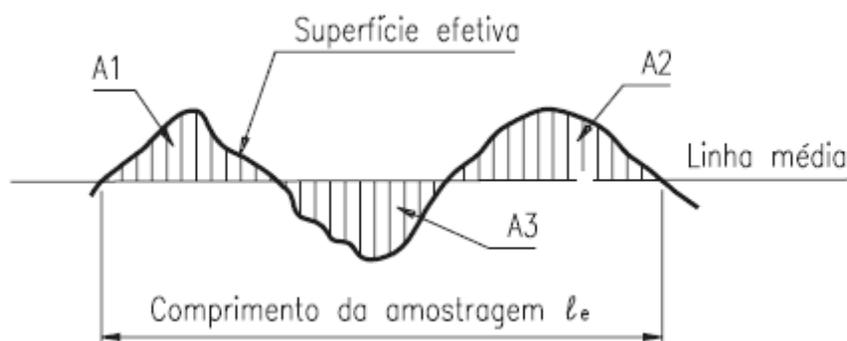
positivos correspondem a picos elevados distribuídos numa superfície regular (distribuição inclinada para baixo), enquanto que os valores negativos são encontrados em superfícies com poros e riscos (distribuição inclinada para cima). Portanto, é interessante quando as funções de contato ou lubrificação são necessárias. No entanto, este parâmetro não fornece informações sobre a altura absoluta do perfil, ao contrário do Ra~Sa.

Rku~Sku : curtose do perfil avaliado. Corresponde à nitidez da distribuição da altura, definida no comprimento da amostragem.

Rc~Sc : altura média dos elementos do perfil definida no comprimento de avaliação. Este parâmetro pode ser calculado em superfícies com células ou grãos de textura.

A norma ISO 4287 adota no Brasil o sistema de linha média M para medidas de rugosidade, onde todas as grandezas da medição são definidas a partir do conceito de uma linha de referência, chamada de linha média. Tal linha é a paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem (l_e), como mostra a Figura 44 a., onde $A1 + A2 = A3$.

Figura 44 a. - Sistema da Linha Média



Fonte: Norma ISO 4287(2002)

No presente trabalho foram definidas 4 (quatro) amostras para a realização do ensaio em questão, sendo 1 (uma) sem revestimento, 1 (uma) com revestimento em esmalte vítreo e 2 (duas) das 3 (três) com revestimentos poliméricos que obtiveram maiores valores no ensaio de ângulo de contato (EPS+Tolueno e EPS + Clorofórmio). Por questões de indisponibilidade do Laboratório de Superfície do SENAI CIT/MG, não foi possível realizar a presente análise na amostra revestida com EPS+THF.

O objetivo foi o de verificar se os referidos revestimentos poliméricos aplicados, alteraram de maneira significativa a rugosidade superficial dos substratos e então relacionar uma possível variação no comportamento hidrofóbico com essa grandeza. Foram efetuadas medições de rugosidade superficial por perfilometria óptica com a obtenção de perfis em 3D e 2D em cinco regiões de cada amostra. Realizou-se em cada amostra, 4 varreduras de área 0,2mm de largura por 0,5mm de altura com lente de 50x utilizando o modo *vertical scanning interferometry* (*backscan* 50 μ m; *length* 80 μ m; e *threshold* 3%). Salienta-se ainda, que foi utilizada luz verde para a obtenção das imagens.

Os parâmetros de rugosidade foram obtidos seguindo os seguintes critérios:

- Parâmetros originais - rugosidade superficial do perfil original após nivelamento para superfície plana;
- Parâmetros λ_c 0,025mm - rugosidade superficial após nivelamento para superfície plana e filtro gaussiano com cut-off 0,025mm;
- Parâmetro RD - rugosidade superficial após nivelamento para superfície plana e restauração de dados não mensurados utilizando método padrão de alta qualidade, com restauração das bordas;
- Parâmetros RD λ_c 0,025mm - rugosidade superficial após nivelamento para superfície plana, restauração de dados não mensurados utilizando método padrão de alta qualidade, com restauração das bordas e filtro gaussiano com cut-off 0,025mm.

As medições de rugosidade foram efetuadas no Laboratório de Análise de Superfícies do SENAI CIT/MG através de um perfilômetro óptico Modelo Bruker Contour GT-K, conforme mostrado na Figura 44b (p.85).

Figura 44 b. - Instrumento de perfilometria Modelo Bruker Contour GT-K



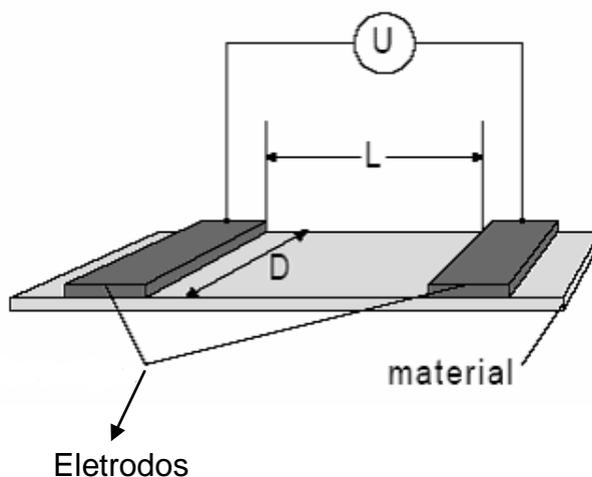
Fonte: Produzida pelo próprio autor

4.2.7 Ensaio de Resistividade Elétrica

Existem diferentes maneiras de se medir a resistividade de um material, e cada método possui suas vantagens e seu grau de dificuldade na execução, bem como, uma precisão e uma confiabilidade nas medidas efetuadas por cada um deles.

A análise da resistividade elétrica dos revestimentos considerados mais promissores no presente trabalho, foi realizada utilizando-se o método sugerido por Maryniak (2003), conforme mostrado na Figura 45 (p.86).

Foi aplicada uma tensão elétrica definida em duas barras condutoras de cobre colocadas sobre cada substrato revestido, sendo medida a corrente elétrica gerada.

Figura 45 - Configuração básica para medidas de resistividade superficial

Fonte: MARYNIAK (2003)

Sabe-se que a resistividade superficial ρ_s é determinada pela divisão entre as razões: voltagem aplicada DC U pela unidade de comprimento L , e corrente superficial medida I_s pela unidade de largura D , conforme pode ser verificado na Equação 4 a seguir. De posse dos dados obtidos, usou-se a referida equação para a obtenção dos resultados:

$$\rho_s = (U/L) / (I_s/D) \quad (4)$$

Para a determinação da medição da condutividade dos revestimentos, que é o inverso da resistividade, utilizou-se a Equação 5 abaixo citada:

$$\rho = 1/\sigma \quad (5)$$

4.2.8 Envelhecimento Acelerado por Radiação Ultravioleta

A radiação ultravioleta causa modificações químicas irreversíveis que afetam as propriedades mecânicas de materiais orgânicos. Essa degradação pode tornar os materiais quebradiços com perda de resistência e mudança de cor. Apesar do Sol emitir radiação em uma ampla faixa de comprimentos de onda, as responsáveis pelos principais processos degradativos são as compreendidas na faixa de 280 a 400 nm. Por este motivo, a norma ASTM G53 sugere que os experimentos sejam conduzidos usando lâmpadas que emitem espectro característico na região do UVA (315 a 400 nm) e UVB (280 a 315 nm) (SARON, FELISBERTI E SANCHEZ, 2006).

O ensaio foi realizado em câmara de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta pertencente ao Laboratório de Ensaio Cerâmicos do CEFET-MG em Belo Horizonte/MG, a qual foi construída no próprio LEC a partir de orientações da literatura (SARON, 2006).

O modelo de lâmpadas instaladas na câmara possui a codificação G15T8UVC, sendo de fabricação da empresa HALOTECH. As mesmas possuem corpo em quartzo especial transparente e emitem radiação UV de onda com um pico de 253,7nm (UV-C).

Foram utilizadas amostras revestidas com EPS + THF, EPS + Tolueno e EPS + Clorofórmio, esmalte vítreo e sem nenhum revestimento. Todas as amostras foram limpas de maneira adequada, colocadas no interior de béqueres e finalmente introduzidas no interior da câmara. A duração do ensaio foi de 3 dias (72 horas ininterruptas). As amostras foram então retiradas da câmara, sendo analisados aspectos quanto à alterações visuais (mudança de cor, aderência dos revestimentos).

Essas condições foram escolhidas na tentativa de simular as situações a que esses polímeros seriam submetidos durante seus ciclos de vida, como componentes integrantes dos isoladores elétricos instalados em ambiente externo.

A Figura 46 abaixo, mostra a câmara de envelhecimento acelerado usada para a realização do ensaio.

Figura 46 - Câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV



Fonte: Produzida pelo próprio autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo, são descritos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização realizados, de forma a se cumprir os objetivos específicos propostos.

5.1 Fluorescência de Raios X

Os resultados obtidos no ensaio de FRX são mostrados nas Tabelas 6 e 7 abaixo:

Tabela 6 - Composição do substrato cerâmico sem revestimento

Composição	Resultado (%)
SiO ₂	68,568
Al ₂ O ₃	24,685
K ₂ O	4,359
Fe ₂ O ₃	1,215
MgO	0,561
TiO ₂	0,392
BaO	0,097
SO ₃	0,057
Rb ₂ O	0,031
MnO	0,019
SrO	0,008
ZnO	0,006
Y ₂ O ₃	0,003

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Tabela 7 - Composição do substrato cerâmico com esmalte vítreo

Composição	Resultado (%)
SiO ₂	72,507
Al ₂ O ₃	13,281
CaO	5,232
K ₂ O	4,352
Fe ₂ O ₃	1,956
ZnO	0,887
Cr ₂ O ₃	0,815
MgO	0,571
NiO	0,227
MnO	0,105
Rb ₂ O	0,028
SrO	0,018
ZrO ₂	0,017
Y ₂ O ₃	0,003

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Os resultados mostram que a composição dos substratos cerâmicos sem revestimento e com recobrimento de esmalte vítreo é majoritariamente SiO_2 , sendo que na face com revestimento vítreo existe uma porcentagem menor de Al_2O_3 quando comparada com a face sem o revestimento. Também percebeu-se a presença de adicional de cálcio, cromo, níquel e zircônio e um aumento expressivo do percentual de zinco e manganês na composição do substrato cerâmico com recobrimento de esmalte vítreo.

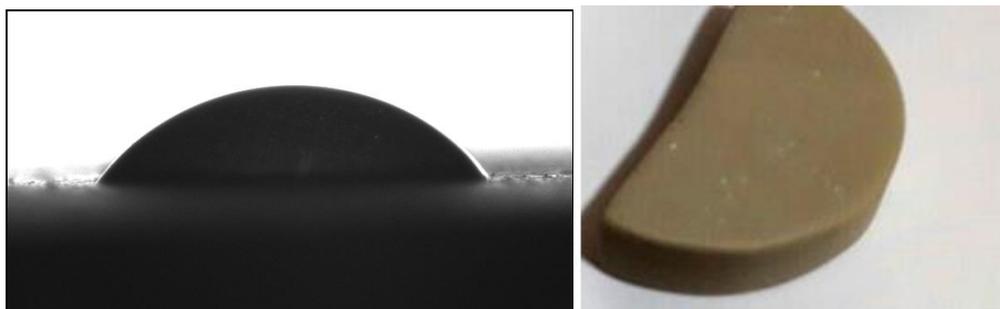
5.2 Ângulo de Contato

Os resultados médios das medidas dos ângulos formados entre uma gota de água e a superfície dos revestimentos, foram obtidos utilizando-se softwares específicos, instalados nos computadores acoplados aos goniômetros utilizados.

A Figura 47 a seguir, a Figura 48 e os Gráficos 1 e 2 (p.90 e 91) , apresentam os resultados para as amostras de substratos cerâmicos sem revestimento e com o recobrimento de esmalte vítreo, antes da realização qualquer outro ensaio.

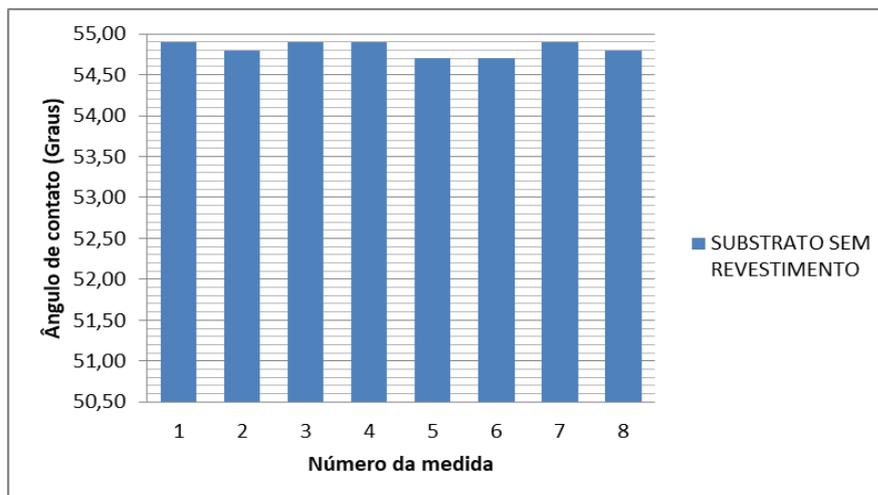
5.2.1 Medições de ângulo de contato em substrato cerâmico sem revestimento e com esmalte vítreo

Figura 47 - Imagem de uma gota de água e de um substrato sem revestimento



Fonte: Produzida pelo próprio autor

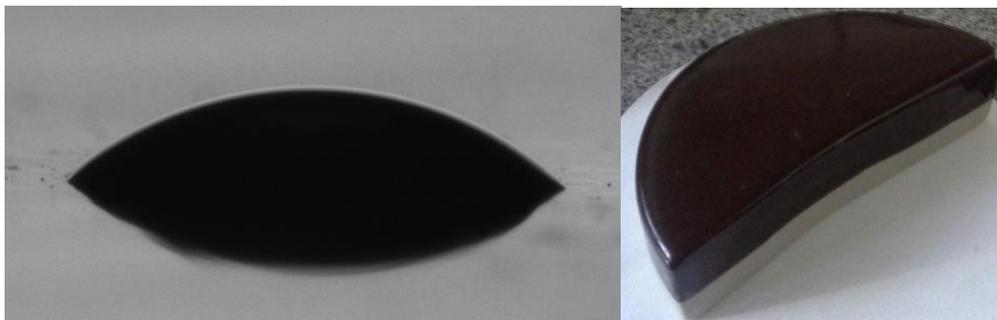
Gráfico 1 - Medidas do ângulo de contato em graus para o substrato sem revestimento



Fonte: Produzido pelo próprio autor

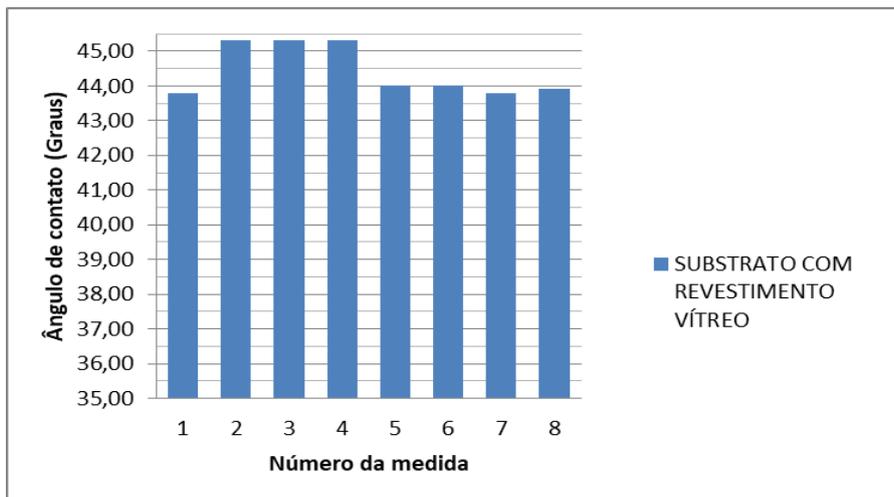
Os resultados obtidos (valor médio de 54,83 graus), demonstram comportamento **hidrofílico** de acordo com os regimes de molhabilidade definidos por (ZHIJIN, 2013).

Figura 48 - Imagem de uma gota de água e de um substrato revestido com esmalte vítreo



Fonte: Produzida pelo próprio autor

Gráfico 2 - Medidas do ângulo de contato em graus para o substrato revestido com esmalte vítreo



Fonte: Produzido pelo próprio autor

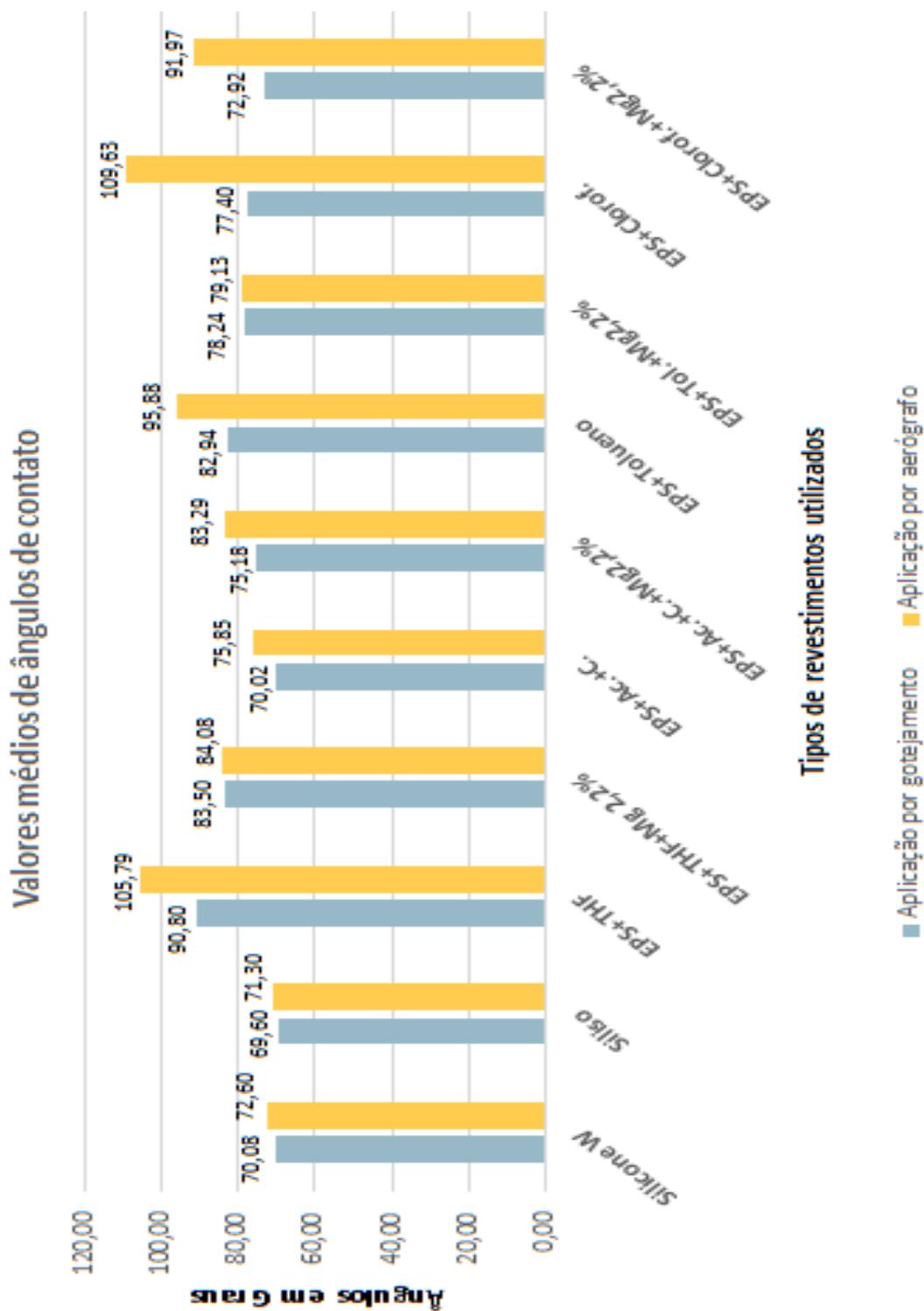
Os resultados obtidos (valor médio de 43,70 graus), demonstram comportamento **hidrofílico** de acordo com os regimes de molhabilidade definidos por (ZHIJIN, 2013).

5.2.2 Comparações das medições de ângulo de contato realizadas com aplicação de revestimentos através das técnicas de gotejamento e aerógrafo

O Gráfico 3 (p.92) mostra um comparativo dos valores médios dos ângulos de contato obtidos para cada recobrimento com a aplicação pela técnica de gotejamento e por aerógrafo, sendo as medidas realizadas antes das amostras passarem por qualquer ensaio.

Na Tabela 8 (p.93), são apresentados os valores de cada medida de ângulo de contato obtido para cada recobrimento utilizado com a aplicação por gotejamento, com a respectiva média e desvios padrões de cada um.

Gráfico 3 - Comparativo do valor médio das medidas de ângulos de contato obtidas



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Tabela 8 - Resultados comparativos dos valores de ângulo de contato com aplicação por gotejamento de acordo com os regimes de molhabilidade definidos por (ZHIJIN, 2013)

APLICAÇÃO POR GOTEJAMENTO										
Tipo de Revestimento	Silicone V	Siliso	EPS-THF	EPS-THF-Mg 2,2%	EPS-Ac. +C.	EPS-Ac. +C.-Mg2,2%	EPS-Tolueno	EPS-Tol.-Mg2,2%	EPS-Clorof.	EPS-Clorof.-Mg2,2%
Medida 1	70,10	68,90	90,71	83,5	69,70	75,08	82,90	78,08	77,50	72,90
Medida 2	69,80	68,70	90,80	83,7	70,30	75,30	83,20	77,90	77,90	73,10
Medida 3	69,80	69,50	90,89	83,4	70,03	75,10	82,20	78,10	77,40	72,90
Medida 4	70,40	70,20	90,98	83,5	69,80	75,32	83,10	78,02	77,30	72,85
Medida 5	70,10	69,80	91,07	83,8	70,01	75,03	83,20	78,40	77,20	73,00
Medida 6	68,70	69,90	89,90	83,2	69,90	75,30	82,50	78,50	77,50	72,90
Medida 7	69,70	70,30	90,72	83,5	69,90	75,10	83,30	78,40	77,10	72,80
Medida 8	71,90	70,20	91,34	83,7	70,50	75,20	83,10	78,50	77,30	72,90
Classificação	Hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofóbico	Hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofilico
Média	70,06	69,69	90,80	83,54	70,02	75,18	82,94	78,24	77,40	72,92
Desvio Padrão	0,97	0,56	0,45	0,21	0,25	0,12	0,42	0,25	0,26	0,10

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Foi realizado o teste de análise de variância ANOVA - Fator único por meio do programa Microsoft Excel para análise estatística dos resultados e comparação das dez populações (tipos de revestimento), utilizando nível de confiança de 95% e nível de significância $\alpha = 5\%$. Os resultados são apresentados nas tabelas 8.a e 8.b.

Tabela 8.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (ângulo de contato com aplicação por gotejamento)

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
Silicone W	8	560,500	70,063	0,803
Siliso	8	557,500	69,688	0,370
EPS+THF	8	726,410	90,801	0,176
EPS+THF+ Mg 2,2%	8	668,300	83,538	0,037
EPS+Ac.+C.	8	560,140	70,018	0,070
EPS+Ac.+C.+ Mg 2,2%	8	601,430	75,179	0,013
EPS+Tolueno	8	663,500	82,938	0,151
EPS+Tol.+ Mg 2,2%	8	625,900	78,238	0,057
EPS+Clorof.	8	619,200	77,400	0,060
EPS+Clorof.+ Mg 2,2%	8	583,350	72,919	0,009

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Tabela 8.b - Resultado Anova (Fator único)

Fonte da variação	SS	Df	MS	F	P-Value	F crítico
Entre grupos	3523,42798	9	391,4919974	2243,991678	1,85899E-82	2,01660069
Dentro dos grupos	12,2123625	70	0,174462321			
Total	3535,64034	79				

Fonte: Produzido pelo próprio autor

SS: Soma dos quadrados

df: Grau de liberdade

MS: Soma média dos quadrados

F: Razão entre as variâncias

P: Probabilidade

A partir da análise ANOVA - Fator único dos ângulos de contato apresentados pelas amostras rejeita-se a hipótese nula H_0 de que as médias são iguais para $p < \alpha$ e $F > F_{\text{crítico}}$, indicando que há diferença estatística significativa entre os grupos comparados. É possível analisar por meio da Tabela 8.b que o valor de *Pvalue* foi menor do que α ($1,85899E-82 < 0,05$) e que o valor de *F* encontrado foi maior do que o *F* crítico ($2243,991678 > 2,01660069$). Portanto, pode-se concluir que os ângulos de contato dos grupos analisados são estatisticamente diferentes.

Na Tabela 9 (p. 96), são apresentados os valores de cada medida de ângulo de contato obtido para cada recobrimento utilizado com a aplicação por aerógrafo, com a respectiva média e desvios padrões de cada um.

Tabela 9 - Resultados comparativos dos valores de ângulo de contato com aplicação por aerógrafo de acordo com os regimes de molhabilidade definidos por (ZHIJIN, 2013)

APLICAÇÃO POR AERÓGRAFO										
Tipo de Revestimento	Silicone V	Siliso	EPS, THF	EPS, THF, Mg 2,2%	EPS, Ac. + C.	EPS, Ac. + C., Mg 2,2%	EPS, Tolueno	EPS, Tol., Mg 2,2%	EPS, Clorof.	EPS, Clorof., Mg 2,2%
Medida 1	72,30	71,2	105,70	84,05	75,90	83,20	95,8	79,10	109,80	92,05
Medida 2	72,60	71,3	105,85	84,10	75,75	83,40	95,6	78,90	109,70	91,96
Medida 3	72,65	71,3	105,90	84,00	76,00	83,20	95,9	79,40	109,60	91,92
Medida 4	72,60	71,5	105,80	84,20	75,70	83,30	95,9	79,30	109,60	92,05
Medida 5	72,50	72,5	105,65	84,10	75,90	83,30	95,6	79,20	109,60	91,92
Medida 6	72,70	71,6	105,70	84,10	76,10	83,30	95,7	79,00	109,60	91,92
Medida 7	72,70	70,7	105,80	84,20	75,70	83,20	95,8	78,90	109,60	91,92
Medida 8	72,50	70,7	105,90	83,95	75,70	83,40	95,9	79,20	109,50	92,05
Classificação	Hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofóbico	Hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofóbico	Hidrofilico	Hidrofóbico	Hidrofóbico
Média	72,57	71,35	105,79	84,09	75,84	83,29	95,78	79,13	109,63	91,97
Desvio Padrão	0,08	0,61	0,10	0,09	0,17	0,08	0,14	0,20	0,06	0,06

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Foi realizado novo teste de análise de variância ANOVA - Fator único por meio do programa Microsoft Excel para análise estatística dos resultados e comparação das dez populações (tipos de revestimento), utilizando nível de confiança de 95% e nível de significância $\alpha = 5\%$. Os resultados são apresentados nas tabelas 9.a e 9.b.

Tabela 9.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (ângulo de contato com aplicação por aerógrafo)

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
Silicone W	8	580,500	72,569	0,018
Siliso	8	570,800	71,350	0,326
EPS+THF	8	846,300	105,788	0,009
EPS+THF+ Mg 2,2%	8	672,700	84,088	0,008
EPS+Ac.+C.	8	606,750	75,844	0,024
EPS+Ac.+C.+ Mg 2,2%	8	666,300	83,288	0,007
EPS+Tolueno	8	766,200	95,775	0,016
EPS+Tol.+ Mg 2,2%	8	633,000	79,125	0,034
EPS+Clorof.	8	877,000	109,625	0,008
EPS+Clorof.+ Mg 2,2%	8	735,790	91,974	0,004

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Tabela 9.b - Resultado Anova (Fator único)

Fonte da variação	SS	df	MS	F	P-Value	F crítico
Entre grupos	13027,94174	9	1447,549082	31941,50505	9,0413E-123	2,01660069
Dentro dos grupos	3,1723125	70	0,04531875			
Total	13031,11405	79				

Fonte: Produzido pelo próprio autor

SS: Soma dos quadrados

df: Grau de liberdade

MS: Soma média dos quadrados

F: Razão entre as variâncias

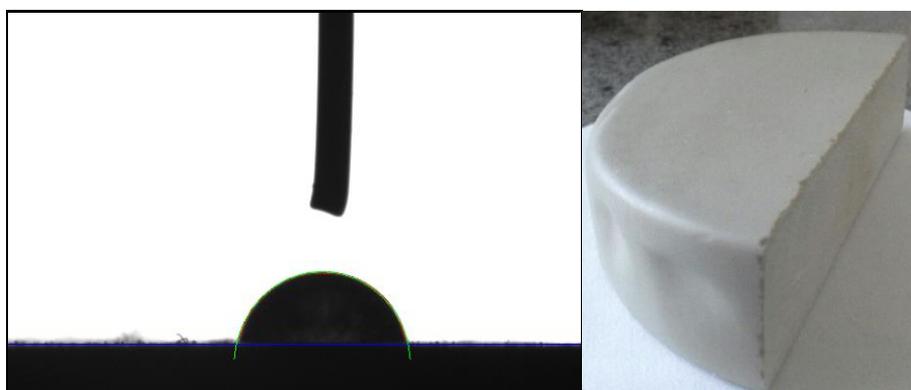
P: Probabilidade

A partir da nova análise ANOVA - Fator único dos ângulos de contato apresentados pelas amostras rejeita-se também a hipótese nula H_0 de que as médias são iguais para $p < \alpha$ e $F > F_{\text{crítico}}$, indicando que há diferença estatística significativa entre os grupos comparados. É possível analisar por meio da Tabela 9.b que o valor de *Pvalue* foi menor do que α ($9,0413E-123 < 0,05$) e que o valor de *F* encontrado foi maior do que o $F_{\text{crítico}}$ ($31941,50505 > 2,01660069$). Portanto, também pode-se concluir que os ângulos de contato dos grupos analisados são estatisticamente diferentes.

Contudo, os resultados mostraram que com a técnica de aplicação por aerógrafo foram obtidos melhores resultados de ângulo de contato em relação a técnica de gotejamento.

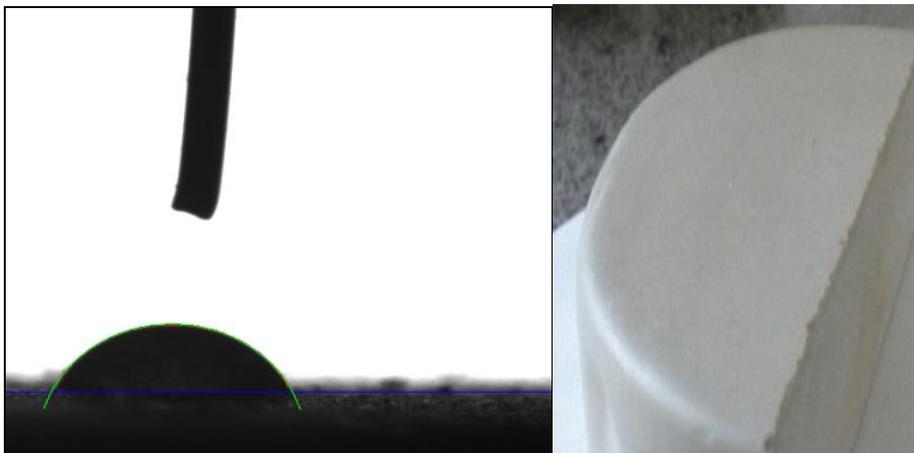
As Figuras 49 a 58 (p.98 a 102), apresentam detalhes das amostras e dos perfis das gotas de água obtidos sobre os diversos revestimentos utilizados durante as medidas de ângulo de contato através da técnica de aplicação por gotejamento.

Figura 49 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em silicone SIKA W



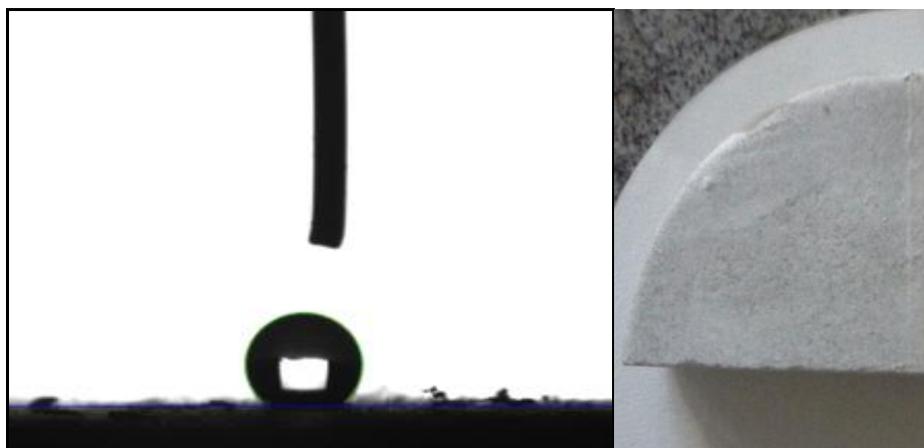
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 50 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em silicone SILISO



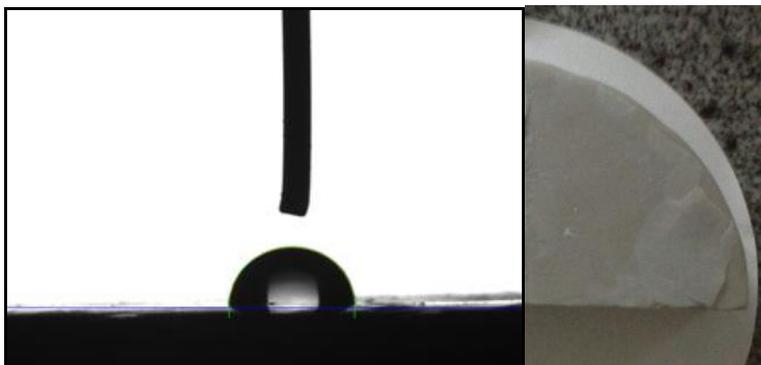
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 51 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + THF



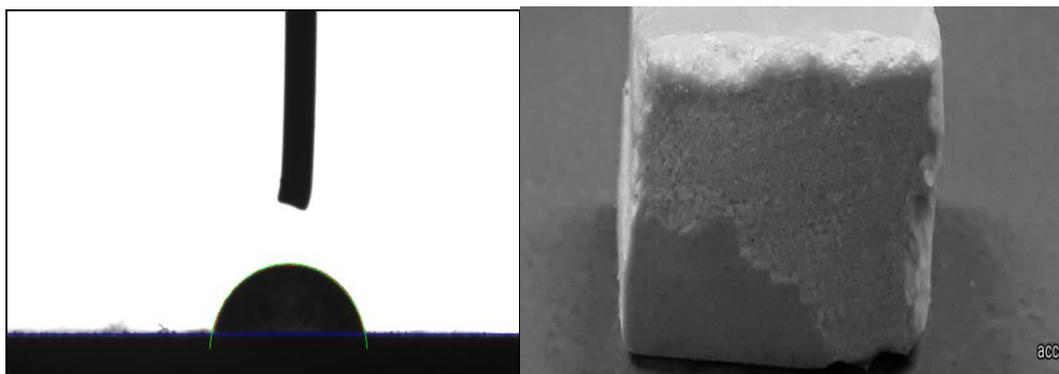
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 52 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + THF+ Mg (2,2 %)



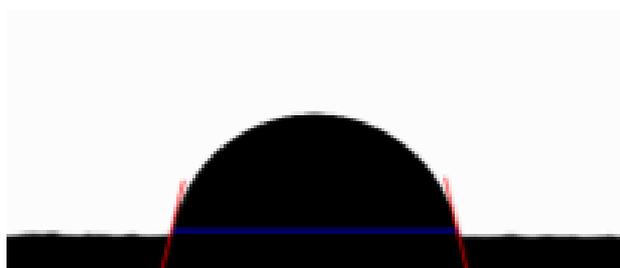
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 53 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + [Acetona+Ciclohexano(7:3)]



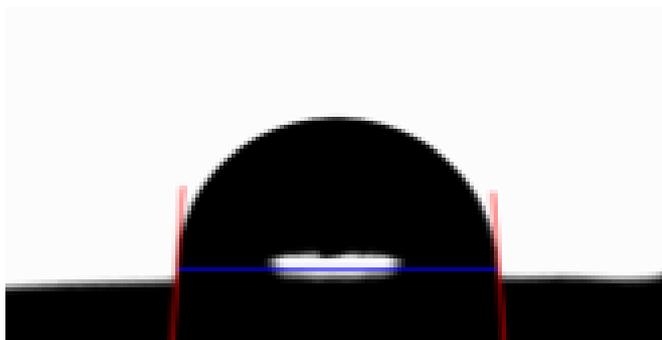
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 54 - Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + [Acetona+Ciclohexano (7:3) + Mg (2,2 %)]



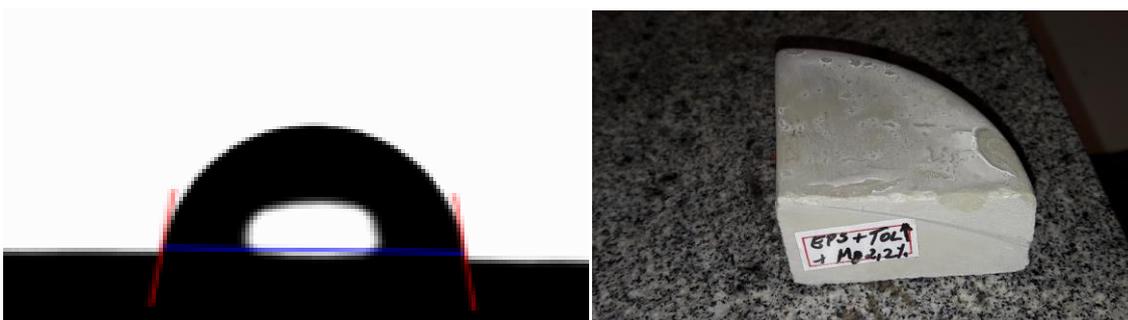
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 55 - Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + Tolueno



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 56 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + Tolueno + Mg (2,2 %)



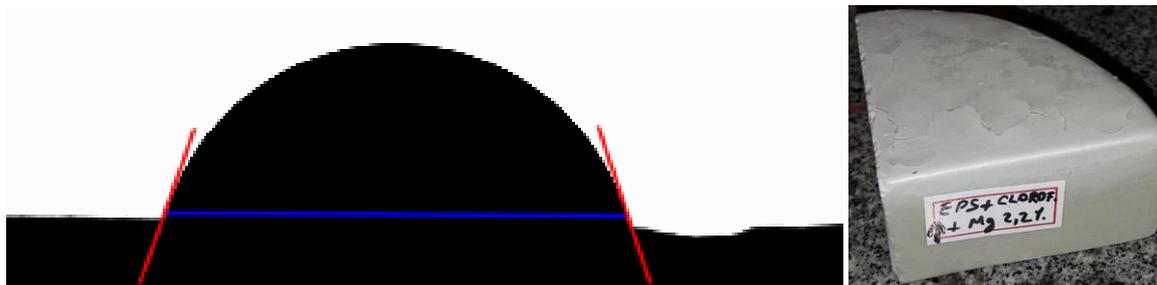
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 57 - Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + Clorofórmio



Fonte: Produzido pelo próprio autor

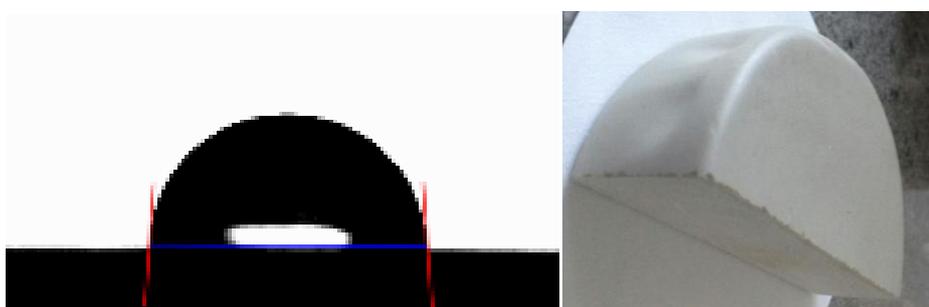
Figura 58 - Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + Clorofórmio + Mg (2,2 %)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

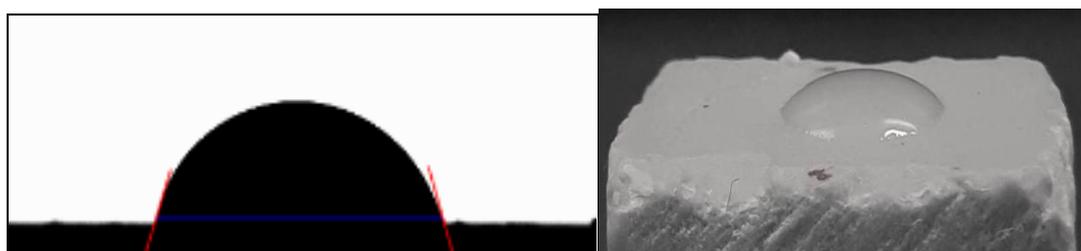
As Figuras 59 a 68 (p.102 a 105), apresentam detalhes das amostras e dos perfis das gotas de água obtidos sobre os diversos recobrimentos utilizados durante as medidas de ângulo de contato através da técnica de aplicação por aerógrafo.

Figura 59 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em silicone SIKA W



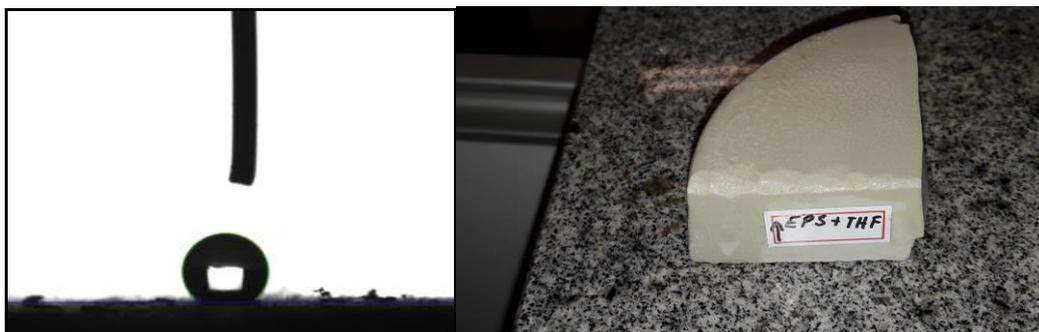
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 60 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em silicone SILISO



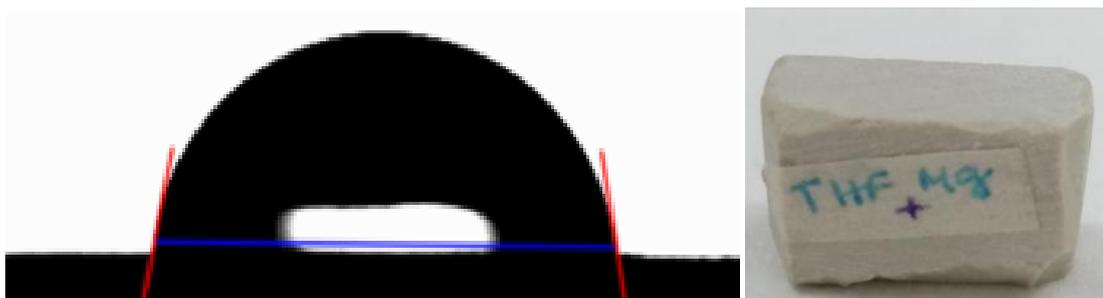
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 61 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + THF



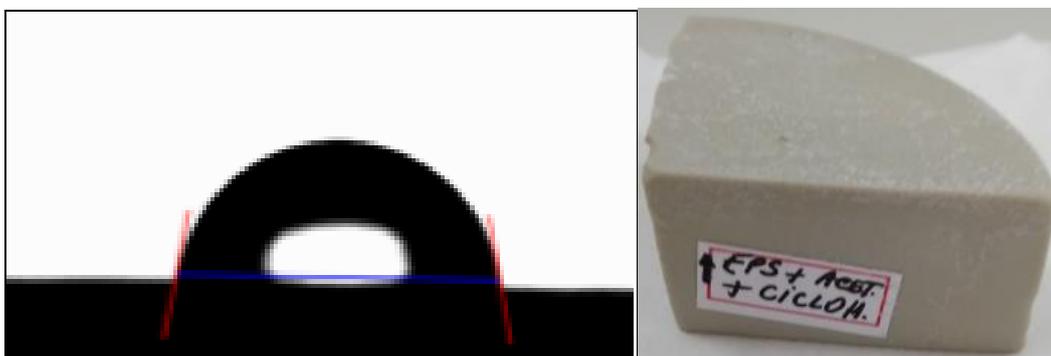
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 62 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + THF+ Mg (2,2 %)



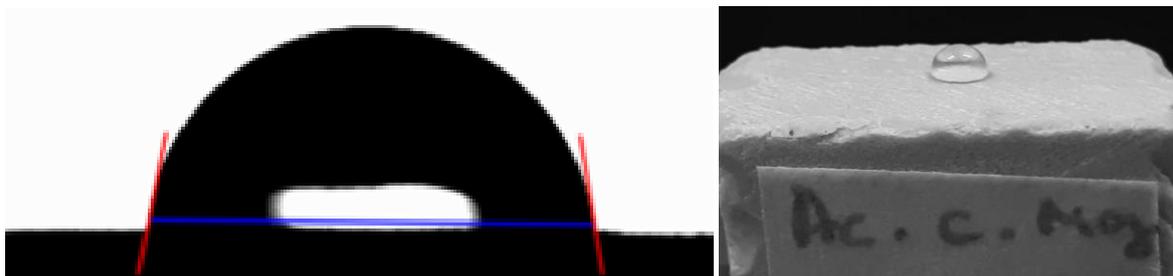
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 63 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + [Acetona+Ciclohexano (7:3)]



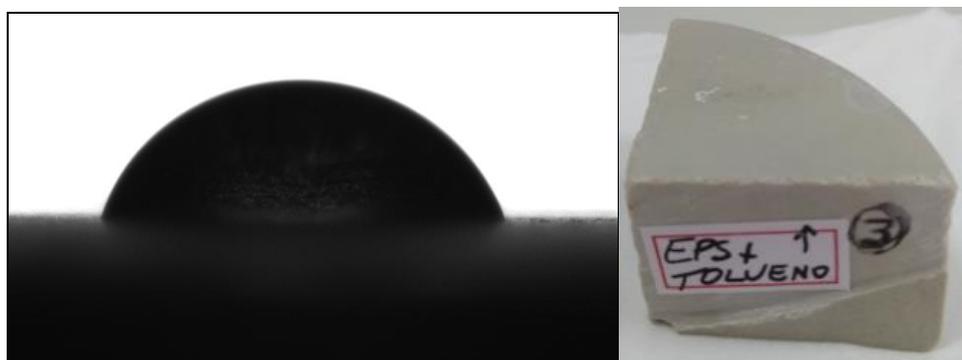
Fonte: Produzida pelo próprio autor

Figura 64 - Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + [Acetona+Ciclohexano(7:3) + Mg (2,2 %)]



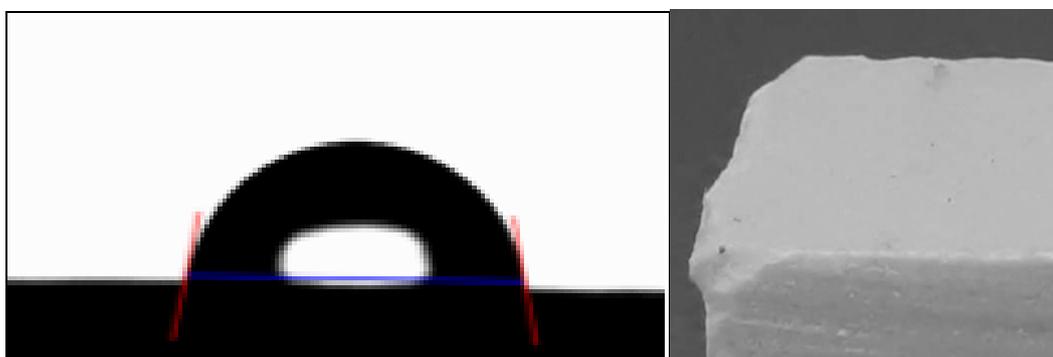
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 65 - Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + Tolueno



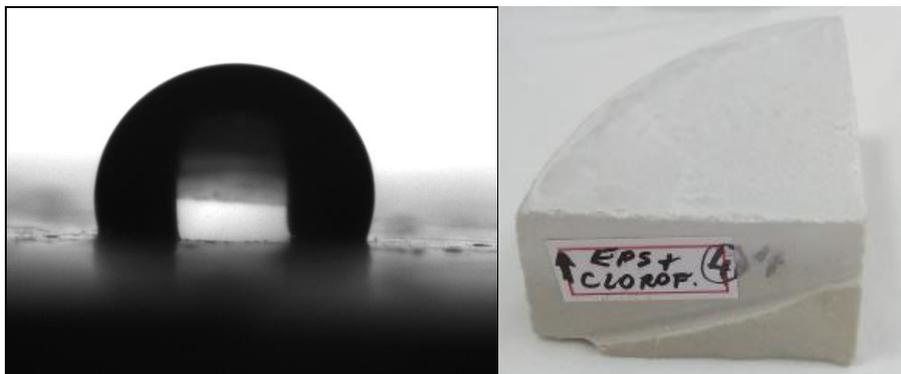
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 66 - Imagem de uma gota de água e de um substrato com revestimento em EPS + Tolueno + Mg (2,2 %)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 67 - Imagem de uma gota de água com revestimento em EPS + Clorofórmio



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 68 - Imagem de amostra com revestimento em EPS + Clorofórmio + Mg (2,2 %)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

A avaliação dos resultados mostrados no Gráfico 3 (p.92), foi um pré-requisito para a realização das demais técnicas de caracterização.

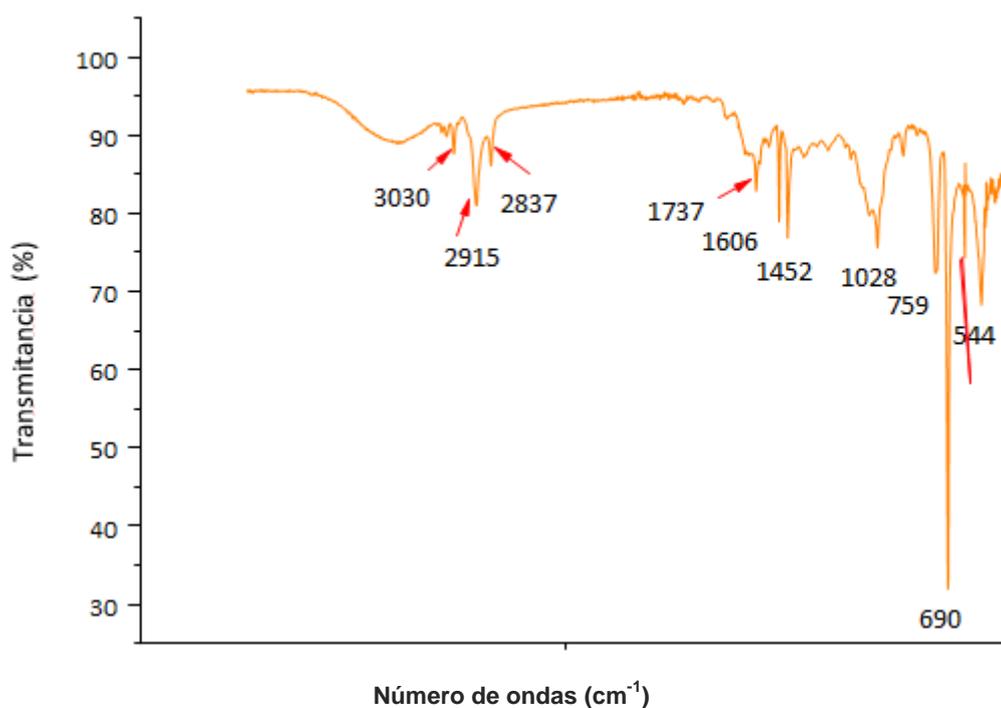
Foi definido que os demais ensaios do presente trabalho, seriam realizados apenas para os 03 (três) revestimentos/condição de aplicação, que obtiveram os maiores valores nos ensaios de ângulo de contato e que portanto, fossem os mais promissores no aspecto da hidrofobicidade. No caso, foram o EPS +THF, EPS +Tolueno e o EPS + Clorofórmio com aplicação por aerógrafo).

Para a realização de alguns ensaios foram utilizadas amostras sem revestimento, e com revestimento em esmalte vítreo para análises comparativas de resultados.

5.3 Espectroscopia na Região de Infravermelho

O espectro do ensaio em referência foi obtido para a região de 4000 cm^{-1} a 500 cm^{-1} . A Figura 69 mostra o espectro obtido para o EPS. Bandas típicas de estiramento C-H e C-C aromáticos e alifáticos do poliestireno são bastante visíveis na região de 3050 cm^{-1} a 2850 cm^{-1} . Outras bandas a destacar incluem as vibrações do esqueleto aromático em torno de 1801 cm^{-1} a 1945 cm^{-1} , os harmônicos característicos de estruturas aromáticas presentes de 2000 cm^{-1} a 1650 cm^{-1} e a banda extremamente aguda de deformação angular fora do plano das ligações CC do anel aromático de $\omega = 700\text{ cm}^{-1}$.

Figura 69 - Espectro do infravermelho do EPS comercial



Fonte: Produzido pelo próprio autor

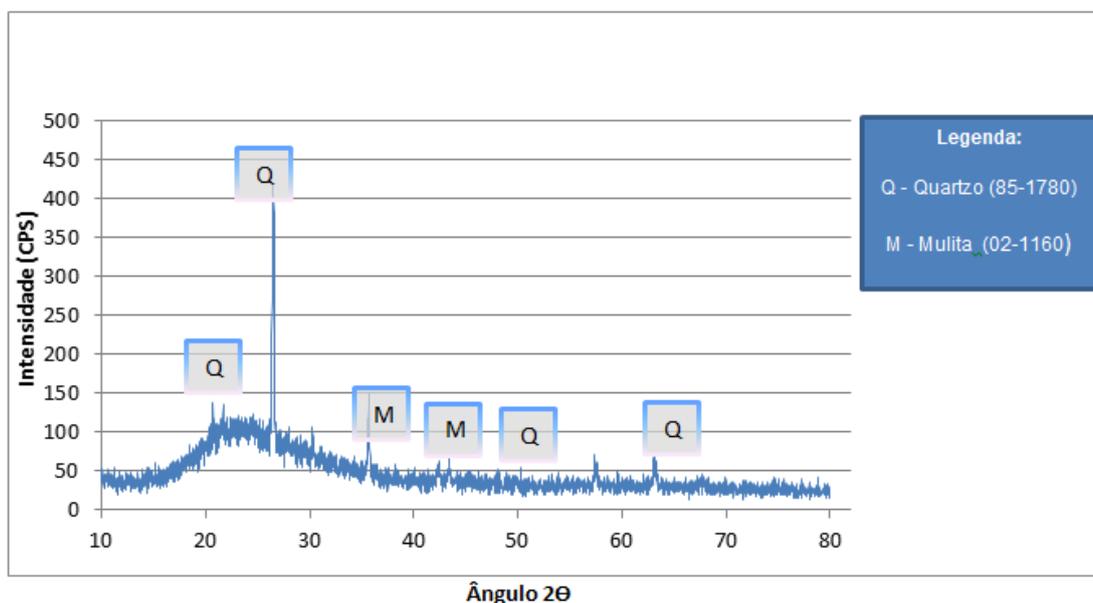
5.4 Difração de Raios X

A técnica de difração de raios X foi empregada para identificar as fases presentes nas resinas sintetizadas através do uso de EPS juntamente com os reagentes utilizados.

O esmalte vítreo tradicional foi analisado por DRX para que se pudesse obter um espectro padrão e, posteriormente o mesmo pudesse ser comparado aos espectros dos revestimentos EPS+THF, EPS+Tolueno e EPS+Clorofórmio.

O Gráfico 4 mostra o espectro de difração de raios-X para o esmalte tradicional no qual pode ser notada a baixa difração dos raios e a observância de muito poucos picos definidos, evidenciando que o esmalte tradicional é um material predominantemente vítreo, ou seja, não possui rede cristalina a longo alcance.

Gráfico 4 - Espectro da difração de raios - X (revestimento esmalte vítreo)



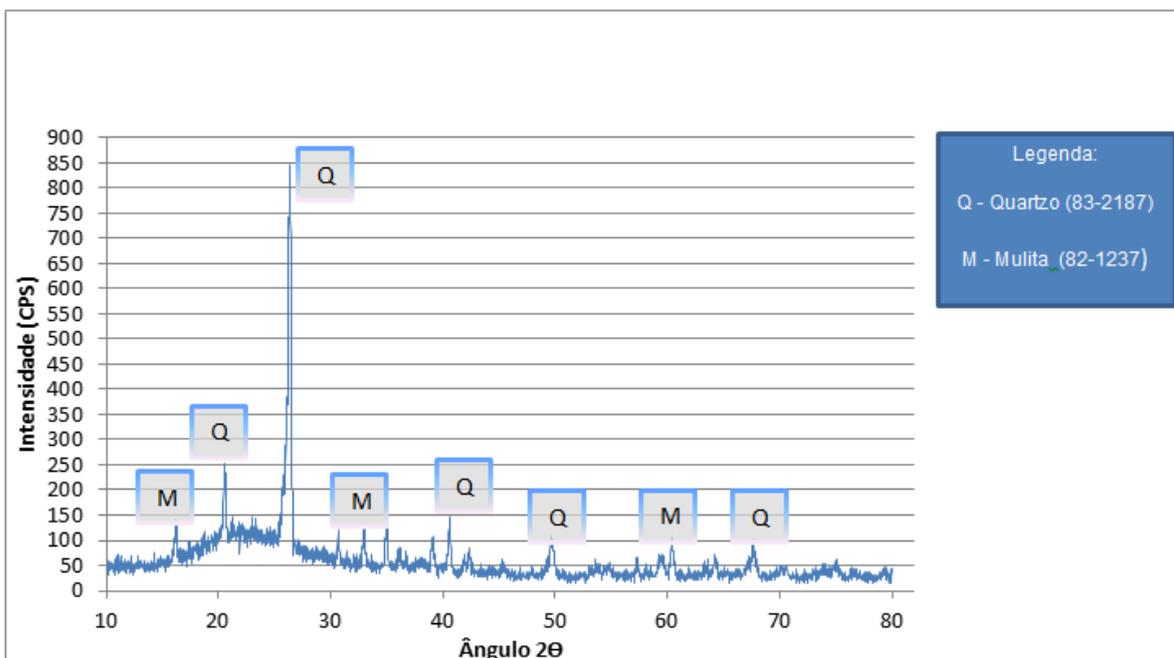
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Como era esperado, os revestimentos EPS+THF, EPS+Tolueno e EPS+Clorofórmio apresentaram comportamento intermediário em relação ao esmalte tradicional.

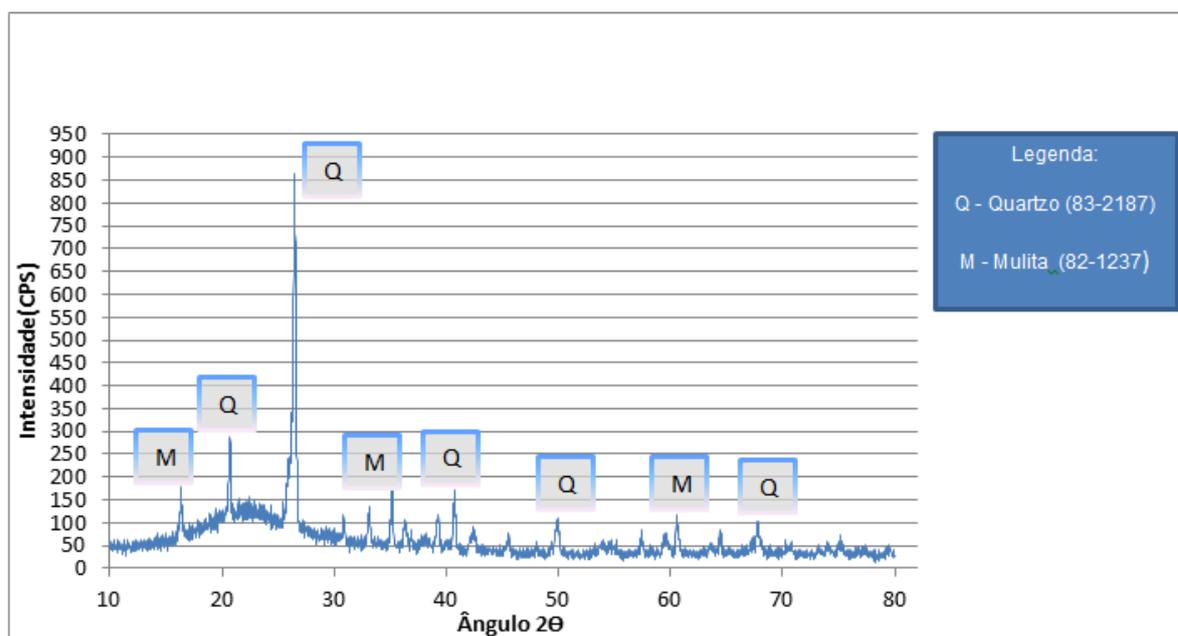
Constatou-se ao longo dos difratogramas mostrados nos Gráficos 5,6 e 7(p.108 e 109), a existência de espectros com fases cristalinas que foram identificadas como sendo de quartzo e mulita (formada com a combinação de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ em temperatura próxima de 1400°C), os quais se referem à predominância da composição da base do substrato cerâmico.

Ficou também evidenciado ao longo dos referidos difratogramas, a existência de um perfil amorfo com uma forma bastante parecida entre eles, confirmando as características de que os polímeros utilizados no ensaio de DRX, não possuem rede cristalina.

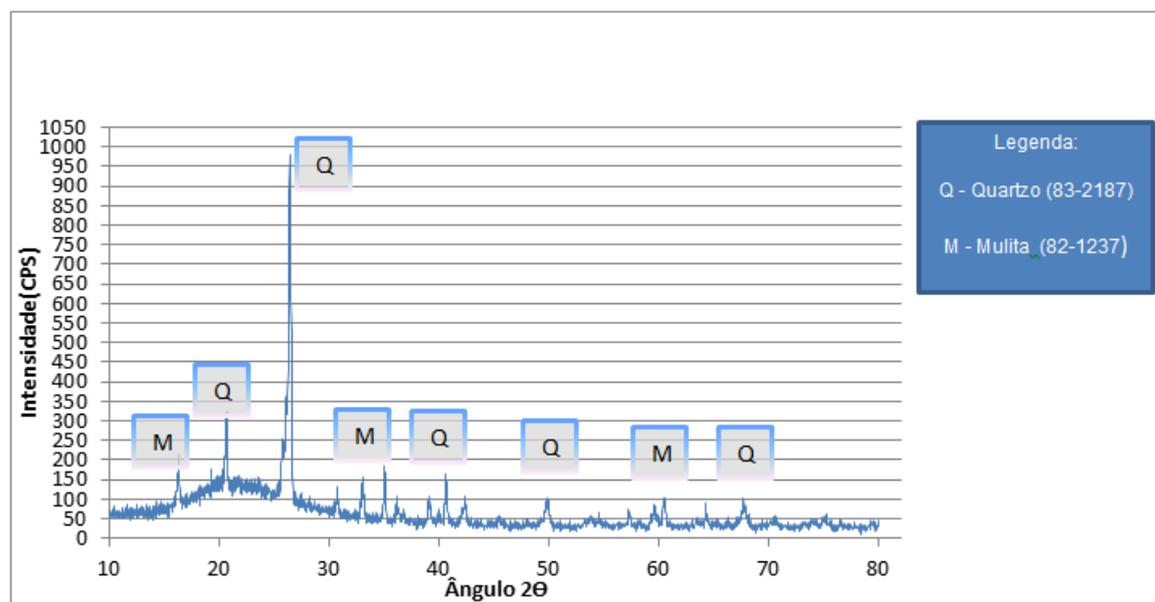
Gráfico 5 - Espectro da difração de raios- X (revestimento em EPS+THF)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Gráfico 6 - Espectro da difração de raios- X (revestimento em EPS+Tolueno)

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Gráfico 7 - Espectro da difração de raios- X (revestimento em EPS + Clorofórmio)

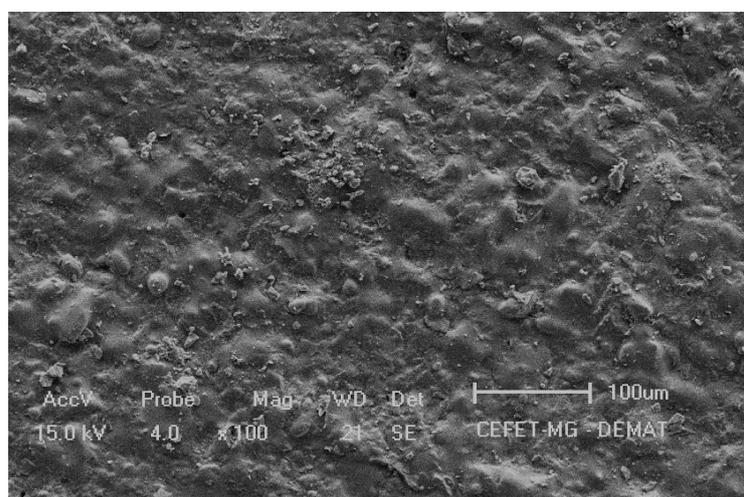
Fonte: Produzido pelo próprio autor

5.5 Microscopia eletrônica de varredura

Foram efetuadas micrografias nas amostras sem revestimento, com revestimento em esmalte vítreo e naquelas com revestimentos em EPS+THF, EPS+Tolueno e EPS+Clorofórmio. As Figuras 70 a 78 (p.110 a 114), detalham as principais micrografias obtidas.

A Figura 70 detalha a avaliação através do MEV da superfície da amostra sem revestimento, onde foi observada uma superfície heterogênea com a existência de porosidade na mesma. Foi percebida ainda, a presença de pequenos grânulos em nanoescala distribuídos na superfície da referida amostra.

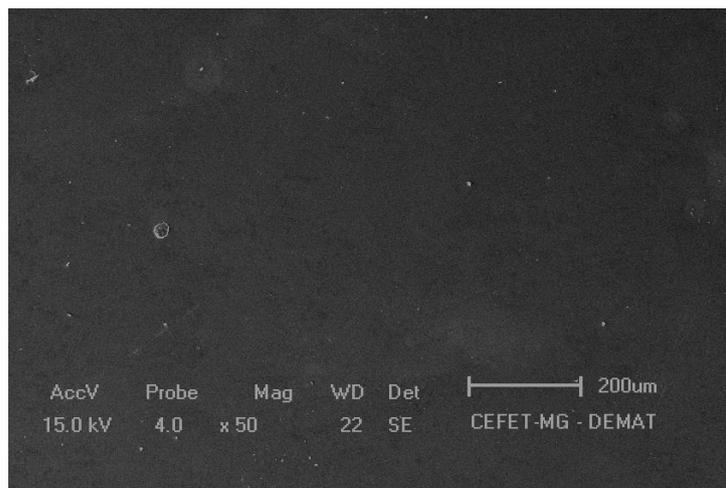
Figura 70 - MEV da superfície da amostra sem revestimento



Fonte: Produzido pelo próprio autor

A Figura 71(p.111), detalha a avaliação através do MEV da superfície da amostra com revestimento em esmalte vítreo, sendo percebida a existência de uma superfície homogênea. Comportamento similar foi observado por Prette (2007), onde foi possível concluir a existência de uma única fase vítrea.

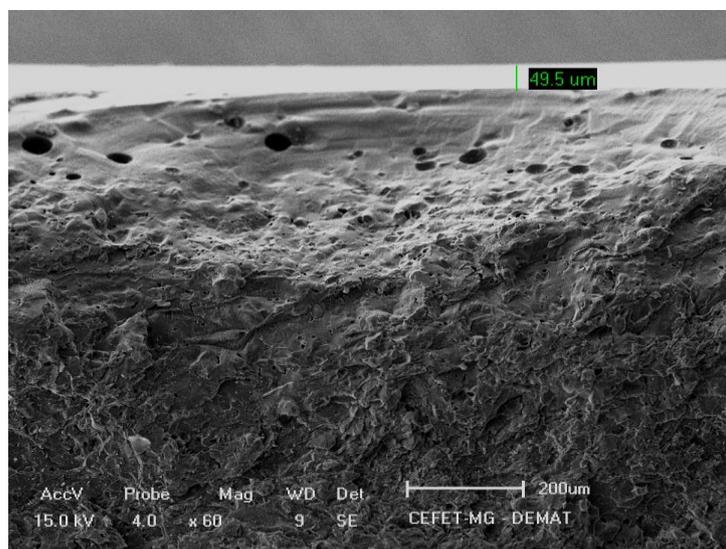
Figura 71 - MEV da superfície da amostra com revestimento em esmalte vítreo



Fonte: Produzido pelo próprio autor

A Figura 72 detalha a imagem da camada esmaltada da amostra ensaiada, a qual possui valor médio de 49,5 μm de espessura. É possível observar também, a presença de poros na referida camada, bem como, no corpo do isolador.

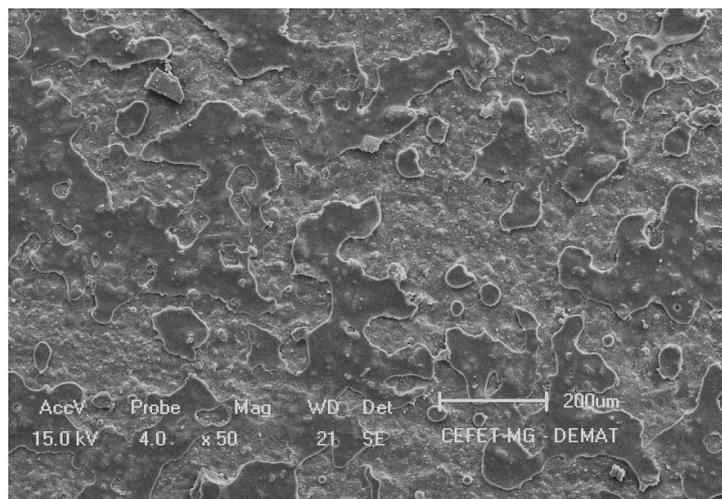
Figura 72 - MEV da espessura do revestimento com esmalte vítreo na amostra



Fonte: Produzido pelo próprio autor

A Figura 73 (p.112), detalha a avaliação através do MEV da superfície da amostra com revestimento em esmalte de EPS+THF, onde observou-se uma superfície heterogênea, com a existência de maior porosidade. Também verificou-se a existência de relevos e a alteração da topografia em nanoescala da superfície, sendo tais fatos a provável razão pelo aumento da hidrofobicidade do material.

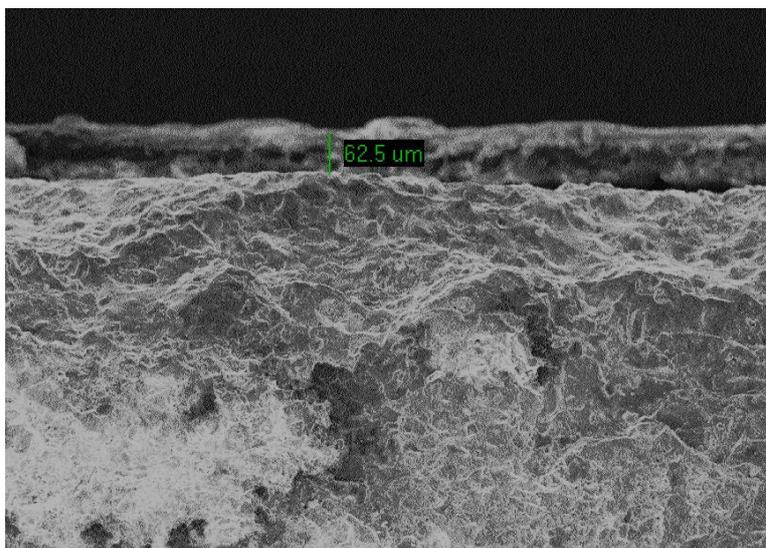
Figura 73 - MEV da superfície da amostra com revestimento de EPS+THF



Fonte: Produzido pelo próprio autor

A Figura 74 detalha a imagem da camada esmaltada da amostra ensaiada, a qual possui valor médio de 62,5 µm de espessura.

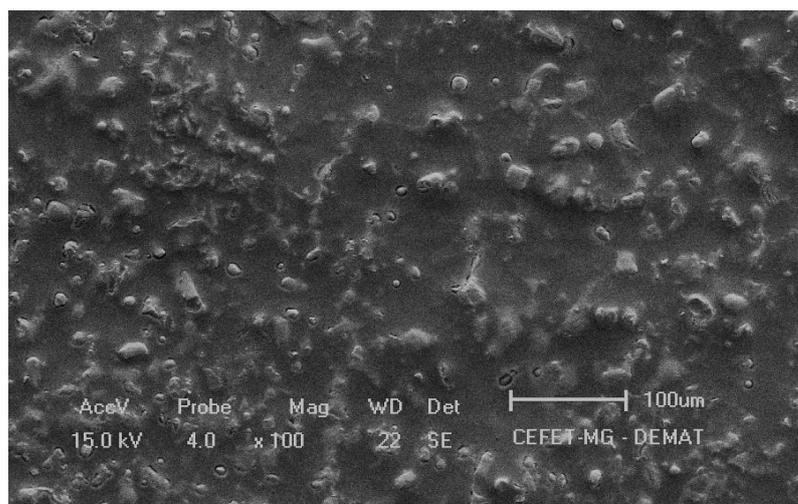
Figura 74 - MEV da espessura do revestimento de EPS+THF



Fonte: Produzido pelo próprio autor

A Figura 75 (p.113), detalha a avaliação através do MEV da superfície da amostra com revestimento em esmalte EPS+Tolueno, onde percebeu-se também a existência de uma superfície heterogênea, com a presença de maior porosidade. Denota-se ainda, grânulos em nanoescala distribuídos na superfície da mesma, os quais são os prováveis responsáveis pela rugosidade na mesma.

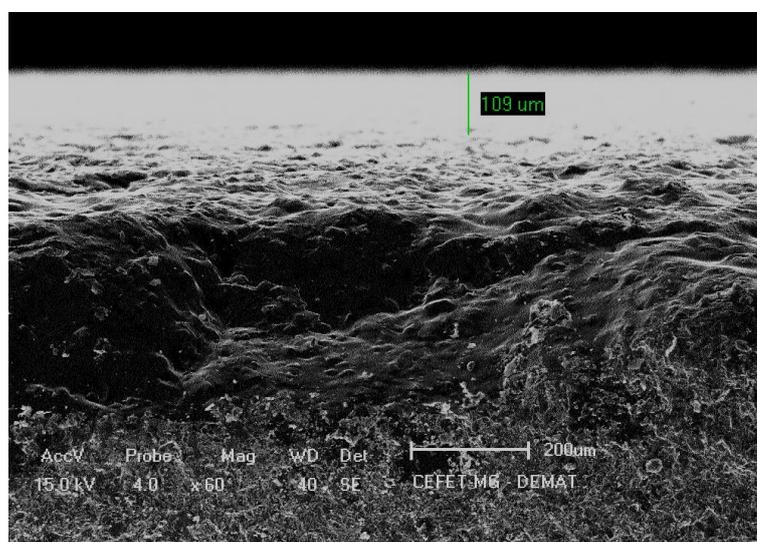
Figura 75 - MEV da superfície da amostra com revestimento de EPS+Tolueno



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Foi possível observar na Figura 76, que a camada de revestimento de EPS+Tolueno, possui valor médio de 109,0 µm de espessura.

Figura 76 - MEV da espessura do revestimento de EPS+Tolueno



Fonte: Produzido pelo próprio autor

A Figura 77 (p.114), detalha a avaliação através do MEV da superfície da amostra com revestimento em esmalte EPS+ Clorofórmio, onde percebeu-se também a existência de uma superfície heterogênea, com a presença de maior porosidade. Denota-se ainda, a presença de mais grânulos em nanoescala distribuídos na

5.6 Análise de Rugosidade das Superfícies por Perfilometria Óptica

O estudo do acabamento superficial é bastante importante na medida em que a molhabilidade de uma superfície por um líquido, é afetada pela rugosidade. Desta forma, a rugosidade é um parâmetro importante para a avaliação do grau de hidrofobicidade e conseqüentemente, tem que verificada quando materiais hidrofóbicos são comparados (EXL e KINDERSBERGER, 2005).

Para a avaliação do presente trabalho, foram selecionados apenas os resultados obtidos com os parâmetros RD (Restauração de Dados), uma vez que tratam-se dos valores apurados mais precisos.

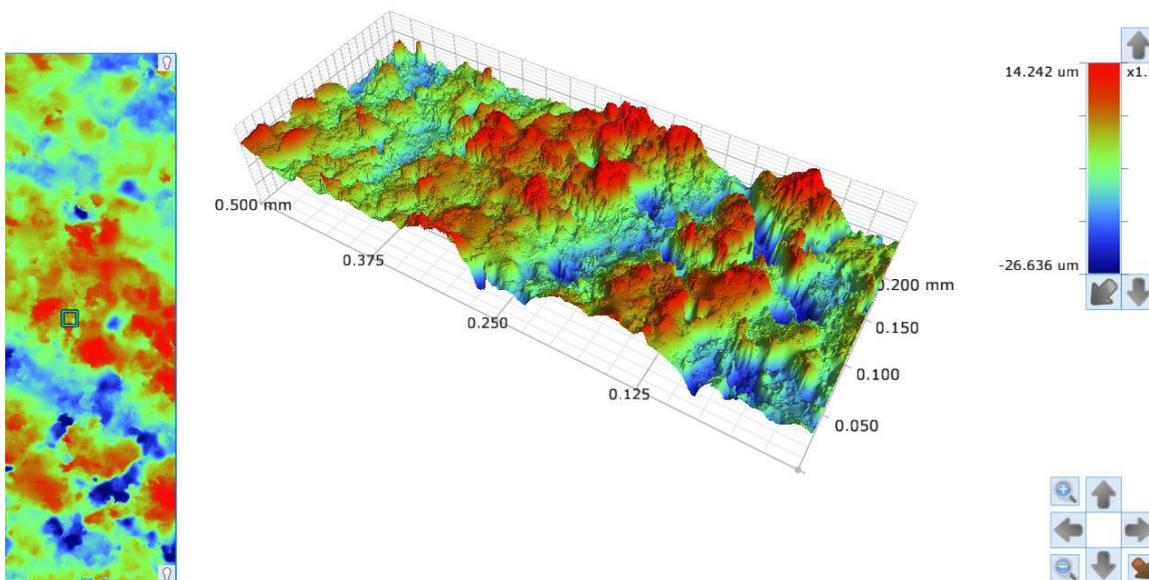
Os resultados de rugosidade superficial da amostra sem revestimento são apresentados na Tabela 10. As imagens por perfilometria são apresentadas nas Figuras 79 e 80 (p.116).

Tabela 10 - Resultados de rugosidade da amostra sem revestimento por critério de Parâmetros RD

Varreduras	Sa (µm)	Sku	Sp (µm)	Sq (µm)	Ssk	Sv (µm)	Sz (µm)
Varredura área 1	3,720	3,526	20,784	4,728	0,511	-17,898	38,682
Varredura área 2	3,991	3,260	15,403	4,996	-0,219	-25,844	41,246
Varredura área 3	2,910	2,907	12,806	3,593	-0,247	-14,927	27,733
Varredura área 4	3,246	2,998	18,172	4,037	0,224	-14,238	32,410
Média	3,467	3,173	16,791	4,339	0,067	-18,227	35,018
Desvio Padrão	0,482	0,279	3,448	0,640	0,366	5,321	6,112

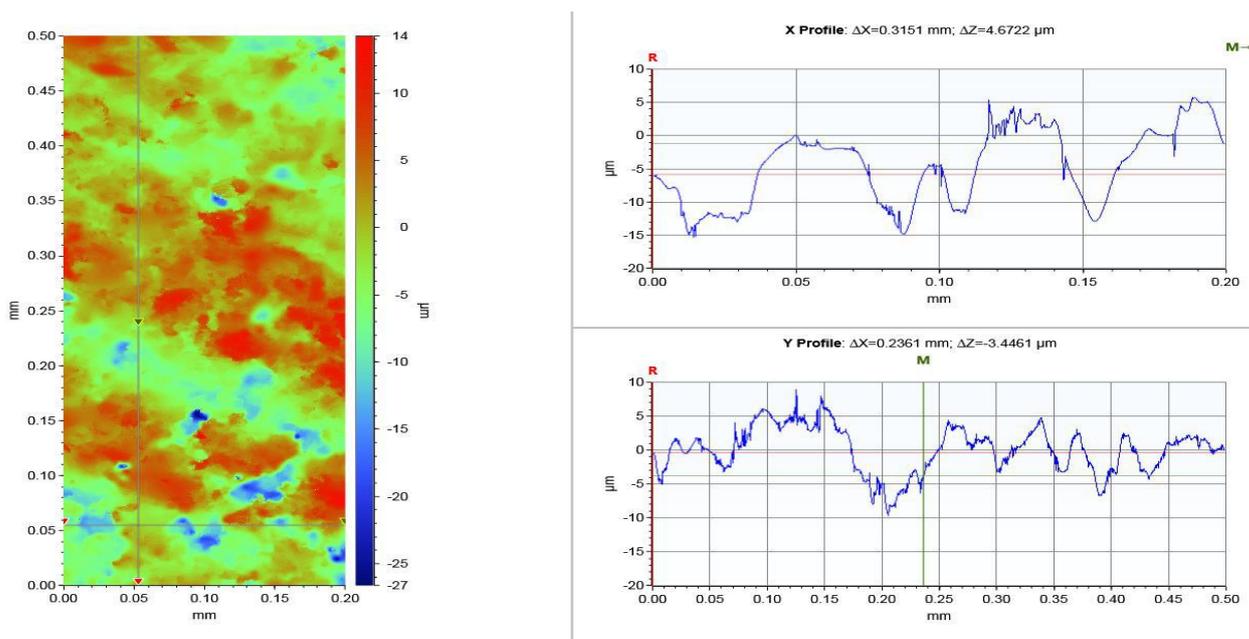
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 79 - Imagem tridimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 2 (amostra sem revestimento)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 80 - Imagem bidimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 2 (amostra sem revestimento)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

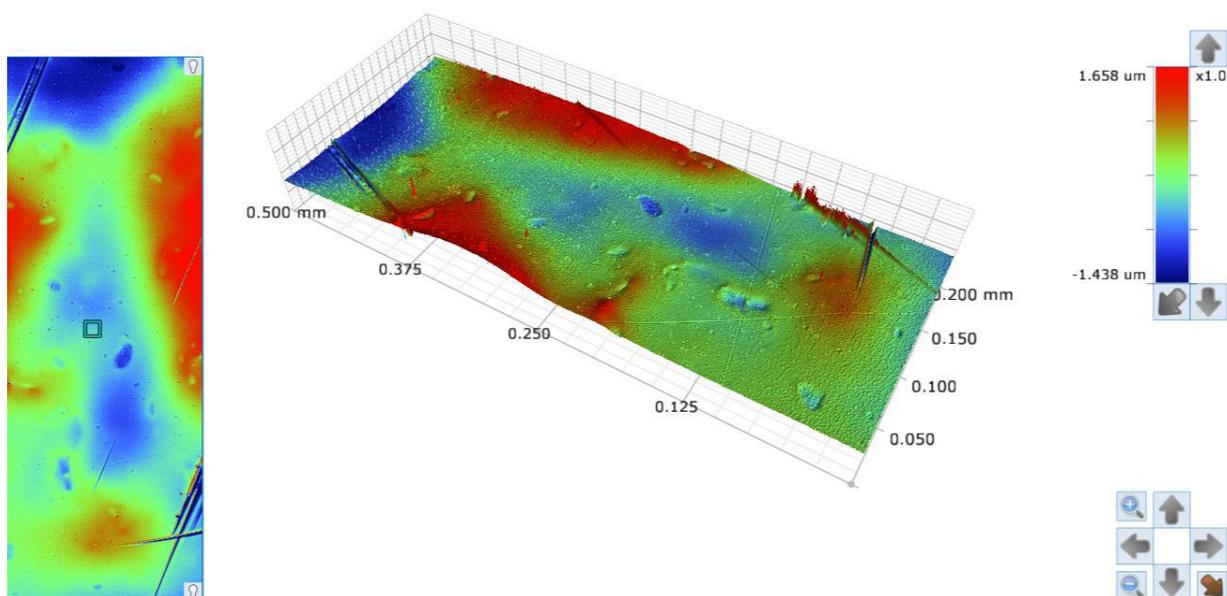
Os resultados de rugosidade superficial da amostra com revestimento vítreo são apresentados na Tabela 11. As imagens por perfilometria são apresentadas nas Figuras 81 e 82 (p.117 e 118).

Tabela 11 - Resultados de rugosidade da amostra com revestimento vítreo por critério de Parâmetros RD

Varreduras	Sa (μm)	Sku	Sp (μm)	Sq (μm)	Ssk	Sv (μm)	Sz (μm)
Varredura área 1	0,085	5,821	1,659	0,116	0,338	-1,439	3,098
Varredura área 2	0,134	2,225	1,098	0,158	-0,166	-1,007	2,105
Varredura área 3	0,158	3,760	1,226	0,209	0,085	-0,690	1,916
Varredura área 4	0,163	2,488	0,765	0,199	0,026	-0,664	1,428
Média	0,135	3,574	1,187	0,171	0,071	-0,950	2,137
Desvio Padrão	0,036	1,641	0,370	0,043	0,208	0,361	0,701

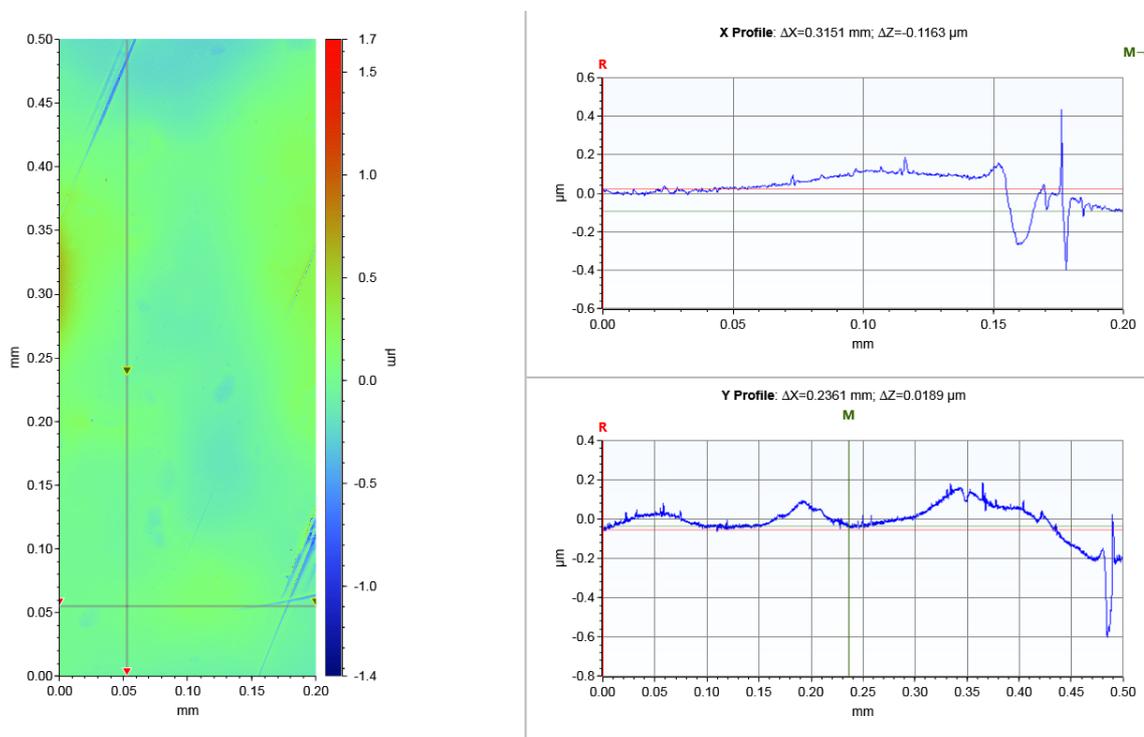
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 81 - Imagem tridimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 1 (com revestimento vítreo)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 82 - Imagem bidimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 1 (com revestimento vítreo)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

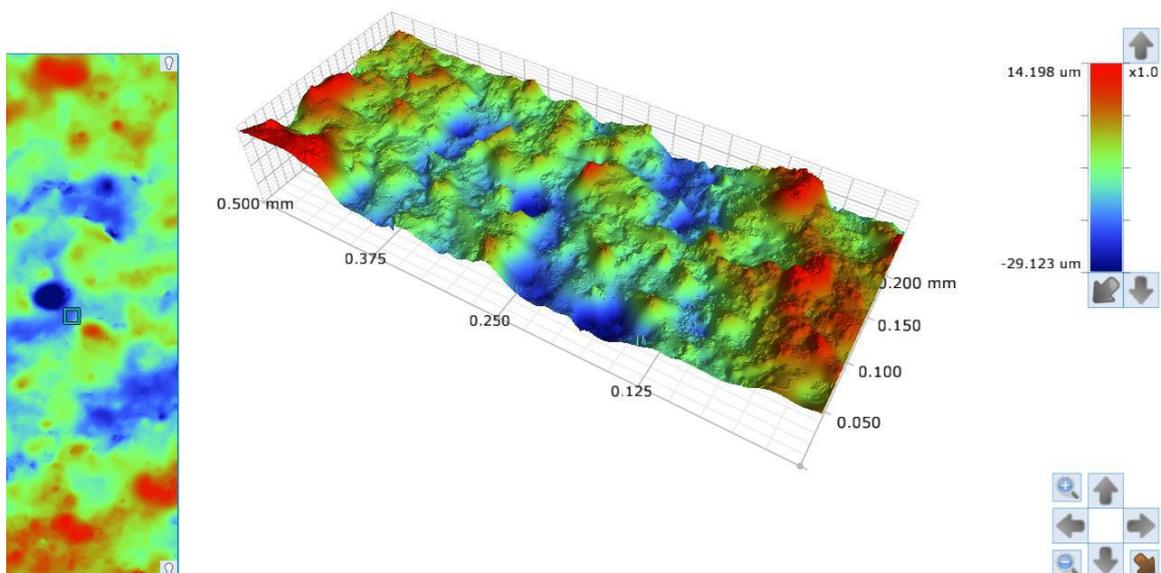
Os resultados de rugosidade superficial da amostra com revestimento em EPS+Tolueno são apresentados na Tabela 12. As imagens por perfilometria são apresentados nas Figuras 83 e 84 (p.119).

Tabela 12 - Resultados de rugosidade da amostra com revestimento em EPS+Tolueno por critério de Parâmetros RD

Varreduras	Sa (µm)	Sku	Sp (µm)	Sq (µm)	Ssk	Sv (µm)	Sz (µm)
Varredura área 1	2,453	7,753	28,796	3,262	0,206	-53,050	81,846
Varredura área 2	3,759	3,941	14,340	4,902	-0,020	-29,116	43,457
Varredura área 3	3,747	4,689	20,794	4,895	0,738	-17,362	38,156
Varredura área 4	2,497	3,495	17,150	3,169	0,104	-19,834	36,983
Média	3,114	4,970	20,270	4,057	0,257	-29,841	50,111
Desvio Padrão	0,738	1,920	6,268	0,972	0,334	16,279	21,344

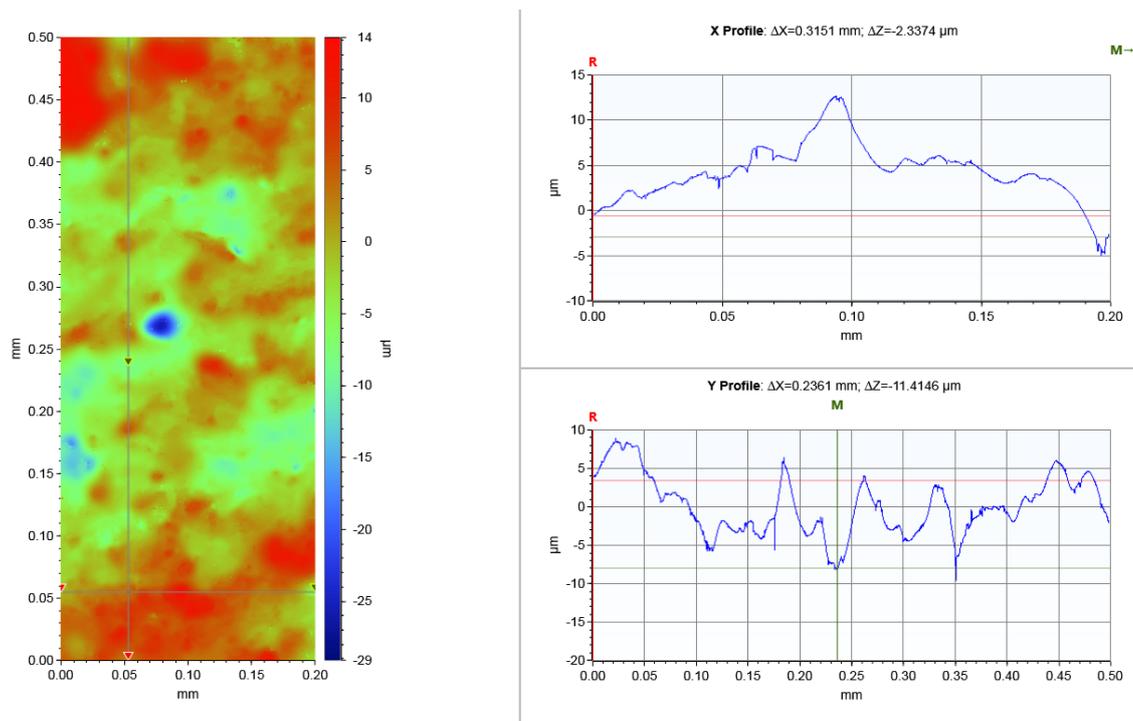
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 83 - Imagem tridimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 2 (EPS+Tolueno)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 84 - Imagem bidimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 2 (EPS+Tolueno)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

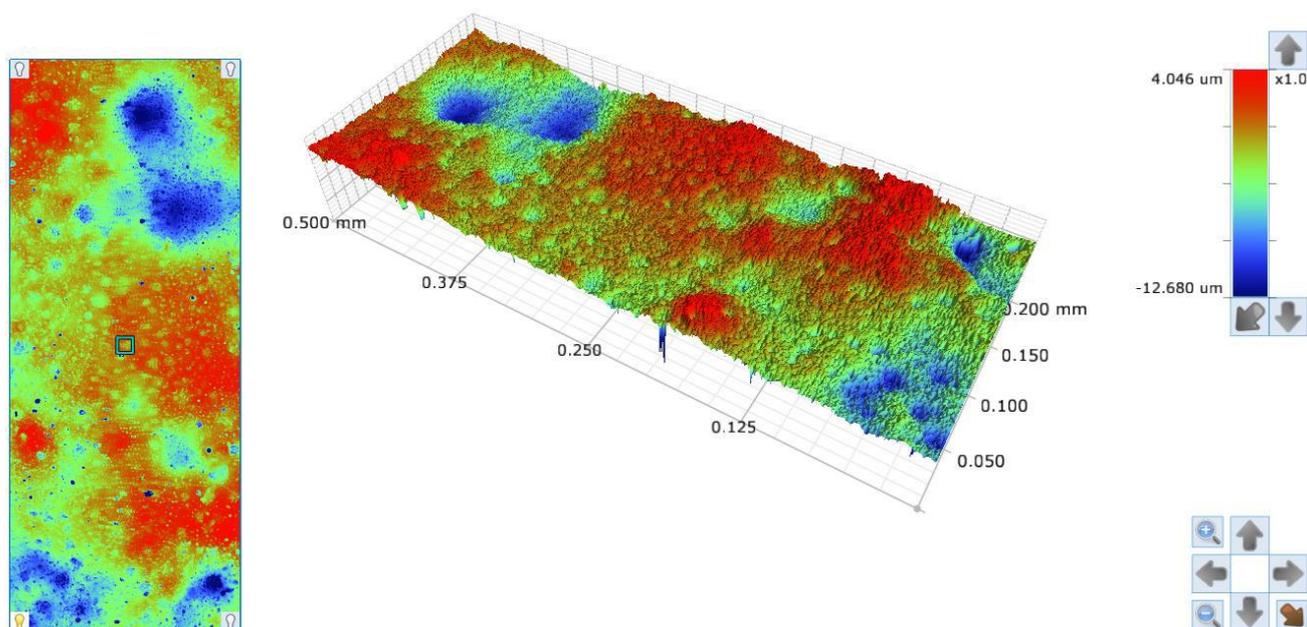
Os resultados de rugosidade superficial da amostra com revestimento em EPS+ Clorofórmio são apresentados na Tabela 13. As imagens por perfilometria são apresentados nas Figuras 85 e 86 (p.120 e 121).

Tabela 13 - Resultados de rugosidade da amostra com revestimento em EPS+Clorofórmio por critério de Parâmetros RD

Varreduras	Sa (μm)	Sku	Sp (μm)	Sq (μm)	Ssk	Sv (μm)	Sz (μm)
Varredura área 1	1,014	7,522	6,407	1,387	-0,934	-13,065	19,473
Varredura área 2	0,978	5,528	8,779	1,297	-0,957	-11,947	20,726
Varredura área 3	1,385	3,382	4,865	1,756	-0,363	-11,677	16,542
Varredura área 4	1,049	4,926	4,178	1,345	-0,831	-12,643	16,821
Média	1,107	5,340	6,057	1,446	-0,771	-12,333	18,391
Desvio Padrão	0,188	1,713	2,040	0,210	0,278	0,635	2,042

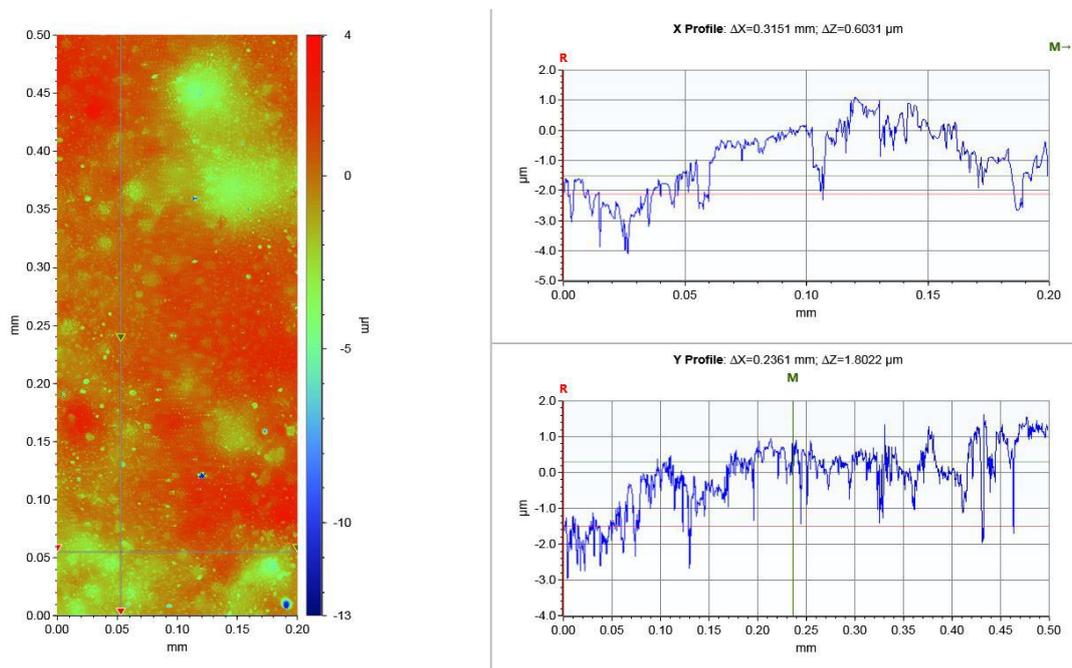
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 85 - Imagem tridimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 3 (EPS+Clorofórmio)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Figura 86 - Imagem bidimensional por perfilometria óptica do perfil após restauração de dados - Varredura da área 3 (EPS+Clorofórmio)



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Com os resultados obtidos, foram elaboradas as tabelas 14,15 e 16 (p.122 a 124), as quais mostram os resultados das rugosidades superficiais mais relevantes de avaliação (S_a , S_q e S_z). Foram realizados então, os testes de análise de variância ANOVA - Fator único por meio do programa Microsoft Excel de cada rugosidade citada, para análise estatística dos resultados e comparação das quatro populações (tipos de rugosidade/revestimento), utilizando nível de confiança de 95% e nível de significância $\alpha = 5\%$. Os resultados são apresentados nas tabelas 14.a e 14.b (p.122), 15.a e 15.b(p.123) e 16.a e 16.b (p.124),respectivamente.

Tabela 14 - Resultados de rugosidade S_a das amostras ensaiadas por critério de Parâmetros RD

Varreduras	S_a (μm) sem revest.	S_a (μm) revest. esm.vítreo	S_a (μm) EPS+Tolueno	S_a (μm) EPS+Clorof.
Varredura área 1	3,72	0,085	2,453	1,014
Varredura área 2	3,991	0,134	3,759	0,978
Varredura área 3	2,91	0,158	3,747	1,385
Varredura área 4	3,246	0,163	2,497	1,049
Média	3,467	0,135	3,114	1,107
Desvio Padrão	0,482	0,036	0,738	0,188

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Tabela 14.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (Rugosidade S_a)

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
S_a (μm) sem revest.	4	13,867	3,467	0,233
S_a (μm) revest..esm.vítreo	4	0,54	0,135	0,001
S_a (μm) EPS+Tolueno	4	12,456	3,114	0,545
S_a (μm) EPS+Clorof.	4	4,426	1,107	0,035

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Tabela 14.b - Resultado Anova - Rugosidade S_a (Fator único)

Fonte da variação	SS	Df	MS	F	P-Value	F crítico
Entre grupos	30,64408019	3	10,2146934	50,20019793	4,5858E-07	3,490294819
Dentro dos grupos	2,44174975	12	0,203479146			
Total	33,08582994	15				

Fonte: Produzido pelo próprio autor

SS: Soma dos quadrados

Df: Grau de liberdade

MS: Soma média dos quadrados

F: Razão entre as variâncias

P: Probabilidade

Tabela 15 - Resultados de rugosidade S_q das amostras ensaiadas por critério de Parâmetros RD

Varreduras	S_q (μm) sem revest.	S_q (μm) revest. esm.vítreo	S_q (μm) EPS+Tolueno	S_q (μm) EPS+Clorof.
Varredura área 1	4,728	0,116	3,262	3,262
Varredura área 2	4,996	0,158	4,902	4,902
Varredura área 3	3,593	0,209	4,895	4,895
Varredura área 4	4,037	0,199	3,169	3,169
Média	4,339	0,171	4,057	4,057
Desvio Padrão	0,64	0,043	0,972	0,972

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Tabela 15.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (Rugosidade S_q)

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
S_q (μm) sem revest.	4	17,354	4,339	0,410
S_q (μm) revest..esm.vítreo	4	0,682	0,171	0,002
S_q (μm) EPS+Tolueno	4	16,228	4,057	0,946
S_q (μm) EPS+Clorof.	4	5,785	1,446	0,044

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Tabela 15.b - Resultado Anova - Rugosidade S_q (Fator único)

Fonte da variação	SS	Df	MS	F	P-Value	F crítico
Entre grupos	49,36501219	3	16,45500406	46,95916782	6,62447E-07	3,490294819
Dentro dos grupos	4,20493075	12	0,350410896			
Total	53,56994294	15				

Fonte: Produzido pelo próprio autor

SS: Soma dos quadrados

Df: Grau de liberdade

MS: Soma média dos quadrados

F: Razão entre as variâncias

P: Probabilidade

Tabela 16 - Resultados de rugosidade S_z das amostras ensaiadas por critério de Parâmetros RD

Varreduras	S_z (μm) sem revest.	S_z (μm) revest. esm.vítreo	S_z (μm) EPS+Tolueno	S_z (μm) EPS+Clorof.
Varredura área 1	38,682	3,098	81,846	19,473
Varredura área 2	41,246	2,105	43,457	20,726
Varredura área 3	27,733	1,916	38,156	16,542
Varredura área 4	32,41	1,428	36,983	16,821
Média	35,018	2,137	50,111	18,391
Desvio Padrão	6,112	0,701	21,344	2,042

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Tabela 16.a - Soma, média e variância das amostras ensaiadas (Rugosidade S_z)

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
Sq (μm) sem revest.	4	140,071	35,018	37,362
Sq (μm) revest..esm.vítreo	4	8,547	2,137	0,492
Sq (μm) EPS+Tolueno	4	200,442	50,111	455,551
Sq (μm) EPS+Clorof.	4	73,562	18,391	4,169

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Tabela 16.b - Resultado Anova - Rugosidade S_z (Fator único)

Fonte da variação	SS	Df	MS	F	P-Value	F crítico
Entre grupos	5157,240184	3	1719,080061	13,81970444	0,000337091	3,490294819
Dentro dos grupos	1492,720834	12	124,3934028			
Total	6649,961018	15				

Fonte: Produzido pelo próprio autor

SS: Soma dos quadrados

Df: Grau de liberdade

MS: Soma média dos quadrados

F: Razão entre as variâncias

P: Probabilidade

A partir das análises ANOVA - Fator único das rugosidades S_a , S_q e S_z apresentadas pelas amostras, rejeita-se a hipótese nula H_0 de que as médias são iguais para $p < \alpha$ e $F > F_{crítico}$, indicando que há diferença estatística significativa entre os grupos comparados.

Foi possível analisar por meio da Tabela 14.b (p.122) que o valor de *Pvalue* foi menor do que α ($4,5858E-07 < 0,05$) e que o valor de *F* encontrado foi maior do que o *F* crítico ($50,20019793 > 2,01660069$). Também foi possível analisar por meio da Tabela 15.b (p.123) que o valor de *Pvalue* foi menor do que α ($6,62447E-07 < 0,05$) e que o valor de *F* encontrado foi maior do que o *F* crítico ($46,95916782 > 2,01660069$). Ainda na Tabela 16.b (p.124) observou-se que o valor de *Pvalue* foi menor do que α ($0,000337091 < 0,05$) e que o valor de *F* encontrado foi maior do que o *F* crítico ($13,81970444 > 2,01660069$).

Portanto, pode-se concluir que as rugosidades superficiais *Sa*, *Sq* e *Sz* dos grupos analisados, são estatisticamente diferentes.

5.7 Ensaio de Resistividade Elétrica

Para os revestimentos aplicados nos substratos cerâmicos (EPS + THF, EPS + Tolueno e EPS + Clorofórmio), foram obtidos os seguintes valores de resistividade e condutividade elétrica mostrados na Tabela 17:

Tabela 17 - Resultados obtidos de resistividade e condutividade elétrica

<i>Revestimento</i>	<i>Resistividade Elétrica em</i> <i>MΩ/m²</i>	<i>Condutividade Elétrica em</i> <i>ηS/m²</i>
<i>Esmalte Vítreo</i>	<i>33.333</i>	<i>0,03</i>
<i>EPS+THF</i>	<i>50.000</i>	<i>0,02</i>
<i>EPS + Tolueno</i>	<i>25.000</i>	<i>0,04</i>
<i>EPS + Clorofórmio</i>	<i>14.286</i>	<i>0,07</i>

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Portanto, pelos resultados acima obtidos conclui-se que os materiais mais promissores usados como revestimento dos substratos cerâmicos não possuem características condutoras, o que não implicará em riscos de condução elétrica superficial.

Salienta-se ainda, que os isoladores na condição real de trabalho em campo possuem em toda a sua parte superior, grande área de contato com os cabos condutores que são amarrados com fios de alumínio para garantir a sua fixação na cabeça dos mesmos.

Assim, mesmo com essa grande área de contato em alguma parte da superfície dos isoladores com a presença dos revestimentos utilizados, não haverá em condições normais, passagem de corrente elétrica na superfície dos mesmos.

5.8 Envelhecimento Acelerado por Radiação Ultravioleta

O objetivo do ensaio em questão foi o de avaliar as alterações no comportamento hidrofílico/ hidrofóbico a partir da degradação térmica e fotooxidativa das finas camadas dos recobrimentos poliméricos aplicados.

A Figura 87 mostra os corpos de prova colocados em béqueres e depois no interior da câmara, antes do início da realização do ensaio de UV.

Figura 87 - Detalhe das amostras de EPS + Clorofórmio, EPS + Tolueno, EPS + THF, esmalte vítreo e sem nenhum revestimento antes do ensaio de UV



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Após os corpos de prova terem sido expostos aos níveis de radiação ultravioleta através da simulação da incidência da luz solar com o uso de lâmpadas no interior da câmara de UV, observou-se como mostra a Figura 88 (p.127), uma perda de

aderência em parte das superfícies das amostras revestidas com EPS + THF e EPS + Clorofórmio. Já nas amostras revestidas com EPS + Tolueno e esmalte vítreo, tal situação não ocorreu. Além disso, nenhuma amostra apresentou alteração significativa de coloração.

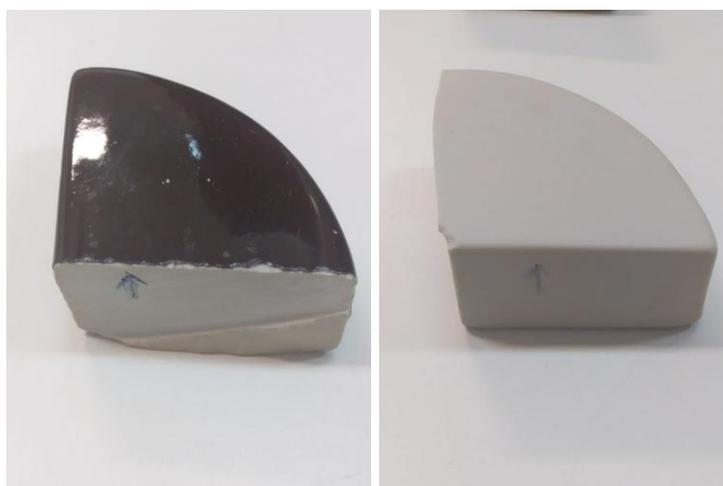
Figura 88 - Detalhe das amostras de EPS + Clorofórmio(a), EPS + Tolueno(b), EPS + THF (c), esmalte vítreo (d) e sem nenhum revestimento (e) após o ensaio de UV



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

Fonte: Produzido pelo próprio autor

6. CONCLUSÃO

A técnica por aerógrafo se demonstrou mais eficiente do que a técnica por gotejamento para todas as amostras analisadas, pelo fato de que a aderência obtida na primeira técnica para todos os filmes poliméricos aplicados, foi nitidamente melhor.

Observou-se que todos os revestimentos com o uso do poliestireno expandido (EPS), apresentaram resultados mais satisfatórios em relação ao ângulo de contato, do que os silicões de uso comercial utilizados.

Ficou evidenciado que o aproveitamento de material reciclado (EPS) para uso na aplicação proposta do presente trabalho, tem em si mesmo, uma relevante contribuição econômica e ecológica, beneficiando a sociedade de uma forma ampla e geral.

Nenhum dos recobrimentos testados, apresentou super-hidrofobicidade, ou seja, ângulo de contato igual ou superior a 150° . O revestimento com EPS + Clorofórmio obteve a melhor performance, com um valor médio de $109,63^\circ$ com aplicação por aerógrafo.

Verificou-se que os valores médios obtidos para as rugosidades S_a , S_q e S_z após a aplicação nos substratos com revestimentos em EPS+Tolueno e EPS+Clorofórmio foram maiores que os valores obtidos com o uso de revestimento com esmalte vítreo. Tal situação comprova o que é expresso na teoria, ou seja, quando algumas gotas de água entram em contato com uma superfície com maior rugosidade, o líquido não pode penetrar totalmente dentro da textura da superfície, formando assim uma interface composta, a qual aumenta a repelência ao líquido pela superfície e conseqüentemente faz com que o ângulo de contato aumentasse o seu valor.

A aplicação dos recobrimentos de EPS+Tolueno e EPS+Clorofórmio sobre a superfície dos substratos cerâmicos diminuiu os valores médios de rugosidade S_a e S_q e portanto, é o que teria provocado um incremento nos valores dos ângulos de contato envolvidos.

O perfil de rugosidade apresentado através dos resultados dos valores médios pelo critério dos parâmetros RD para o revestimento EPS+Tolueno assemelha-se ao perfil apresentado pela superfície sem recobrimento.

Com os resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica realizados, ficou evidenciado que os revestimentos de EPS+THF, EPS+Tolueno e EPS+Clorofórmio não comprometeriam a performance dos isoladores elétricos nas condições reais de campo, uma vez que em condições normais, não haveria a passagem de corrente elétrica através da superfície dos mesmos.

7. AÇÕES FUTURAS

Ampliar a realização de estudos do poliestireno expandido (EPS) e sua combinação com outros materiais, uma vez que além de ser um material de refugio, o mesmo se encaixa nos quesitos de ter fácil disponibilidade, baixo custo, boa apolaridade e hidrofobicidade.

Avaliar de maneira mais detalhada, os aspectos de toxicidade dos solventes utilizados no presente trabalho de pesquisa e que foram preparados junto com o EPS. Por serem altamente voláteis, isto é, se evaporam facilmente, os mesmos podem ser inalados (introduzidos no organismo humano através da aspiração, pelo nariz ou boca), o que torna necessário um estudo técnico para o uso de EPI's e EPC's adequados no que se refere ao processo industrial fabril de aplicação, a fim de se evitar danos à saúde dos trabalhadores envolvidos no processo.

Efetuar estudos no sentido de proceder novos experimentos com a adição de elemento plastificante, de forma a melhorar as condições de aderência dos revestimentos nas superfícies dos substratos cerâmicos, considerando os resultados obtidos no ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta.

Proceder a realização de ensaio de névoa salina através da exposição dos substratos revestidos a uma atmosfera bastante agressiva de cloreto de sódio, de forma a simular a exposição dos mesmos à uma atmosfera marítima, o que poderia afetar o comportamento hidrofóbico dos recobrimentos utilizados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, R. e KHEREBY, M. **Fabrication of durable and cost effective superhydrophobic cotton textiles via simple one step process.** Cellulose. 2015.

ABDELAZIZ, E., et al. Prevention of the Interruptions due to the Phenomena of the Electric Insulators Pollution. IN FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONTROL, COMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING. 2004.

ABIQUIM: Associação Brasileira da Indústria Química. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br>> Acesso em: 18 jul. 2018

ABRAPEX: **Associação Brasileira do Poliestireno Expandido**: disponível em <<http://www.abrapex.com.br>> acesso: 12 de novembro de 2017.

AGUIAR, R.; PASKOCIMAS, C.A.; LEITE, E.R.; LONGO, E.; MAURÍCIO, M.R.D. **Desenvolvimento do pigmento condutor SnO₂-Sb₂O₃ e sua aplicação em vidrados semicondutores.** Cerâmica. V.50, SP, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT IEC/TS 62073**; guia da medição da hidrofobicidade nas superfícies de isoladores. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR ISO 4287**; Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Anuário brasileiro de cerâmica - 2003.** São Paulo: ABC, 2003.

ANDREOLI, E., **Materiais elétricos: Compêndio de trabalhos**: Vol.1. Materiais Isolantes, Foz do Iguaçu. UNIOESTE, 2010.

AZEREDO, A. Estudo e avaliação de diferentes nucleantes na morfologia e nas propriedades de propileno. 2010. 127p. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BERTHOMIEU, C.; HIENERWADEL, R. **Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. Photosynth. Res.**, [S. l.], v. 101, n. 2-3, p. 157-170, 2009.

BORRELLY, D. **Estudo comparativo da degradação de poliestireno e de poliestireno de alto impacto por envelhecimento natural e artificial.** 2002. 108p. Dissertação (Mestrado em engenharia química) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

BURNS, S.A. e LANE, T.H. Lane, **Top. Microbiol. Immunol.**, 210, 1996, 3-12.

CAMARGO, C. C. de B. **Transmissão de energia elétrica.** Florianópolis. Ed. da UFSC, 1984.

CALLISTER JR., W. D; RETHWISH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817p.

CANEVAROLO Jr., S. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CELESC. **Manual Especial - Sistema de desenvolvimento de sistemas de distribuição E-313.0011**. Santa Catarina, 2009. Disponível em <http://www.celesc.com.br/portal/images/arquivos/normas-tecnicas/especificacoes-tecnicas/e3130011.pdf>. Acesso em 01 de jul. 2017.

CETESB. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmicas Branca e de Revestimentos**. São Paulo, 2006.

CHOI, W. et al. A modified Cassie–Baxter relationship to explain contact angle hysteresis and anisotropy on non-wetting textured surfaces. **Journal of Colloid and Interface Science**. p. 208 – 216. 2009.

COELCE. **Procedimento de execução - PEX-062/2006 R-01 - Lavagem de isoladores em linhas de transmissão e subestações desenergizadas**. Ceará, 2006.

COELCE. **Procedimento de execução - PEX-028/2006 R-03 - Lavagem de isoladores em linhas de transmissão e subestações energizadas**. Ceará, 2006.

COELCE. **Procedimento de execução - PEX-008/2006 R-06 - Procedimento para execução de redes de média tensão energizadas**. Ceará, 2006.

CRUZ JR., E.C.A; ANICETO, L.P. **Instalações elétricas: Fundamentos, Prática e Projetos em instalações residenciais e comerciais**. 1.ed. São Paulo: Ed. Érica Ltda, 2011.

DUMÉ, B., Turning the lotus effect on its head, **Physics Web**, 2005, Disponível em <http://physicsweb.org/objects/news/9/4/3/0504031.jpg>. Acesso em 16 jul. 2017.

EPS BRASIL. Disponível em < www.epsbrasil.eco.br > Acesso em: 18 jun. 2018.

EXL, F.; KINDERSBERGER, J. **Contact angle measurement on insulator surfaces with artificial pollution layers and various surfaces roughnesses**. XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29, 2005.

FEARON, F.W.G., **High performance polymers**. (Editores R. Seymour e G. Kirsbaum) Elsevier, 1986.

FERRAROLI, F., NASCIMENTO, A., CALLIS, P., *et al.* Polímeros do Futuro – tendências e oportunidades: palestras técnicas (II). **Polímeros**. 2003.

FERREIRA, C. F. Obtenção de superfície super-hidrofóbica a partir de nanocompósitos de PS e EPS com nanopartículas de ZnO modificado. 2016, 85f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - Cefet-MG, Belo Horizonte.

FUCHS, D.R., **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas**; teoria das linhas em regime permanente. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; Itajubá, Escola Federal de Engenharia,1977.

FRAZER, L., Titanium dioxide: environmental White Knight, **Environmental Health Perspective**, 2001. v.109, n.4, p. 174-177.

GOMES, M.L.;RODRIGUES,A.J. **Aisladores**.Disponível em <http://www.lespana.es/peasodeproyecto/ aisladores.jtm>. Acesso em 27 de jun.2017.

HARDMAN,B., Silicones, *Encycl. Polym. Sci. Eng.*,1989.

ISOLADORES SANTA TEREZINHA. Disponível em <http://www.cst-isoladores.com.br/portugues/ produtos>. Acesso em 16/10/2017.

LAKOWICZ, J.R. **Principles of fluorescence spectroscopy**, 3ª edição, Springer, 2009.

LEITE, D. M. e Kanashiro, A. G. **Projeto de Pesquisa em isoladores poluídos**. Revista Mundo Elétrico, São Paulo, 1985.

LIEBERMANN, J. New effective ways toward solving the problem of contamination of porcelain insulators. **Refractories and Industrial Ceramics**, v.43, n.1-2, p.55-64. 2002.

LIMA, Eng. Milvio. R. **Comunicação pessoal**.CELESC.2006.

LI,J.;GAO,J. Influence of sintering atmospheres on the wetting behaviors of titanium dioxides by molten metals. **Mater.Lett**, p.1323-1326, 2010

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MANO,E.B. **Polímeros como materiais de engenharia**. Rio de Janeiro. Editora Edgard Blucher Ltda,2003.

MARYNIAK, W., *et al.*, **Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements:Using a Concentric Ring Probe Technique**. Trek Application Note, 2003. p. 1-4.

MATSUI, S., et al.State of the art of Semiconducting Glazed Insulators for Transmission Lines in Heavily Contaminated Area.IN PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS. 1997. SEOUL, KOREA.

MELLO, D. R. et al. 2001. **Avaliação do grau de poluição em instalações de transmissão, subestações e distribuição**. Anais do I Citenel.2001.

NOLL, W. **Chemistry and Technology of Silicones**. New York: Academic Press, 1968.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: E. Blucher,1994.

OLIVEIRA, M.C., MAGANHA, M.F.B. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas branca e de revestimentos** (Série P + L) - São Paulo: CETESB, 2006. 84p.

OWEN, M.J., **Chemtech**. Chimie Nouvelle, 2004.

PEREIRA, A.P.C.; OLIVEIRA, D.M.S.; BROCHADO, M.A.R.; CRUZ, P.C.F.D. **Efeito Lotus**. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Outubro, 2010.

PORTELLA, K.F.; PIAZZA, F.; INONE, P.C.; RIBEIRO JR, S.; CABUSSÚ, M.S. Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador. **Quím.Nova**, v.31, n.2, p.340-348. 2008

PRETTE, G.L.A. Desenvolvimento de esmaltes cerâmicos: Aplicação em isoladores de alto desempenho. 2007, 77f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - UFSC, Santa Catarina.

QING, Y., ZHENG, Y., HU, C., WANG, Y., HE, Y., GONG, Y. e MO, Q. Facile approach in fabricating superhydrophobic zno/polystyrene nanocomposite coating. **Applied Surface Science**. 2013.

QUERE, D., Wetting and roughness. **Annu.Ver. Mater.** p. 71 -99. 2008.

RABELLO, M. Aditivação de polímeros. São Paulo: Artliber Editora, 2011. p. 240.

ROCHOW, E.G., **Silicon and silicones**. Springer-Verlag, 1987.

SARON, C.; FELISBERTI, M. I.; SANCHEZ, E. M. S. **Construção de um simulador ambiental para envelhecimento acelerado de polímeros**. Unicamp- Instituto de Química-Departamento de Físico-Química, Campinas-SP. 2006

SARAIVA, D.B. Isolantes e Dielétricos. In:_____. **Materiais elétricos**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988. p.98-107.

SHIRAKAWA, H.; IKEDA, S. Polymer Journal. V.2, p.231, 1971.

TOPALIS, F.V., GONOS, I. F. e STATHOPULOS, I. A. 2001. Dielectric behavior of polluted porcelain insulators. **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.** 2001, v.148, pp. 269 - 274.

TEIXEIRA, Mariane Mendes. **Resistividade elétrica; Brasil Escola**. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/resistividade-eletrica.htm>>. Acesso em 28 jun. 2017.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Tradução da 4.ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier Ltda, 1984. 567p.

WATTS, R.J., KONG, S., HALING, C.S., GEARHART, L., FRYE, C.L. **Water Res.**, 1995.

XUE, C., JIA, S., ZHANG, J. E QIANG, L. Superhydrophobic surfaces on cotton textiles by complex coating of sílica nanoparticles and hydrophobization. **Thin Solid Films**. 2009.

ZHANG, M.; WANG, C. Fabrication of cotton fabric with superhydrophobicity and flame retardancy. **Carbohydrate Polymers**.p. 396– 402. 2013

ZHIJIN, G., WANG, J., WU, L., WANG, X. LÜ, G. E LIAO L. Fabrication of Super Hydrophobic Surfaces on Copper by Solution-immersion. **Energy, resources and environmental technology**. 2013.

APÊNDICE A - DADOS TÉCNICOS DO ESTEARATO DE MAGNÉSIO E SOLVENTES UTILIZADOS

O presente apêndice detalha as principais características técnicas do estearato de magnésio e dos solventes utilizados no presente trabalho, as quais são de relevante importância para fins de análise e esclarecimentos adicionais dentro do contexto das atividades realizadas.

- ESTEARATO DE MAGNÉSIO:

Fabricante: Casquímica Produtos Químicos Ltda			
Fórmula Molecular	$[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CO}_2]_2\text{Mg}$	Peso Molecular	591.24 g/mol
Ponto de fusão	88 °C	Densidade	1,09 g/mol a 25°C

Fonte: Catálogo Casquímica (2018)

- TETRAIDROFURANO (THF):

Fabricante: Sigma-Aldrich			
Fórmula Molecular	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	Ponto de ebulição	65-67°C
Peso Molecular	72.11 g/mol	Pressão de Vapor	143 mm Hg (20°C)
Densidade	0.889 g/mL a 25°C	Constante Dielétrica	7.52 a 22°C
Índice de Refração	1.407 a 20°C	* UV cutoff	220 nm
Ponto de fusão	-108°C	Viscosidade (cP)	0.456 a 25°C

Fonte: Catálogo Sigma-Aldrich (2018)

- ACETONA PURA:

Fabricante: Sigma-Aldrich			
Fórmula Molecular	$(\text{CH}_3)\text{COCH}_3$	Ponto de ebulição	56°C
Peso Molecular	58.08 g/mol	Pressão de Vapor	184 mm Hg (20°C)
Densidade	0.791 g/mL a 25°C	Constante Dielétrica	21.01 a 20°C
Índice de Refração	1.359 a 20°C	UV cutoff	330 nm
Ponto de fusão	- 94°C	Viscosidade (cP)	0.306 a 25°C

Fonte: Catálogo Sigma - Aldrich (2018)

- CICLOHEXANO:

Fabricante: Sigma-Aldrich			
Fórmula Molecular	C ₆ H ₁₂	Ponto de ebulição	80,74 °C
Peso Molecular	84,16 g/mol	Pressão de Vapor	168,8 mm Hg (20°C)
Densidade	0,78 g/mL a 20°C	Constante Dielétrica	2.0 a 20°C
Índice de Refração	1,426 a 20°C	UV cutoff	200 nm
Ponto de fusão	6.5 °C	Viscosidade (cP)	1.02 a 17 °C

Fonte: Catálogo Sigma-Aldrich (2018)

- TOLUENO:

Fabricante: Sigma-Aldrich			
Fórmula Molecular	C ₆ H ₅ CH ₃	Ponto de ebulição	110-111°C
Peso Molecular	92.14 g/mol	Pressão de Vapor	22 mm Hg (20°C)
Densidade	0. 865 g/mL a 25°C	Constante Dielétrica	2.38 a 23°C
Índice de Refração	1.496 a 20°C	UV cutoff	286 nm
Ponto de fusão	-93°C	Viscosidade (cP)	0.560 a 25°C

Fonte: Catálogo Sigma-Aldrich (2018)

- CLOROFÓRMIO:

Fabricante: Sigma-Aldrich			
Fórmula Molecular	CHCl ₃	Ponto de ebulição	60.5-61.5°C
Peso Molecular	119.38 g/mol	Pressão de Vapor	160 mm Hg (20°C)
Densidade	1.492 g/mL a 25°C	Constante Dielétrica	4.81 a 20°C
Índice de Refração	1. 445 a 20°C	UV cutoff	245 nm
Ponto de fusão	-63°C	Viscosidade (cP)	0.537 a 25°C

Fonte: Catálogo Sigma-Aldrich (2018)

APÊNDICE B - TIPOS DE ISOLADORES

O presente apêndice visa apresentar informações e figuras sobre os principais tipos de isoladores cerâmicos utilizados nas redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, os quais poderão ser recobertos com os polímeros hidrofóbicos descritos no presente trabalho, para a melhoria do seu desempenho.

Quanto à sua aplicação, os isoladores elétricos de porcelana podem ser divididos em isoladores tipo roldana, pino, castanha, suspensão ou disco, pilar, bastão, suporte, pedestal e bucha.

O uso desses tipos de isoladores nas redes elétricas leva em conta os níveis de tensão que eles estarão submetidos, além dos esforços a serem suportados, peso, tamanho, etc. Os níveis de tensão das redes elétricas são classificados em baixa, média, alta, extra-alta e ultra-alta tensão. A baixa tensão compreende as tensões até 1KV, sendo os níveis de tensão usuais de 127/220V, 115/230V, 220/380V e 440V. A média tensão compreende as tensões acima de 1 KV até 35 KV, sendo que os níveis de tensão usuais são 3,8;6,6;13,8 e 34,5 kV. A alta tensão compreende as tensões acima de 35 KV até 230 KV, sendo os níveis usuais de tensão de 69;88;138 e 230 KV. A extra-alta tensão compreende as tensões acima de 230 KV até 750 KV, sendo os níveis usuais de tensão de 345;440;500 e 600 KV(CC). A ultra-alta tensão compreende as tensões acima de 750 KV(CC), sendo os níveis usuais de tensão de 765 KV (Usina Itaipu-Brasil), 800 KV (China),1000 KV (Japão) e 1150 KV (Rússia).

A seguir são mostrados os tipos de isoladores elétricos de porcelana acima referenciados.

A.1 Isolador tipo roldana

O primeiro tipo de isolador apresentado é o de roldana (spool type). Possui um furo axial para a passagem de um eixo não integrante, pelo qual é fixado na estrutura de suporte. São utilizados predominantemente em montagens horizontais em redes de distribuição secundária urbana e rural secundária (baixa tensão, de 127 a 440 V (SANTA TEREZINHA, 2018).

Na figura A.1.1 a seguir, é mostrado um modelo deste isolador.

Figura A.1.1 - Isolador de porcelana do tipo roldana



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

A.2 Isolador tipo pino

São próprios para montagem rígida vertical em cruzeta ou diretamente ao topo do poste. Estão disponíveis nas tensões nominais de 7,2 KV até 72,5 KV. De acordo com o nível de tensão que o isolador suporta, ele pode ser de dois tipos (monocorpo e multicorpo). São utilizados predominantemente em redes de distribuição rural e urbana primária. Com menor frequência, são utilizados em linhas de subtransmissão de até 72kV (SANTA TEREZINHA,2018).

Há diferentes tipos de isoladores do tipo pino, no que se refere ao nível de poluição do meio de utilização. Aqueles do tipo antipoluição apresentam maior distância de escoamento e são usados em ambientes cuja atmosfera é carregada de poluentes, como no caso da orla marítima. A geometria específica dificulta as fugas de corrente para a estrutura onde o isolador está fixado, atenuadas pelos poluentes (MAMEDE, 2013).

Nas figuras A.2.1 e A.2.2 (p.140), são mostrados modelos destes isoladores.

Figura A.2.1 - Isolador de porcelana do tipo pino (monocorpo)



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

Figura A.2.2 - Isolador de porcelana do tipo pino (multicorpo)



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

A.3 Isolador tipo castanha

O isolador tipo castanha (strain type) é um modelo projetado para converter o esforço de tração exercido por um condutor ou estai, em esforço de compressão simétrico no corpo do isolador. São usados em estais de postes de distribuição ou em ancoragem das linhas de distribuição (fim de linha). São utilizados predominantemente em redes de distribuição urbana e rural secundária (baixa tensão, de 127 a 440 V (SANTA TEREZINHA, 2018).

Na figura A.3.1 (p.141), é mostrado um modelo deste isolador.

Figura A.3.1 - Isolador de porcelana do tipo castanha



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

A.4 Isolador de suspensão ou disco

O isolador tipo disco é um isolador de cadeia em forma de disco côncavo-convexo, com ferragens integrantes em ambas as faces destinadas a ligá-lo flexivelmente a um suporte, ao condutor ou a outros isoladores, podendo formar assim, cadeias de vários elementos. As cadeias formadas por esse tipo de isolador são articuladas nos engates que podem ser do tipo concha-bola, garfo-olhal-redondo e garfo-olhal-quadrado. São utilizados em redes de distribuição urbana e rural primária e em linhas de transmissão. Podem ser associados em série, formando longas cadeias dependendo do nível de tensão a suportar (SANTA TEREZINHA, 2018).

Estes isoladores são mostrados respectivamente nas figuras A.4.1 e A.4.2 e A.4.3 (p.142).

Figura A.4.1 - Isolador de porcelana tipo disco com engate concha-bola



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

Figura A.4.2 - Isolador de porcelana tipo disco com engate garfo-olhal-redondo



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

Figura A.4.3 - Isolador de porcelana tipo disco com engate garfo-olhal-quadrado



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

A.5 Isolador tipo pilar

O isolador tipo pilar para linha (line post), possui forma cilíndrica tendo pequenas saias na superfície externa, entalhe e pescoço na parte superior e ferragens para fixação na parte inferior. São projetados para serem instalados rigidamente em uma estrutura de suporte por meio de base metálica. São utilizados predominantemente, em redes de distribuição rural e urbana primária (média tensão até 38kV) e com menor frequência em linhas de subtransmissão de até 72kV. Existe também o isolador tipo pilar para estação (station post), que de

forma semelhante ao modelo anterior, possui a diferença de possuir peças metálicas para fixação, nas suas duas extremidades (SANTA TEREZINHA,2018). Estes isoladores são mostrados respectivamente nas figuras A.5.1, A.5.2 e A.5.3 (p.144).

Figura A.5.1 - Isolador de porcelana tipo pilar para linha



Fonte: Germer (2015)

Figura A.5.2 - Isolador de porcelana tipo pilar para estação



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

Figura A.5.3 - Isolador de porcelana tipo pilar para estação (linhas de 69 KV)



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

A.6 Isolador tipo bastão

Os isoladores tipo bastão (long-rod) são constituídos de uma única peça de porcelana cujo comprimento é de acordo com o nível de isolamento desejado. Possuem engate garfo (campânula) e olhal redondo (pino), semelhante aos dos isoladores de disco. Estão disponíveis nas tensões de 15,25 e 35 KV podendo ser conectados em série para tensões maiores (SANTA TEREZINHA,2018).

Na figura A.6.1 a seguir, é mostrado um modelo deste isolador.

Figura A.6.1 - Isolador de porcelana tipo bastão



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

A.7 Isolador tipo suporte

Os isoladores de porcelana tipo suporte (post type) apresentam núcleo maciço. Estão disponíveis nas tensões de 1,2 KV a 36,2 KV. São muito usados em cubículos e subestações nas tensões mencionadas (SANTA TEREZINHA, 2018).

Na figura A.7.1 a seguir, é mostrado um modelo deste isolador.

Figura A.7.1 - Isolador de porcelana tipo suporte



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

A.8 Isolador tipo pedestal

O isolador tipo pedestal (cap-and-pin) possui semelhanças com os isoladores do tipo pino multicorpo, no que se refere às grandes saias na superfície externa. É dotado de campânula com furos rosqueados na extremidade superior e um pedestal com furos lisos correspondentes na extremidade inferior. Destina-se a fixar rigidamente um condutor ou outro equipamento elétrico a um suporte, em instalações externas. Pode ser usado de forma unitária ou em associação com outras unidades. São usados para isolamento de barramentos em subestações de 15 a 500 KV (SANTA TEREZINHA, 2018).

Na figura A.8.1 (p.146), é mostrado um modelo deste isolador.

Figura A.8.1 - Isolador de porcelana tipo pedestal



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)

A.9 Isolador tipo bucha

O isolador tipo bucha é um isolador oco que permite a passagem de um condutor através de seu centro conectando equipamentos e isolando esse condutor de partes metálicas. Os isoladores tipo bucha possuem diversas aplicações, dentre as quais destacam-se o uso em buchas de transformadores, buchas de entrada para cabines e cubículos de medição e manobra, disjuntores e seccionadores. São disponíveis em tensões de 1,3 KV até 36,2 KV (SANTA TEREZINHA, 2018).

Na figura A.9.1 a seguir, é mostrado um modelo deste isolador.

Figura A.9.1 - Isolador de porcelana tipo bucha



Fonte: Isoladores Santa Terezinha (2018)