

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RECOBRIMENTOS HIDROFÓBICOS PARA USO EM ISOLADORES PORCELÂNICOS
DE ALTA TENSÃO

Área de Concentração: Materiais Particulados

Mestrando: César Augusto Fontanella

Orientador: Prof. Dr. Dachamir Hotza

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Pedro Novaes de Oliveira

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2007

RECOBRIMENTOS HIDROFÓBICOS PARA USO EM ISOLADORES PORCELÂNICOS DE ALTA TENSÃO

CÉSAR AUGUSTO FONTANELLA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, ÁREA DE
CONCENTRAÇÃO MATERIAIS PARTICULADOS

Prof. Dr. Dachamir Hotza

Orientador

Prof. Dr. Antônio Pedro N. de Oliveira

Coorientador

Prof. Dra. Coordenadora do Programa Ana Maria Maliska

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Guilherme Mariz de Oliveira Barra

Prof. Dr. Carlos Renato Rambo

Prof. Dr. Ricardo Antônio Francisco Machado

A minha família,
pela compreensão, apoio e incentivo.

Agradecimentos

Inicialmente eu gostaria de expressar a minha gratidão aos professores Dachamir Hotza e Antônio Pedro Novaes de Oliveira pela orientação e proposição do tema.

Ao professor Guilherme Mariz de Oliveira Barra pelas importantes contribuições para a realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, por estarem sempre disponíveis e também ao secretário do curso de pós-graduação, Rogério Antonio Campos, pelos serviços prestados.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, pela utilização da infra-estrutura e laboratórios, que possibilitaram diversos ensaios.

Ao aluno de pós-graduação em Engenharia Química Gerson A. Fernandes pela colaboração nos ensaios de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta.

Aos alunos do curso de Engenharia de Materiais, Jony Tomelin e William Wiggers pelo auxílio na preparação dos corpos de prova e realização de medidas de ângulo de contato respectivamente.

Ao professor Dr. Sérgio Artur Bianchini Bilac e aos colegas Eng. Ricardo A. Santos e Eng^a. Suzy Pascoali pelas sugestões e incentivo.

Aos meus colegas do CEFET/SC Manoel Alfredo Pereira, Hélio Ormeu Ribeiro, Jaime Domingos Teixeira, Anésio B. Brand e Ennes E. de Souza pelo companheirismo.

À empresa Porcelanas Industriais Germer pela confecção dos corpos de prova cerâmicos.

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

RESUMO

Neste trabalho foram estudados experimentalmente recobrimentos poliméricos formados por acrílico, poliéster, poliuretano e silicone sobre substratos cerâmicos. Os recobrimentos foram aplicados em forma de resina líquida por meio de uma pistola, exceto o poliéster que foi depositado na forma de pó. Medidas de ângulo de contato entre as superfícies e a água foram efetuadas por meio de um goniômetro para caracterizar o comportamento hidrofóbico dos recobrimentos. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios que simulavam a ação da intempérie, como névoa salina, envelhecimento acelerado por radiação UV e erosão. As espessuras das camadas e alterações microscópicas nas superfícies foram estudadas com o auxílio de microscópio óptico. Como um parâmetro que afeta a hidrofobicidade, avaliou-se também as rugosidades das diversas superfícies. Para avaliar o desempenho dos diversos recobrimentos, incluíram-se nos ensaios corpos de prova com recobrimento de esmalte cerâmico, apenas para efeito comparativo. Os resultados demonstraram que o recobrimento com silicone apresentou ângulo de contato de aproximadamente 116° , comportamento 35% superior aos outros recobrimentos poliméricos, que apresentaram ângulos de contato com valores próximos de 90° sendo, contudo, o material que apresentou a maior perda de hidrofobicidade após o ensaio de erosão. Medidas complementares com o goniômetro indicaram decréscimo nos ângulos de contato após os ensaios mantendo-se, no entanto, o comportamento hidrofóbico em todos os recobrimentos poliméricos. O recobrimento de esmalte cerâmico, como esperado, apresentou comportamento hidrofílico.

ABSTRACT

Polymeric coatings made of acrylic, polyester, polyurethane and silicone upon ceramic substrates were experimentally studied in this work. The coatings were applied in the form of a liquid resin by means of a pistol, except for the polyester which was applied by dust deposition. Contact angle measurements between the surfaces and the water were taken with a goniometer in order to characterize the coating hydrophobic behavior. The samples were submitted to essays simulating wasting away phenomena such as saline haze, UV radiation accelerated aging and erosion. The layer thickness and surface microscopic alterations were studied with the help of an optical microscope. As a parameter which affects hydrophobicity the several surface roughness were also evaluated. In order to evaluate the several coating performance proof essay samples with glaze coating were also included, merely for the sake of comparison. Results demonstraed that silicone coatings presented contact angles around 116° , a behavior 35% higher than those of other polymeric coatings which presented a contact angle around 90° ; being nevertheless, the material which most hydrophobicity loss following the erosion essay. Complementary goniometer measurements indicated a decrease in contact angles following essays, maintaining, however, the hydrophobic behavior in all polimeric coatings. As expected, the glaze coating presented a hydrophilic behavior.

Lista de Figuras

Figura 1 – Isolador elétrico com linha de fuga isolada (Gomes, 2005).....	24
Figura 2 – Isolador elétrico para névoa (Gomes, 2005).....	24
Figura 3 – Passagem de corrente por condutividade superficial (Gomes, 2005).....	25
Figura 4 – Isolador elétrico para alto nível de contaminação (Liebermann, 2002).....	25
Figura 5 – Linha de fuga (Gomes, 2005).....	26
Figura 6 – Distância disruptiva (Gomes, 2005).....	26
Figura 7 – Tensões superficiais e ângulo de contato entre uma gota e uma superfície sólida.....	38
Figura 8 – Líquidos de diferentes molhabilidades: (A) molha o sólido e (B) não molha o sólido.....	38
Figura 9 – Estrutura química do silicone (Canevarolo Jr., 2002).....	42
Figura 10 – Diagrama esquemático de um medidor de ângulo de contato.....	52
Figura 11 – Goniômetro DATA PHYSICS do Laboratório LMPT (EMC) – UFSC.....	53
Figura 12 – Câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	55
Figura 13 – Câmara para ensaio de exposição à névoa salina.....	57
Figura 14 – Dispositivo projetado e construído para os ensaios de erosão por jateamento, com o corpo de prova na posição para o ensaio.....	59
Figura 15 – Câmara de jateamento do CEFET/SC.....	60
Figura 16 – Rugosímetro eletromecânico (Rosa, 2006).....	62
Figura 17 – Sistema da linha média (Rosa, 2006).....	63
Figura 18 – Diferentes perfis de rugosidade, porém com o mesmo valor de Ra.....	64
Figura 19 – Valores médios dos ângulos de contato entre a água e os recobrimentos antes dos ensaios.....	66
Figura 20 – Imagem de uma gota de água, antes dos ensaios, sobre o recobrimento: (A)acrílico, (B) poliéster, (C) poliuretano, (D) esmalte cerâmico e (E) silicone.....	67
Figura 21 – Variação dos valores médios dos ângulos de contato entre a água e os recobrimentos durante o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	69

Figura 22 –	Corpos de prova antes do ensaio (esquerda) e após o ensaio (direita) de envelhecimento acelerado por radiação UV com recobrimento de: (A) silicone, (B) poliéster, (C) poliuretano, (D) esmalte cerâmico e (E) acrílico.....	70
Figura 23 –	Fotomicrografias em vista superior com aumento de 100x, dos recobrimentos depois do ensaio de envelhecimento acelerado por radiação UV: (A) acrílico, (B) poliéster, (C) poliuretano, (D) silicone e (E) esmalte cerâmico.....	72
Figura 24 –	Valores médios dos ângulos de contato antes e após o ensaio de névoa salina.....	73
Figura 25 –	Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de acrílico: (a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.....	75
Figura 26 –	Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de poliéster:(a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.....	75
Figura 27 –	Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de poliuretano: (a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.....	76
Figura 28 –	Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de silicone: (a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.....	76
Figura 29 –	Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de esmalte cerâmico: (a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.....	76
Figura 30 –	Varição de massa dos corpos de prova com os diversos recobrimentos....	79
Figura 31 –	Fotomicrografia da superfície de um corpo de prova recoberto com poliéster, mostrando uma partícula de areia incrustada na superfície, após o ensaio de erosão por jateamento. Vista superior com aumento de 200x..	80
Figura 32 –	Perda média de massa dos corpos de prova ao final do ensaio de erosão....	81
Figura 33 –	Varição dos ângulos de contato com o ensaio de erosão: (A) antes e (B) depois do ensaio.....	82
Figura 34 -	Espessura das camadas dos recobrimentos.....	84
Figura 35 –	Fotomicrografia, com aumento de 100x, mostrando os substratos recobertos com: (A) acrílico, (B) poliéster, (C) poliuretano, (D) silicone e (E) esmalte cerâmico.....	85

Figura 36 – Gráfico comparativo dos valores médios de Ra.....	87
Figura 37 – Gráfico comparativo dos valores médios de Rq.....	87
Figura 38 – Gráfico comparativo dos valores médios de Rz.....	88
Figura 39 – Gráfico comparativo dos valores médios de Rmax.....	88
Figura 40 – Perfil de rugosidade para recobrimento com acrílico.....	89
Figura 41 – Perfil de rugosidade para recobrimento com esmalte.....	89
Figura 42 – Perfil de rugosidade para recobrimento com poliéster.....	89
Figura 43 – Perfil de rugosidade para recobrimento com poliuretano.....	90
Figura 44 – Perfil de rugosidade para recobrimento com silicone.....	90
Figura 45 – Perfil de rugosidade para amostras sem recobrimento.....	90

Lista de Tabelas

Tabela 1 –	Classes de contaminação e caracterização ambiental (Liebermann, 2002).....	29
Tabela A.1 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de acrílico antes dos ensaios.....	101
Tabela A.2 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliéster antes dos ensaios.....	102
Tabela A.3 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliuretano antes dos ensaios.....	102
Tabela A.4 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de silicone antes dos ensaios.....	103
Tabela A.5 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de esmalte antes dos ensaios.....	103
Tabela A.6 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliuretano após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	104
Tabela A.7 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de esmalte cerâmico após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	104
Tabela A.8 –	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de silicone após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	105
Tabela A.9 –	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de acrílico após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	105
Tabela A.10 –	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliéster após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado.....	106
Tabela A.11 –	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliuretano após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	106

Tabela A.12 –	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de esmalte após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	107
Tabela A.13 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de silicone após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	107
Tabela A.14 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de acrílico após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	108
Tabela A.15 –	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliéster após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado.....	108
Tabela A.16 –	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de silicone após o ensaio de névoa salina.....	109
Tabela A.17 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de acrílico após o ensaio de névoa salina.....	109
Tabela A.18 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliuretano após o ensaio de névoa salina.....	110
Tabela A.19 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliéster após o ensaio de névoa salina.....	110
Tabela A.20 -	Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de esmalte cerâmico após o ensaio de névoa salina.....	111
Tabela A.21 -	Variação de massa (em gramas) dos corpos de prova com recobrimento de acrílico durante o ensaio de erosão.....	111
Tabela A.22 -	Variação de massa (em gramas) dos corpos de prova com recobrimento de silicone durante o ensaio de erosão.....	111
Tabela A.23 -	Variação de massa (em gramas) dos corpos de prova com recobrimento de poliéster durante o ensaio de erosão.....	112
Tabela A.24 -	Variação de massa (em gramas) dos corpos de prova com recobrimento de poliuretano durante o ensaio de erosão.....	112
Tabela A.25 -	Variação de massa dos corpos de prova com recobrimento de esmalte cerâmico durante o ensaio de erosão.....	112
Tabela A.26 -	Ângulos de contato (em graus) depois do ensaio de erosão.....	113

Tabela A.27 -	Espessura das camadas (em μm).....	114
Tabela A.28 -	Medidas de R_a (em μm) para os diversos tipos de recobrimento.....	114
Tabela A.29 -	Valores médios de R_a (em μm).....	115
Tabela A.30 -	Valores médios de R_q (em μm).....	115
Tabela A.31 -	Valores médios de R_z (em μm).....	115
Tabela A.32 -	Valores médios de R_{max} (em μm).....	115

Lista de Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
CEFET/SC	Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
LMPT	Laboratório de Materiais Porosos e Propriedades Termodinâmicas
LCP	Laboratório de Controle de Processos
LASUS	Laboratório de Análise de Superfícies
NBR	Norma Brasileira
S	Desvio Padrão
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Problemática e Justificativa.....	16
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo Geral.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Organização da Dissertação	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 Isoladores Elétricos	21
2.1.1 Características Básicas.....	21
2.1.2 Descargas Disruptivas (Flashover)	27
2.1.3 Esmaltes Cerâmicos	30
2.1.4 Superfícies Antipoluentes	33
2.2 Hidrofobicidade e Materiais Hidrofóbicos.....	36
2.2.1 Hidrofobicidade	36
2.2.2 Materiais Hidrofóbicos	40
2.2.2.1 Silicone	41
2.2.2.2 Acrílico	43
2.2.2.3 Poliéster	44
2.2.2.4 Poliuretano	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 Materiais.....	48
3.1.1 Substrato	48
3.1.2 Recobrimentos	49
3.2 Ensaio	50
3.2.1 Ângulo de Contato	52
3.2.2 Envelhecimento Acelerado por Radiação Ultravioleta.....	54
3.2.3 Névoa Salina.	56
3.2.4 Erosão	58
3.2.5 Microscopia Óptica.....	61
3.2.6 Rugosidade.....	62

3.3 Desenvolvimento Experimental	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1 Ângulo de Contato	66
4.2 Envelhecimento Acelerado por Radiação Ultravioleta.	68
4.3 Névoa Salina	73
4.4 Erosão	77
4.5 Microscopia Óptica	83
4.6 Rugosidade	86
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	93
5.1 Conclusões	93
5.2 Sugestões	95
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
ANEXOS	101

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se contextualizar o tema do trabalho e também apresentar a maneira como esta dissertação foi organizada.

1.1 Problemática e Justificativa

As linhas de transmissão de energia elétrica no Brasil costumam ser extensas, porque as grandes usinas hidrelétricas estão geralmente situadas a grandes distâncias dos centros consumidores de energia. O fato de o país estar quase totalmente interligado por linhas de transmissão de alta tensão permite que as diferentes regiões permutem energia entre si. Isto possibilita que regiões com produção insuficiente de energia sejam abastecidas por centros de geração em situação mais favorável. As linhas de transmissão geralmente são aéreas e compostas por extensos cabos metálicos, sustentados por torres, através de cadeias de isoladores e ferragens.

O desempenho de uma linha de transmissão, analisado sob o aspecto de manutenção, leva em conta o número e a duração das intervenções em cada linha de transmissão, ocorrência de falhas e defeitos registrados. A manutenção de linhas de transmissão é feita com base em inspeções e em dados estatísticos que permitem prever a necessidade de intervenções. Um dos principais instrumentos de diagnóstico das linhas de transmissão é a inspeção aérea, servindo para a programação das manutenções preventivas e corretivas das mesmas, sendo realizada periodicamente com helicóptero em vôo ao longo da linha. Esta inspeção aérea de patrulhamento procura identificar os pontos que possam colocar em risco a linha de transmissão (CTEEP, 2006).

Um das causas de grandes interrupções nas redes e de desperdício de energia nas linhas de transmissão são as correntes de fuga nos isoladores, que são intensificadas em ambientes sob poluição industrial ou com atmosfera muito salina. Há a necessidade de diminuir estas perdas na transmissão da energia elétrica visando desenvolver isoladores com melhor desempenho sob tais condições ambientais e reduzir os prejuízos às empresas distribuidoras de energia elétrica. Estas podem sofrer muitos prejuízos com os isoladores danificados, na manutenção e na 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 componentes cerâmicos com o recobrimento de uma camada fina e contínua de esmalte cerâmico que, após a queima, adquire o aspecto vítreo. Esta camada vítrea contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e elétricas. Esses isoladores cerâmicos apresentam propriedades adequadas nas linhas de transmissão de energia elétrica em grandes distâncias, sendo excelentes dielétricos e com 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.

Um inconveniente desses isoladores é o fato de as suas superfícies serem constituídas de óxidos metálicos que possuem alta energia, o que têm como consequência a alta molhabilidade. Isto pode ocasionar a formação de película de água que, se for contínua por toda a altura do isolador, é capaz de conduzir corrente e fechar um arco e em decorrência disto incapacitar a passagem de energia elétrica pela rede. Este fenômeno é mais conhecido como flashover. Esse problema vem se agravando com o aumento da poluição ambiental e a crescente concentração das indústrias no litoral, pois a poluição e os sais com o decorrer do tempo vão se depositando sobre a superfície do isolador até alcançar uma concentração tal que, em um momento de chuva ou neblina, podem tornar a película contínua condutora e causar descargas disruptivas.

Várias soluções vêm sendo adotadas para minimizar esse problema. Uma delas é a inspeção e lavagem periódica dos isoladores para retirada dos depósitos. Outra solução é alterar a geometria do isolador para dificultar as correntes de fuga e facilitar a limpeza natural dos poluentes sobre a superfície do isolador pela ação do vento e da chuva ou, ainda, alterar o recobrimento superficial das peças.

Para evitar as quedas de energia algumas empresas de distribuição de energia elétrica mantêm equipes de manutenção com caminhões-robôs com lava jato em constante atividade. Porém, essa prática apenas ameniza o problema, já que a maresia é constante.

Nos EUA são utilizados isoladores poliméricos para alta tensão há trinta anos (Gubanski, 1990) e no Brasil algumas empresas produzem este tipo de componente. O problema é a fraca resistência à degradação pela insolação e intempéries. Uma prática desenvolvida na década de 90 para dificultar o flashover é utilizar recobrimento de filmes de

borracha de silicone vulcanizada à temperatura ambiente sobre os isoladores cerâmicos. 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.

Vários estudos têm sido realizados e materiais mais adequados são aplicados com razoável eficiência, inclusive compósitos. Outra solução proposta é o recobrimento com esmaltes semicondutores que, ao conduzirem parcialmente a corrente elétrica, sofrem um aquecimento e evitam a condensação do vapor de água que contém sais e poluentes (Aguiar, 2004).

Considerando o exposto acima, neste trabalho pretende-se verificar o comportamento de recobrimentos de diversos materiais hidrofóbicos que, ao repelirem a água, apresentam potencial para o uso em isoladores de alta tensão em ambientes de poluição e maresia podendo melhorar o seu desempenho elétrico.

Pretende-se, portanto, investigar as potencialidades dos recobrimentos poliméricos para aplicação sobre os isoladores porcelânicos de alta tensão, na redução da passagem de corrente elétrica causadora de descargas superficiais sob poluição ambiental e em atmosfera com grande concentração de sais visando minimizar o problema de flashover e conseqüente parada da rede que causam prejuízo às empresas distribuidoras de energia elétrica.

O resultado esperado é o desenvolvimento de produtos e processos que reverteram em significativa redução nas perdas de energia no sistema de distribuição das empresas concessionárias de energia.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

No âmbito deste trabalho de dissertação, pretendeu-se caracterizar recobrimentos que poderiam ser aplicados sobre as superfícies de isoladores elétricos de alta tensão, visando torná-las hidrofóbicas para evitar a formação de películas contínuas de água e conseqüentemente o acúmulo de sais e poluentes que poderiam desencadear descargas disruptivas, mais conhecidas na literatura como fenômeno de flashover.

Para tanto foram aplicados cinco tipos de recobrimentos diferentes sobre substratos cerâmicos e os corpos de prova foram submetidos a condições que simulavam situações reais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Além do objetivo geral, outros objetivos específicos foram estabelecidos:

- Caracterizar os diversos recobrimentos antes dos ensaios, quanto ao comportamento hidrofóbico/hidrofílico, através de medidas do ângulo de contato entre as superfícies e a água.
- Avaliar possíveis alterações nos ângulos de contato entre os recobrimentos e a água com:
 - o envelhecimento das superfícies por radiação ultravioleta.
 - a exposição à névoa salina.
 - a erosão por partículas de areia lançadas pelo vento.
- Estimar comparativamente a expectativa de vida dos recobrimentos frente ao desgaste por erosão de partículas de areia lançadas pelo vento.
- Caracterizar a espessura da camada hidrofóbica depositada na superfície dos substratos.
- Avaliar a relação entre a rugosidade e o comportamento hidrofóbico das superfícies dos recobrimentos.

- Comparar os recobrimentos, quanto a critérios de ângulo de contato, antes e após os diversos ensaios.
- Classificar os diversos recobrimentos superficiais quanto ao desempenho frente aos diversos ensaios.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, orientados no sentido de apresentar o trabalho desenvolvido ao longo desta investigação. No **primeiro capítulo**, pretende-se orientar o leitor para o tema deste trabalho, apresentando-se o contexto e as motivações que estiveram na base desta dissertação. Também se expõem os objetivos gerais e específicos da dissertação, bem como o modo como esta foi organizada. O **capítulo 2** constitui uma breve revisão bibliográfica sobre os temas isoladores elétricos e descargas disruptivas. Apresenta-se o comportamento elétrico dos isoladores, apontando as principais vantagens e inconvenientes dos diversos tipos de isoladores. Faz-se uma revisão sobre o esmalte cerâmico e sobre os recobrimentos poliméricos aqui analisados. Por fim, faz-se uma descrição do conceito de hidrofobicidade, assim como de alguns dos parâmetros que afetam a sua eficácia. No **capítulo 3**, apresentam-se os materiais e métodos usados durante a execução do trabalho experimental. Os resultados obtidos são apresentados, relacionados e discutidos no **capítulo 4**. Neste capítulo avalia-se o efeito dos recobrimentos poliméricos desenvolvidos sobre substratos cerâmicos na atividade de repelir a água e também se discute os resultados relativos às possíveis alterações após os ensaios. No **capítulo 5** faz-se uma síntese das principais conclusões resultantes do trabalho experimental realizado para o desenvolvimento desta dissertação e apresentam-se algumas idéias e sugestões para trabalhos futuros. No **capítulo 6**, enfim, apresenta-se a bibliografia que serviu de referência para este trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são abordados os conceitos teóricos que serviram de base para a execução deste trabalho. Começa-se fazendo uma breve revisão bibliográfica sobre isoladores elétricos, descargas disruptivas (flashover) e superfícies antipoluentes apontando as principais vantagens e os inconvenientes dos recobrimentos poliméricos. Dá-se especial ênfase à propriedade hidrofóbica. Referem-se também os fatores que afetam a medida do ângulo de contato e uma breve descrição dos métodos de medida envolvidos nos ensaios que foram realizados.

Para o processo de pesquisa torna-se necessário uma fundamentação teórica, através de revisão bibliográfica, onde serão abordados os seguintes temas:

- Isoladores elétricos
- Descargas disruptivas (Flashover)
- Esmaltes cerâmicos
- Superfícies antipoluentes
- Hidrofobicidade e materiais hidrofóbicos
- Polímeros (acrílico, poliéster, poliuretano e silicone)

2.1 Isoladores Elétricos

2.1.1 Características Básicas

Os isoladores porcelânicos estão entre os componentes cerâmicos mais produzidos para o setor elétrico no Brasil. Existem seis empresas no setor envolvendo um montante de US\$ 39 milhões de dólares em 2003, gerando cerca de 1700 empregos diretos, segundo a Associação Brasileira de Cerâmica. (ABC, 2003)

As porcelanas são cerâmicas produzidas com matérias-primas naturais e utilizadas na fabricação de uma grande variedade de produtos para aplicação na indústria eletroeletrônica.

Nestas cerâmicas, as ligações iônicas/covalentes restringem a mobilidade dos elétrons e as tornam bons isolantes elétricos. Entre os vários tipos de porcelanas, as mais utilizadas como isoladores elétricos são as porcelanas triaxiais compostas por quartzo, feldspato e argila.

Nas linhas de transmissão aéreas, para isolar os condutores sob tensão dos apoios que os suportam, utilizam-se materiais sólidos com propriedades dielétricas adequadas, chamados isoladores. Um isolador elétrico é um dispositivo utilizado para garantir o isolamento de fios ou cabos energizados com seus pontos de sustentação adjacentes. Exige-se, portanto, que o isolador possua uma grande capacidade de se opor à passagem de corrente elétrica, além de elevada resistência mecânica (Saraiva. 1988).

O isolador deve apresentar, além de apreciáveis características dielétricas, ótimas características mecânicas, tendo em vista a natureza severa do trabalho que irá realizar. O elemento deve suportar altas tensões de compressão, deve ser rígido e apresentar a superfície polida. Seu desenho deve ser tal que minimize a acumulação de linhas de fluxo eletrostáticas, o que não permitirá o rompimento de arcos elétricos na sua superfície. Seu desempenho eletromecânico deve se manter estável em quaisquer condições de umidade, temperatura, chuva, poeira, gases, etc. (Saraiva. 1988).

A classificação do material isolante pode ser através de vários critérios, como o das cargas livres ou das bandas de energia, no entanto, numa breve abordagem, a resistividade e a rigidez dielétrica são as propriedades elétricas fundamentais. A resistividade pode ser definida como a oposição que o material oferece à passagem de corrente elétrica enquanto que a rigidez dielétrica, segundo Saraiva (1988), é a propriedade do material se opor à descarga elétrica através de sua estrutura. Uma diferença entre esses dois conceitos é que no primeiro o material permanece intacto após um ensaio, pois há apenas a passagem de uma corrente elétrica, enquanto que no segundo há uma descarga elétrica que causa danos estruturais na peça.

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. As empresas de distribuição de energia elétrica estabelecem as exigências quanto à forma e às propriedades dos isoladores a serem usados em seus sistemas.

Além da forma geométrica, os isoladores são classificados de acordo com a tensão nominal que devem suportar e também conforme a distância que a corrente elétrica deve percorrer através do material. Esta distância é definida como distância de perfuração. Isoladores de baixa tensão trabalham com tensões nominais inferiores a 1000 V, possuindo um ou dois leitos vitrificados para acomodação de cabos condutores e distância de perfuração menor que a metade da distância a ser percorrida pela corrente elétrica ao longo da superfície do isolador. O formato dos isoladores elétricos é definido na etapa de conformação, que se dá por moldagem plástica com o uso de torneamento, por se tratar de peças radialmente simétricas.

Uma importante etapa produtiva é a secagem das peças após a conformação. Em termos de tecnologia cerâmica, a secagem consiste na remoção do líquido, geralmente água, que anteriormente conferia a trabalhabilidade necessária à peça.

Trata-se de uma etapa decisiva, na qual a retração volumétrica que ocorre simultaneamente à perda de água, requer uma série de cuidados para evitar que ainda nesta etapa apareçam trincas irreversíveis nas peças moldadas. Assim, ao se elaborar uma massa plástica para fins de conformação a úmido, deve-se levar em conta a retração esperada ao final da secagem. Uma grande retração requer cuidados especiais na secagem, o que pode acarretar um sério gargalo produtivo.

Os diversos tipos de isoladores mais utilizados podem ser classificados por diferentes critérios: material empregado na construção, constituição, adequação à tensão, etc.

O tipo de isolador mais adequado para um determinado local é definido a partir dos custos operacionais e desempenho eletromecânico. Estudos mostram que, tendo como base o custo operacional da cadeia de vidro temperado, em áreas poluídas o uso do isolador bastão composto é altamente compensador, com custo operacional 63% menor em alta tensão (AT – 138 kV) ou 20% menor em extra-alta tensão (EAT – 460 kV). Em regiões de vandalismo aparece a desvantagem do isolador disco de vidro temperado, sendo que o isolador de porcelana de alta confiabilidade e o isolador composto possuem custo similares em AT (até 80% mais econômicos do que o vidro; em EAT a porcelana é 35% mais econômica, com o composto dependendo da sua durabilidade. Nas situações normais, o isolador disco de vidro é a solução mais barata, com a porcelana sendo operacionalmente mais dispendiosa em 10% e o composto em até 133% mais dispendioso (Meloni, 2001).

A classificação em função da tensão está relacionada com a tensão nominal de linha à qual são referidas certas características operacionais do sistema. De acordo com Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, quanto às classes de tensões, os sistemas são classificados em Baixa Tensão, até 1kV; Média Tensão entre 1 kV e 69 kV e Alta Tensão acima de 69 kV.

Outra classificação importante é quanto ao meio onde são utilizados. Os isoladores para serviço em ambientes externos têm forma e constituição diferentes daqueles destinados a ambientes livres da intempérie. No primeiro caso, existem alguns tipos com características especiais, para serem utilizados em condições particulares, onde se deseja evitar a deposição de partículas ou elementos que possam modificar sua resistência elétrica superficial. Entre esses se podem citar como exemplo, os isoladores com linha de fuga isolada, onde a linha de fuga foi aumentada para se obter um isolamento satisfatório em ambientes muito empoeirados ou salinos, como mostra a Figura 1, e os isoladores projetados para se obter bom isolamento em ambientes de névoa intensa, representados na Figura 2 (Schmidt, 1979).

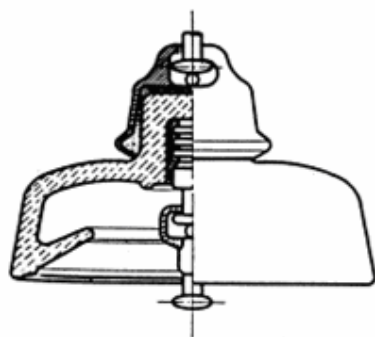


Figura 1 – Isolador elétrico com linha de fuga isolada (Gomes, 2005)

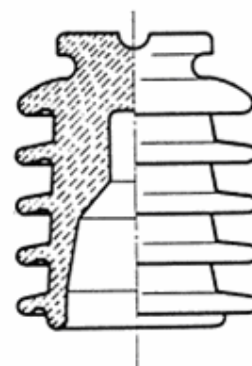


Figura 2 – Isolador elétrico para névoa (Gomes, 2005)

O objetivo fundamental do isolador é evitar a passagem de corrente do condutor ao apoio, o que pode ocorrer por condutividade da massa, por perfuração da massa do isolador, por descarga disruptiva através do ar ou por condutividade superficial.

A passagem de corrente por condutividade superficial ocorre contornando a parte exterior do isolador, por aumento de sua condutividade devido à deposição de uma camada de

umidade, de pó ou de sais sobre a superfície do isolador. Tal situação está representada na Figura 3.

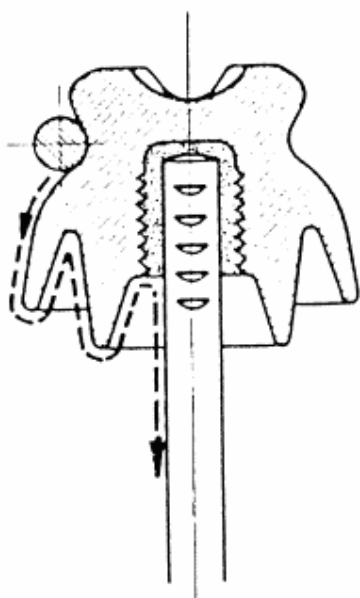


Figura 3 – Passagem de corrente por condutividade superficial (Gomes, 2005)

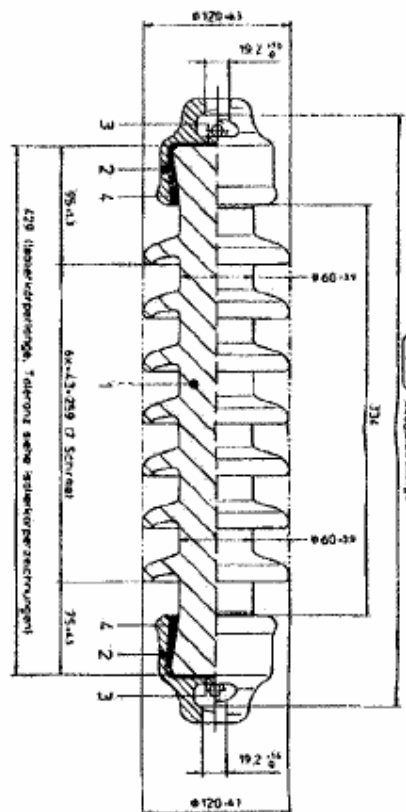


Figura 4 – Isolador elétrico para alto nível de contaminação (Liebermann, 2002).

As descargas por condutividade superficial podem ser atenuadas com projetos de perfil adequado dos isoladores para intempérie, como se mostra na Figura 4. Para aumentar a distância entre o condutor e o suporte e apresentar melhor desempenho sob umidade, o perfil dos isoladores se faz de maneira a aumentar a distância dielétrica, conseqüentemente elevando-se o valor de tensão necessária para que se forme o arco.

Dentre as características mínimas estabelecidas para os isoladores de linhas aéreas, de acordo com os organismos de normalização, algumas têm importante relação com o tema descargas disruptivas:

Linha de fuga. É a distância entre as forças condutoras do isolador, nas condições que se estabelecem para os ensaios de tensão disruptiva, medida sobre a superfície do isolador, como mostra a Figura 5.

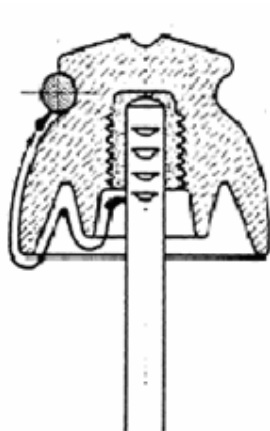


Figura 5 – Linha de fuga (Gomes, 2005)

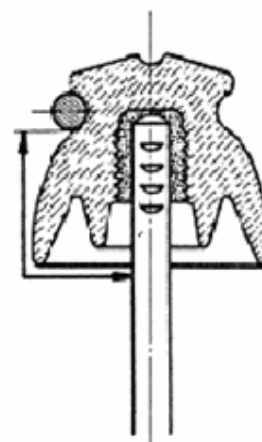


Figura 6 – Distância disruptiva (Gomes, 2005)

Distância disruptiva. Como mostra a Figura 6, é a distância, medida no ar, entre as peças componentes do isolador, nas condições estabelecidas para os ensaios de tensão disruptiva .

Tensão disruptiva. Denomina-se também tensão de contorno e corresponde ao valor eficaz da tensão, no qual se produz a descarga disruptiva ou descarga de contorno no isolador. A descarga disruptiva se produz 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.

A escolha dos isoladores adequados para cada fim deve levar em conta, além da frequência e tensão de serviço e esforços eletrodinâmicos que deve suportar a peça, o grau de contaminação ambiental e de condensação de umidade no local de instalação. A tendência é a utilização de projetos 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).

2.1.2 Descargas Disruptivas (Flashover)

As falhas em isolamentos elétricos estão entre as principais causas de interrupções no fornecimento de energia elétrica aos diversos consumidores supridos por um sistema de potência. No caso de linhas de transmissão, seu desempenho está diretamente relacionado ao desempenho dos isoladores (Nigri, 1999).

Para assegurar a continuidade e um bom funcionamento da distribuição de energia elétrica é importante, além da monitoração dos equipamentos que compõem o sistema, a antecipação de possíveis falhas.

No projeto de uma linha de transmissão torna-se necessário o conhecimento dos níveis de poluição das regiões por onde ela passará, com o objetivo de dimensionar o número de isoladores de tal forma a se obter o menor risco de falha (D'AJUZ, 1987).

A função dielétrica da superfície de um isolador é reduzida significativamente quando o mesmo é submetido a condições de chuva, nevoeiro ou de alta umidade relativa do ar. Esse comprometimento torna-se maior quando essa superfície encontra-se em ambiente poluído ou de alta salinidade. (Mello, 1999).

A presença de umidade em isoladores de extra alta tensão, com depósitos salinos ou industriais, freqüentemente causa descargas em suas superfícies. Estas descargas normalmente começam nas partes mais estreitas dos isoladores e em circunstâncias excepcionais podem ocorrer na superfície, causando a disrupção e o conseqüente desligamento da linha (D'Ajuz, 1987).

O fenômeno de flashover consiste na formação de um arco voltaico entre condutores ou entre partes energizadas e partes aterradas do sistema elétrico, através de uma camada de poluição ou sal depositada na superfície de um isolador.

O gradiente de tensão necessário para iniciar uma descarga no ar é de 30 kV/cm e como o gradiente médio de tensão na superfície do isolador de alta tensão é menor do que 0,5 kV_{rms}/cm é evidente que, antes de ocorrer a descarga, a distribuição de tensão sobre a superfície do isolador é muito pouco uniforme, e esta não uniformidade aumenta dependendo do tipo do isolador. Todavia, este aspecto não é decisivo já que a descarga dificilmente ocorre em tempo bom (D'Ajuz, 1987).

O fenômeno de flashover observado nos isoladores elétricos representa a conseqüência de um processo indeterminado que acontece em sucessivos estágios, de acordo com uma ordem bem definida. Primeiro há um depósito de uma camada de poluição (maresia, grãos de

areia, fuligem, etc.) na superfície do isolador, que pode levar tanto a uma condução espontânea quanto a uma condução após umidificação desta camada (umidade, chuva, nevoeiro, etc.) provocando a passagem de uma corrente de fuga que, de acordo com o efeito Joule, cria bandas secas (Abdelaziz et al, 2004).

A mais importante causa de perturbações nas superfícies dos isoladores é a formação dessas bandas secas. Quando a camada de poluição torna-se úmida, sua resistência decresce e uma apreciável corrente de fuga circula sobre a superfície do isolador (D'Ajuz, 1987).

A densidade desta corrente é maior em algumas partes, geralmente nas mais estreitas, ou seja, ao redor do pino. Como essas regiões secam mais rapidamente do que o restante, suas resistências aumentam, fazendo com que a potência dissipada no local também aumente. Com isso uma condição de instabilidade se desenvolve e é responsável pela formação de bandas secas ao redor do isolador formando "gaps". Como estas bandas são isoladas, poderá ocorrer a formação de centelhas através delas, até que aumentem em largura o suficiente para suportar a tensão aplicada. A disrupção existirá se uma das descargas através das bandas secas se estender através de toda a superfície úmida do isolador (D'Ajuz, 1987).

Por causa da concentração de correntes nos pinos do isolador, haverá algumas bandas secas que suportarão a tensão de pico, até haver a formação de centelhas em uma delas. Quando isso ocorrer, uma tensão maior é aplicada através das outras bandas, que irão descarregar em sucessão.

As descargas através das bandas secas usualmente irão se extinguir justamente antes da tensão passar por zero, mas se as solicitações de tensão e corrente forem suficientemente altas, as descargas podem estender-se por todo o comprimento da cadeia antes da extinção e produzir a disrupção (D'Ajuz, 1987).

A atmosfera poluída favorece a formação de uma camada constituída por substâncias que, dissolvidas em água, produzem soluções condutoras sobre a superfície do isolador. Enquanto a camada mantém-se seca não há alteração no comportamento dielétrico, no entanto, durante um processo de umidificação onde os sais contidos na camada não sejam removidos, podem ocorrer arcos sobre a superfície iniciando um processo que pode chegar a uma descarga disruptiva (flashover). Os arcos também geram ozônio que é um agente oxidante e causador de corrosão elétrica nos isoladores, agravando o problema (Mello, 1999).

O grau de contaminação superficial dos isoladores pode reduzir significativamente a tensão na qual se produz a descarga disruptiva, a qual tira de serviço a linha, conduzindo a

cortes de energia não planejados e diminuindo a confiabilidade do sistema. O Flashover é um processo relativamente complexo que ocorre através de diferentes fases: A formação de camadas de contaminação, aumento da corrente de fuga, a formação de banda seca, geração de arcos parciais e, se as condições são favoráveis, flashover e saída de serviço.

Os diferentes níveis de poluição em isoladores elétricos podem ser caracterizados em quatro níveis, segundo a norma IEC 60815:

Tabela 1 – Classes de contaminação e caracterização ambiental (Liebermann, 2002).

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 grande 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.

Os isoladores submetidos a tempestades fortes, por exemplo, em área com desenvolvimento industrial ou alta densidade demográfica são de classe III, sendo sugerido que os discos distem 25 mm/kV, para que seja evitado o flashover (Liebermann, 2002).

A contaminação pode ser produzida por várias causas, principalmente por sais e poluentes industriais. Os contaminantes possuem componentes condutores que influenciam a tensão de flashover do isolador fornecendo, em condições de umidade, uma cobertura condutiva na superfície do isolador. O componente inerte, por outro lado, é a porção do

material sólido que não se dissolve, porém forma uma matriz mecânica onde as partículas do componente condutivo são incluídas internamente. A condensação representa um processo lento de umidade durante o qual os contaminantes condutivos podem se dissolver completamente. Este processo freqüentemente se produz sob condições de névoa ou orvalho nas horas iniciais da manhã e também a chuva e a garoa podem causar efeito semelhante.

Quando a condutividade da camada superficial é estabelecida pela umidade na qual os contaminantes sólidos são dissolvidos, uma corrente superficial entre fase e terra pode então fluir resultando em aquecimento da camada por efeito Joule. A condutividade inicialmente aumenta enquanto a temperatura sobe, porém quando chega a certo valor, a evaporação da água torna-se significativa e a solução fica supersaturada de sal. A camada começa a secar nas zonas com maior dissipação de energia e a condutividade destas zonas baixa rapidamente até que chega a zero. A distribuição do fluxo de corrente é então modificada e quando uma banda seca completa é estabelecida, a maior parte da tensão aplicada no isolador é então imposta a ela devido a sua alta resistência. A corrente na linha é interrompida pela ruptura do ar, ocasionando uma fâsca, como ponte sobre esta banda seca e manterá a corrente. O arco leva a corrente em um canal altamente concentrado liberando o calor em uma forma também muito concentrada. O arco pode estender-se longitudinalmente e, se chega a cobrir uma parte crítica do caminho da fuga, o flashover definitivo será praticamente inevitável. Portanto, a intensidade dos pulsos de corrente de fuga é um bom indicador da condição do isolador e a intensidade de corrente é decisiva para a descarga de arco.

Estudos mostram que a energia da descarga elétrica necessária para causar a falha do isolador é diretamente proporcional ao grau de poluição em sua superfície, quando ocorre um arco voltaico. Portanto, quando se chega a um grau de poluição suficientemente intenso, tem-se a condição favorável para gerar um arco elétrico com energia suficiente para causar o flashover, resultando na falha do isolador e conseqüente parada de rede (Montoya, 2004).

2.1.3 Esmaltes Cerâmicos

Muitos produtos cerâmicos, como louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos, materiais de revestimento 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.

Matérias-Primas Utilizadas para Aplicação de Esmaltes

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) 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).

2.1.4 Superfícies Antipoluentes

Vários estudos têm sido realizados visando tornar os isoladores elétricos mais eficazes frente ao fenômeno de flashover, através de alterações na composição, no design, na geometria, dimensões e afastamento dos discos dos isoladores. Outros estudos sugerem a aplicação de revestimentos superficiais sobre os isoladores (Liebermann, 2002).

As superfícies antipoluentes aplicadas sobre isoladores elétricos podem levar a uma diminuição dos custos com manutenção, que poderia ser realizada através de lavagens em intervalos maiores de tempo. Através de recobrimentos adequados pode-se evitar ou diminuir a ocorrência do fenômeno de flashover. Essas superfícies podem prover um melhor desempenho desses componentes elétricos através de três processos: tornando-se hidrofílicas e facilitando a limpeza dos isoladores, retirando os sais e poluentes por ação da água da chuva; tornando-se hidrofóbicas e repelindo a água que poderia formar um caminho contínuo e levar ao fechamento de um arco ou, por último, promovendo um aquecimento superficial por efeito Joule e impedindo o depósito de partículas indesejadas ao evitar a condensação do vapor de água presente na atmosfera.

O processo de limpeza por hidrofiliabilidade faz com que a água que entre em contato com a superfície forme uma lâmina contínua, capaz de promover a retirada de todo material contaminante. Filmes finos de TiO_2 formam superfícies hidrofílicas quando expostos a radiação ultravioleta porque o dióxido de titânio na presença de luz ultravioleta torna-se catalisador de reações químicas. Este efeito é induzido pela absorção de fótons de radiação ultravioleta por cristais de TiO_2 contidos no filme (Kemmitt, 2004). Esta característica faz com que filmes de TiO_2 atuem diminuindo o acúmulo de moléculas orgânicas e poluição na superfície dos isoladores. O filme de dióxido de titânio também adquire a propriedade de fotocatalise, decompondo componentes orgânicos em água e CO_2 . Esses dois comportamentos promovem a ação autolimpante nas superfícies (Mills, 2003).

O processo de aquecimento superficial pode ser realizado através de finos filmes metálicos depositados por plasma ou pela utilização de esmaltes semicondutores que distribuem de maneira uniforme a tensão aplicada e também favorecem a secagem da água.

Os filmes finos metálicos são obtidos por diversos tipos de processos. Um desses processos, a deposição de camadas via DC magnetron sputtering vem sendo estudado na UFSC desde o início da década de 1990. Esta técnica de deposição é viável comercialmente para muitas aplicações, proporciona razoáveis taxas de deposição, forma filme de boa qualidade, com alta densidade e boa aderência com um baixo custo de manutenção (Fontana, 1997).

Esmaltes semicondutores contendo SnO_2 dopado com Sb_2O_3 , na proporção de 95% em peso de SnO_2 com 5% em peso de Sb_2O_3 foram aplicados sobre substratos cerâmicos apresentando resistividade adequada para promover o efeito de aquecimento (Aguiar, 2004).

Os esmaltes utilizados nas indústrias cerâmicas são isolantes e uma maneira de torná-los semicondutores é adicionando óxidos condutores. Misturando-se em proporções variadas óxido de zinco dopado com óxido de antimônio, pode-se obter resistividade elétrica da ordem de $10^4 \Omega.m$. A melhora da condutividade é atribuída a concentração de portadores de carga e com a introdução de Sb_2O_3 , a condutividade pode ser aumentada em até cinco ordens de grandeza. Pesquisas mostram que a quantidade ideal de pigmento na fratura do vidro é de aproximadamente 25% para se obter tal resistividade (Aguilar, 2004).

O uso de camadas de materiais orgânicos para dar propriedades hidrofóbicas à superfície dos isoladores torna possível melhorar o desempenho elétrico dos isoladores e impedir correntes de fuga sob condições industriais e abre maneiras para o projeto de isoladores seguros para enfrentar o flashover e serem resistentes ao envelhecimento (Liebermann, 2002).

Baseado em exigências constantes em mudança por parte dos usuários, vários projetos novos têm que ser produzidos pelos fabricantes de isoladores a cada ano. Por isso uma investigação foi conduzida visando soluções que utilizam um revestimento superficial hidrofóbico com o objetivo de permitir projetos mais simples e processos de produção mais fáceis de isoladores de porcelana a serem utilizados para o serviço, mesmo nas áreas com poluição mais elevada. Esse método evitaria a necessidade de perfis particulares e complicados, freqüentemente com grandes saliências e com problemas de produção especial devido a fatores como necessidade de materiais especiais, incidência elevada de rejeições durante a produção e o uso ineficaz da capacidade crítica do forno (Liebermann, 2002).

Os isoladores com revestimento de silicone exibem um comportamento mais favorável frente às correntes de fuga. Descargas superficiais praticamente nunca ocorrem, mesmo em níveis elevados de contaminação. O flashover, um arco repentino através do ar, 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. 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, mesmo com perfis adequados, a menos que sua superfície seja convertida de hidrofílica em hidrofóbica (Liebermann, 2002).

2.2 Hidrofobicidade e Materiais Hidrofóbicos

2.2.1 Hidrofobicidade

Nos sólidos e líquidos, as partículas que se encontram na superfície encontram-se numa situação diferente das partículas que estão no interior do sistema. As partículas do interior estão sujeitas a forças em todas as direções, resultando em força nula, enquanto que sobre as partículas da superfície somente atuam forças exercidas pelas partículas do interior. A força resultante do interior do sistema atua como se estivesse puxando para o interior as partículas que constituem a superfície. Desta forma, as partículas na superfície possuem um excesso de energia denominada de energia superficial, responsável pela tensão superficial dos líquidos e pela adsorção de um fluido sobre um sólido. Uma superfície sólida é definida como o local de contato com o meio circundante, representando uma descontinuidade na estrutura do sólido, pois os átomos na superfície têm uma força molecular residual que não é satisfeita pelos átomos vizinhos.

A tensão superficial de um líquido é causada pela força de atração entre as moléculas que o compõe. Na ausência de outras forças, essa força atrativa entre as moléculas faz com que o líquido coalesça em forma de uma gota esférica (Vieira, 2002).

Como regra geral, quanto maior a proporção de grupos polares na molécula maior a atração entre elas. Grandes forças atrativas dão origem a grandes tensões superficiais e quando isso acontece o líquido tende a formar pequenas gotas sobre a superfície ao invés de molhá-la uniformemente. Conseqüentemente, líquidos com pequenas tensões superficiais formam um filme sobre a superfície que a cobre por inteiro. A energia é definida como a capacidade de realizar trabalho e a maneira como uma superfície possui energia pode ser considerada a partir de sua composição. Uma superfície rica em ligações polares tem energia superficial maior que uma superfície com poucas dessas ligações.

Um líquido como água, que é polar, tende a se espalhar sobre uma superfície com alta energia superficial, e a formar pequenas gotas sobre uma superfície de baixa energia superficial. Portanto, é necessária energia para superar a tensão superficial do líquido e essa energia vem da superfície na qual o repousa o líquido, a chamada energia superficial. A tensão e a energia superficiais levam em consideração o comportamento de líquidos em contato com a superfície de materiais e uma maneira de quantificar esse comportamento é

através da medida do ângulo de contato. Quando o líquido utilizado é a água, a medida do ângulo de contato é uma medida da hidrofobicidade do material.

A hidrofobicidade, portanto, é uma propriedade que pode ser quantificada. Os valores dessa grandeza são dados em unidades de energia livre de Gibbs, ou seja, em kcal/mol e têm o seguinte significado: quanto mais positivo o valor da hidrofobicidade, mais hidrofóbica é a superfície e quanto mais negativo mais hidrofílico, isto é, a superfície tem maior preferência pela água.

Muitas teorias sobre ângulo de contato e fenômenos de superfície têm sido publicadas desde os estudos de Thomas Young (1805) e J. Willard Gibbs (1906). O primeiro afirmou que o equilíbrio entre as forças atrativas entre as partículas de fluido e as partículas do sólido faria com que o fluido formasse um determinado ângulo com o sólido. Gibbs, no entanto, relacionou o ângulo de contato não a um balanço de forças, mas ao conceito de energia de superfície. Ele propôs que a linha trifásica entre um sólido insolúvel e dois fluidos se deslocaria sobre a superfície sólida até que atingisse um ponto em que qualquer deslocamento na linha criaria um acréscimo na energia livre, associada à linha trifásica. Essa condição de equilíbrio (energia livre mínima) se reduz à equação de Young. A gota de líquido está sujeita a um equilíbrio termodinâmico envolvendo as três fases (vapor-sólido-líquido) e sua forma depende, então, das energias envolvidas no sistema, como representa a equação 1:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$

onde:

γ_{SV} . tensão superficial sólido/vapor

γ_{LV} . tensão superficial líquido/vapor

γ_{SL} . tensão superficial sólido/líquido

O ângulo de contato (θ) é o ângulo que a interface líquido/vapor faz com a superfície do sólido no qual a gota repousa. Ele é específico para cada sistema e depende das interações entre as três interfaces (vapor/líquido - vapor/sólido - sólido/líquido) (Castellan, 1986).

O conceito de ângulo de contato é ilustrado por uma pequena gota de líquido repousando sobre uma superfície plana na figura 7.

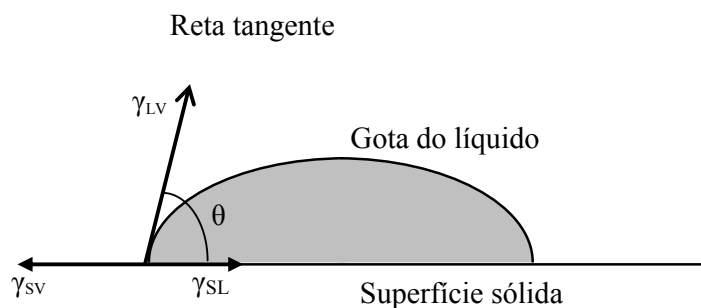


Figura 7 – Tensões superficiais e ângulo de contato entre uma gota e uma superfície sólida.

O membro da esquerda da equação de Young é um parâmetro de adesão, que descreve a tendência de um líquido em se espalhar sobre a superfície do sólido, isto é, a molhabilidade. Assim, diz-se que um líquido molha completamente o sólido se $\theta=0^{\circ}$, ou parcialmente se o valor de θ estiver compreendido entre zero e um determinado valor que varia conforme a literatura.

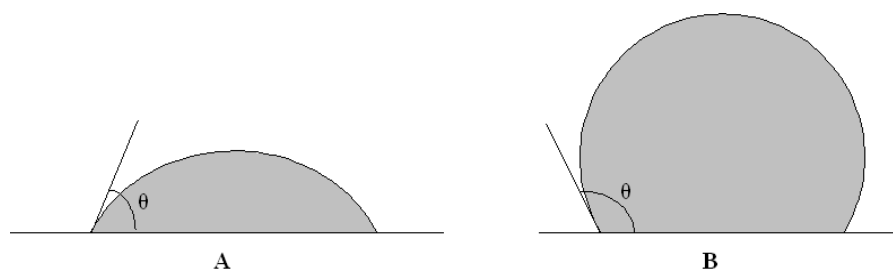


Figura 8 – Líquidos de diferentes molhabilidades: (A) molha o sólido e (B) não molha o sólido.

O patamar a partir do qual uma superfície apresenta-se hidrofóbica varia conforme a literatura, não havendo um consenso. Valcarce et al. (2002), consideram hidrofóbicas as superfícies onde o ângulo de contato com uma gota de água são superiores a 65° e hidrofílicas para ângulos menores que este valor, enquanto que van Oss e Giese (1995) já as consideram para ângulos superiores a 50° . Santos (2005) considera que as superfícies com ângulos de contato maiores que 60° são caracterizadas como hidrofóbicas.

Ângulos de contato de líquidos em superfícies poliméricas são utilizados para determinar a molhabilidade desses sólidos a partir do cálculo de suas tensões superficiais sólido-vapor. Apesar de a teoria ser baseada no equilíbrio de uma gota simétrica depositada

em uma superfície sólida plana, horizontal e homogênea, na prática encontra-se uma faixa de ângulos de contato, determinada experimentalmente, que causa molhamento de uma superfície. Isso acontece porque os ângulos de contato de superfícies poliméricas não são influenciados apenas pelas tensões superficiais de acordo com a equação de Young, mas também por outros fenômenos como rugosidade, heterogeneidade química, orientação molecular e solubilidade parcial do polímero, no caso de misturas poliméricas. Todos esses efeitos devem ser levados em consideração quando a medida de ângulo de contato for realizada (Santos, 2005).

A superfície de um material pode apresentar características hidrofílicas ou hidrofóbicas de acordo com a sua afinidade com a água. Os materiais hidrofílicos têm alta afinidade pela água devido à existência de grupos polares em sua superfície. Os principais grupos funcionais que conferem esta propriedade aos materiais são as aminas (-NH₂); os carboxílicos (-COOH), os sulfonatos (-SO₃) e hidroxila (-OH), sendo estes que conferem a formação de uma camada ou filme de água. Já os materiais hidrofóbicos são definidos como aqueles que apresentam pouca ou nenhuma tendência em adsorver moléculas de água. Nestes, as ligações de hidrogênio não são favorecidas e possuem uma energia superficial baixa (Vieira, 2002).

A informação sobre a molhabilidade de um sólido, isto é, sobre o caráter hidrofóbico ou hidrofílico de uma superfície é obtida através da medida do ângulo de contato em interfaces sólido-líquido. A medida é realizada considerando-se o ângulo de contato entre uma gota de água sobre a superfície. Quanto menor o ângulo de contato entre uma gota de água e a superfície, maior a molhabilidade e o filme apresenta-se hidrofílico. Para ângulos elevados, o filme apresenta caráter hidrofóbico, repelindo as gotículas de água, evitando a formação de uma película contínua de água.

O ângulo de contato é a manifestação da energia superficial livre de uma determinada superfície em contato com um líquido e, portanto, um mesmo líquido pode ter comportamento distinto quando em contato com diferentes superfícies. Sendo um fenômeno de superfície é influenciado pela condição da superfície e a consequência disto é que um material pode se comportar de maneira oposta, em relação à tensão interfacial, dependendo somente da condição de sua superfície. Por exemplo, uma superfície porosa pode tornar-se hidrofóbica aplicando-se uma fina camada de silicone ou algum outro polímero.

A rugosidade é um parâmetro importante para o grau de hidrofobicidade bem como para a propriedade de transferência de hidrofobicidade para materiais isolantes. Conseqüentemente, a rugosidade tem que verificada quando materiais hidrofóbicos são comparados.

Exl e Kindersberger (2005) mostram que, para superfícies com baixa rugosidade (R_z até aproximadamente $15 \mu\text{m}$ a $20 \mu\text{m}$), os ângulos de contato se comportam de acordo com a teoria, isto é, que ângulos de contato menores do que 90° diminuem com o aumento da rugosidade e ângulos maiores do que 90° têm um comportamento inverso.

Se a rugosidade torna-se maior do que aproximadamente $R_z = 20\mu\text{m}$, o ângulo de contato tem comportamento diferente. Agora, ângulos de contato maiores do que 90° diminuem com o acréscimo da rugosidade e ângulos menores que 90° aumentam. A razão desse comportamento pode ser que, para alta rugosidade, bolhas de gás são incrustadas entre a gota de água e a superfície do isolador (Exl e Kindersberger, 2005).

2.2.2 Materiais Hidrofóbicos

O revestimento proposto para isoladores deve ser de material polimérico de baixa energia superficial e que seja resistente ao trilhamento elétrico, às intempéries e a radiação ultravioleta. Neste capítulo, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre polímeros dando especial ênfase em materiais poliméricos hidrofóbicos utilizados neste trabalho de pesquisa.

O polímero é uma grande molécula formada pela repetição de pequenas unidades químicas simples denominadas monômeros. Em alguns casos a repetição é linear, em outros casos 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).

Quanto à sua natureza, os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Os polímeros naturais são elementos ligantes utilizados na composição das tintas ou esmaltes para

recobrimentos, que juntos com os demais constituintes sólidos como pigmentos, aditivos e corantes, são responsáveis pela formação da película protetora do suporte.

Os polímeros sintéticos são macromoléculas obtidas através de reações químicas entre alguns tipos de substâncias, que normalmente durante o processamento industrial utilizam calor e catalisadores.

As indústrias utilizam as resinas sintéticas, as quais se dividem em termoplásticas e termorrígidas. As resinas termoplásticas podem ser moldadas ao serem aquecidas enquanto que as termorrígidas exibem um comportamento oposto, atingindo um estado de rigidez irreversível após o tratamento térmico. As resinas artificiais são empregadas principalmente na indústria de polímeros, vernizes, tintas e similares e fibras sintéticas. Das resinas termoplásticas são originados os acrílicos, os silicones e outros produtos e as termofixas dão origem aos poliésteres e outros produtos.

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, 1994).

As macromoléculas de estrutura insaturada apresentam baixa resistência às radiações ultravioleta, que são absorvidas, gerando facilmente radicais livres na molécula, freqüentemente com a intervenção do oxigênio, causando ruptura de ligações da cadeia molecular com a separação de segmentos da cadeia e uma redução no peso molecular. Isto pode levar a um comprometimento de algumas propriedades físicas e químicas e também mudança de coloração da peça, por oxidação (Mano, 1991).

2.2.2.1 Silicone

As resinas de silicone são produtos encontrados na forma líquida e quando adicionados a outra substância, geralmente um catalisador, transformam-se em sólidos. As resinas de silicone podem ser consideradas como derivadas da sílica, onde grupos orgânicos substituem alguns átomos de oxigênio na sua estrutura química formando, portanto,

compostos denominados de organossiloxanos, que são polímeros derivados do monômero $\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{-O}$.

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 -Si-O- formando a cadeia principal, sendo que as duas outras ligações do átomo de silício são com radicais metis -CH_3 (Canevarolo Jr., 2002).

Devido a sua estrutura química ser formada por cadeias alternadas de átomo 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 sem perder 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). Além de serem resistentes à decomposição pelo calor, também são resistentes à água e aos agentes oxidantes.

O tipo principal constitui-se de cadeias lineares de átomos de silício e oxigênio alternados (siloxanas) com radicais metila ligados aos átomos de silício, conforme a estrutura química representada na Figura 9.

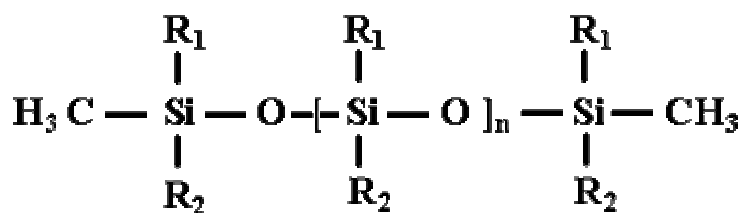


Figura 9 – Estrutura química do silicone (Canevarolo Jr., 2002).

R1 e R2 são usualmente os radicais orgânicos: metil, fenil, vinil, fluoropropil, hidroxila, halogênio. Os nomes das ligações do silício podem ser, por exemplo, Si - H: silanas e Si - O: siloxanas

Os silicones possuem ligações Si-C e os radicais orgânicos ligados ao átomo de silício, conferem, além da facilidade de processamento, excepcionais propriedades hidrofugantes. O tipo de silicone utilizado como hidrofugante, o silano-siloxano, possui alto poder de

penetração em diversos substratos, possibilitando assim a proteção em uma camada mais profunda e conseqüentemente maior durabilidade.

Atualmente, as resinas de silicone são utilizadas em mais de 5000 produtos. As resinas de silicone são muito usadas como tintas devido a elevada resistência ao desgaste sob ação da intempérie. No segmento da construção civil, o silicone pode ser aplicado em três linhas: selantes, hidrofugantes e aditivos. Quanto à função hidrofugante, é utilizado em vedações de tijolos, concreto, telhas, rejuntas e pedras naturais, impedindo a absorção de água e permitindo a saída de vapores. Como aditivo de tintas, o silicone funciona como ligante, reforçando a estrutura molecular, aumentando a aderência da tinta e agindo como antiespumante, evitando a formação de bolhas durante a aplicação (Wiebeck e Harada, 2005).

2.2.2.2 Acrílico

Esses polímeros de cadeia carbônica, também chamadas de acrilatos, são obtidos pela esterificação (processo envolvendo a interação de um composto possuindo grupo hidroxila com um ácido, com eliminação de água) dos ácidos acrílico $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}-\text{OH}$ e metacrílico $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CO}-\text{OH}$ com vários álcoois. A esterificação é o processo que envolve a interação de um composto possuindo grupo hidroxila com um ácido com eliminação de água. As resinas acrílicas termoplásticas ou poliacrilatos são macromoléculas de ésteres acrílicos que, dependendo da sua estrutura química, resultam em substâncias mais resistentes com características próprias de dureza, flexibilidade e resistência à ação de agentes químicos e degradantes. Estas resinas apresentam dureza elevada, em se tratando de polímeros, boa transparência ótica e baixa absorção de água e também não perdem a cor após a fabricação (Harper, 2001).

As resinas acrílicas são obtidas através da produção de polímeros por adição de monômeros insaturados. As resinas acrílicas mais importantes são os ácidos acrílicos e metacrílicos e seus éteres. Um copolímero é composto por dois ou mais tipos de meros e, dependendo do processo de copolimerização relativa desses tipos de mero envolvidos, são possíveis diferentes arranjos de formação seqüenciais ao longo das cadeias de polímeros. Se as unidades mero diferentes estão dispersas aleatoriamente ao longo da cadeia, o copolímero é conhecido como aleatório, mas, se as duas unidades mero alternam as suas posições na cadeia o copolímero será designado como alternado. Um copolímero em bloco é composto por meros

idênticos que ficam aglomerados em blocos ao longo da cadeia e, finalmente, o copolímero caracterizado por enxerto é quando a cadeia principal do copolímero será formada por um tipo de unidade repetida, enquanto a outra unidade mero forma a cadeia lateral enxertada (Callister, 1994). Portanto, a reação de formação de um copolímero é conhecida como copolimerização e os monômeros envolvidos nesta reação são chamados de comonômeros (Canevarolo Jr, 2002).

É comum na copolimerização participarem outros monômeros, tal como ocorre com o estireno, que é encontrado freqüentemente na composição de resinas acrílicas. As tintas que têm em sua composição radicais de estireno e de vinila costumam perder suas características com a ação da luz solar e de intempéries. As tintas acrílicas puras são obtidas unicamente da polimerização de radicais acrilatos e possuem grande resistência às intempéries e à luz solar.

2.2.2.3 Poliéster

Os poliésteres são grupos de polímeros obtidos por reação de policondensação entre ácidos dicarboxílicos e poliálcoois. Neste tipo de polímero de cadeia carbônica, a característica principal é a ligação do éster $-CO-O-$. Apresentam boa resistência à corrosão e a ação de agentes químicos, sendo empregados como produtos para recobrimentos de telhas cerâmicas e outras aplicações.

As resinas poliésteres podem ser saturadas ou insaturadas. O poliéster saturado é obtido pela reação entre um biálcool e um biácido saturado, resultando num produto termoplástico, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples entre os átomos de carbono, o que caracteriza a flexibilidade dos produtos obtidos com este tipo de resina.

O poliéster insaturado consiste basicamente de um polímero alquídic, contendo insaturações dissolvidas em um monômero reativo, normalmente de estireno. É obtido pela reação entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um biálcool, resultando num produto termofixo, cuja cadeia molecular é composta por simples e duplas ligações entre os átomos de carbono.

As resinas de poliéster podem ser formuladas para ter uma faixa de propriedades que variam desde frágil e duro até macio e flexível. A viscosidade na temperatura ambiente pode variar desde 50 cP até valores superiores a 25.000 cP. Desta forma, estas resinas podem ser utilizadas para a fabricação de milhares de produtos através de diversas técnicas fabris como

moldagem em molde aberto, laminação manual, pulverização, moldagem a vácuo e moldagem por injeção (Harper, 2001).

Através da escolha apropriada de aditivos, resinas de poliéster com propriedades especiais podem ser obtidas. Por exemplo: resistência a ação atmosférica pode ser obtida com o uso de metacrilato de metila (Harper, 2001).

Conforme as suas características, as resinas poliésteres insaturadas podem ser utilizadas em ambientes externos ou internos, em pó ou suspensão, e utilizadas como recobrimento de superfícies com funções de isolamento, estéticas, e proporcionar proteção frente ao intemperismo.

Quanto as tintas poliésteres em pó, são resinas básicas de poliésteres saturados obtidos por meio da poliesterificação de poliácidos ou seus anidridos com poliálcoois, onde os diácidos e os glicóis são os mais comuns (Fazenda, 1993).

Existe uma grande variedade de poliácidos e poliálcoois disponíveis para a formulação de poliésteres adequados para tinta em pó. Na sua maioria, são as mesmas matérias-primas usadas em poliésteres saturados e insaturados convencionais e para resinas alquídicas. Esta enorme variedade permite a formulação de poliésteres adequados para que se obtenha tintas em pó com propriedades características requeridas.

Quanto a cura, as tintas em pó a base de poliéster podem ser classificadas em diferentes tipos:

- Tintas em pó do tipo híbrido: a cura é obtida através de reação da resina poliéster com resina epóxi, na temperatura de 180° C a 200° C.
- Tintas em pó tipo poliéster puro: a cura é feita com triglicidil-isocianurato, que é um composto químico dotado com três grupos glicídila por molécula. As propriedades mais importantes deste tipo de tinta são: excelente estabilidade ao calor e a luz, excelente resistência ao intemperismo, excelente aspecto do acabamento (brilho e recobrimento) e excelente adesão e flexibilidade. Porém, a resistência química é inferior à dos tipos epóxicas, com temperatura de cura de 180° a 200° C.
- Tintas em pó poliuretânicas: neste caso, a reticulação é conseguida através da reação do poliéster com um poliisocianato bloqueado. As tintas em pó poliuretânicas também podem ser constituídas por uma resina acrílica e um endurecedor poliisocianato bloqueado, não sendo tão comuns quanto as baseadas em poliéster. A temperatura de cura é de 190° C – 15 minutos, 200° C – 10 minutos e 210° C – 8 minutos.

As principais matérias-primas empregadas na fabricação dos poliuretanos são os di ou poliisocianatos e os polímeros hidroxilados de baixo peso molecular (polióis). Além dessas matérias-primas são comumente usados os agentes de cura, agentes de expansão, catalizadores, aditivos, etc.

As tintas de poliuretano normalmente são utilizadas em aplicações onde existe a necessidade de bom acabamento, excelente brilho, resistência química, boa aderência, e resistência a UV. Podem ser bicomponentes ou monocomponentes, normalmente os bicomponentes são os de melhor resistência as intempéries.

As tintas de poliuretano apresentam características químicas que as tornam mais resistentes ao intemperismo, principalmente as formuladas com resinas de poliésteres ou acrílicas "catalisadas" com agentes de cura a base de isocianatos alifáticos.

Os poliuretanos alifáticos apresentam grande aderência ao concreto e ao aço carbono, e além de boa resistência química, têm resistência aos raios ultravioleta muito superior à das tintas epóxi e se caracterizam pela boa retenção de cor.

Os poliuretanos acrílicos alifáticos são tintas de acabamento cujo componente A é acrílico polihidroxilado e o componente B o isocianato alifático. São também utilizadas em conjunto com primers epóxi e têm resistência aos raios ultravioleta, ainda superior à dos poliuretanos alifáticos a base de poliéster.

Os poliuretanos aromáticos constituem-se em tinta curada com isocianato aromático. Proporcionam secagem rápida e fácil lixamento tendo alto teor de sólidos e excelente propriedade niveladora. É usada principalmente em superfície de poliéster reforçado com fibra de vidro ou sobre aço carbono. É indicado como acabamento para superfícies que não ficam expostas ao intemperismo.

A maioria dos poliuretanos tende a amarelar quando exposto à luz. A causa desse amarelecimento é a degradação fotooxidativa (luz + oxigênio) que pode até atingir suas propriedades físicas e mecânicas. Este fenômeno pode ser evitado pela utilização de agentes antienvhecimento, que podem ser do tipo benzofenona e benzotriazol (Wiebeck e Harada, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo são descritos os métodos analíticos e instrumentais utilizados na execução do trabalho experimental. São também referidas as metodologias e equipamentos utilizados na preparação dos corpos de prova tanto do substrato como dos recobrimentos. Apresenta-se, ainda, uma breve caracterização de cada recobrimento testado.

3.1 Materiais

3.1.1 Substrato

Os substratos cerâmicos foram feitos na empresa Porcelana Industrial GERMER, em Timbó - SC. Foram preparados corpos de prova em forma de disco de 100 mm de diâmetro e espessura de 8 mm para todos os ensaios, a partir de tarugos obtidos da extrusora da linha de produção e portanto, confeccionadas com a mesma composição da porcelana dos isoladores elétricos de alta tensão da referida empresa. As porcelanas utilizadas como isoladores elétricos de alta tensão são as porcelanas triaxiais, compostas por quartzo, feldspato e argila. Durante a fabricação a argila caulínica confere plasticidade à massa, o feldspato atua como fundente e o quartzo atua na formação do esqueleto da peça cerâmica, diminuindo a retração durante a secagem e evitando a deformação da peça. Este tipo de porcelana apresenta as propriedades mecânicas e dielétricas adequadas sendo não poroso, de tal maneira que não necessite de recobrimentos para obter sua impermeabilidade. Os discos foram inicialmente secados ao ar durante 24 horas e depois secados por 6 horas em estufa. O tratamento térmico foi feito em forno câmara, também no laboratório da empresa GERMER a 1260°C por 36 horas. Antes de serem aplicados os recobrimentos, os discos foram cortados ao meio no sentido radial, exceto aqueles que foram usados nos ensaios de erosão, que foram mantidos inteiros. As superfícies das peças 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.

3.1.2 Recobrimentos

Os recobrimentos foram aplicados sobre as placas já queimadas, exceto o esmalte que foi aplicado sobre placas a verde em tratamento térmico de monoqueima em forno câmara a 1260°C por 36 horas.

Sobre os substratos foram aplicados cinco tipos de recobrimentos diferentes:

- Esmalte de uso comum na empresa GERMER, constituído de quartzo, caulim, feldspato, aditivo fundente (dolomita ou calcita), pigmento e agente suspensor. Este recobrimento serviu de padrão para comparação com os resultados apresentados pelos outros recobrimentos.
- Poliéster.

Foi aplicada tinta poliéster em pó Politherm 464A-7602 46WF da empresa WEG QUÍMICA. A aplicação foi realizada por deposição, onde a tinta foi pulverizada através de uma peneira de malha 53 µm sobre o substrato na posição horizontal e a cura foi feita a 218°C durante 17 minutos. Para o tratamento térmico utilizou-se uma estufa de secagem e esterilização, modelo 320-SE da FANEM, com circulação mecânica e a temperatura foi monitorada com um termopar MINIPA modelo MA-128 no Laboratório de Mecânica do CEFET/SC em Florianópolis – SC.

- Acrílico.

Foi aplicada a resina acrílica de copolímeros concentrada Hidronorth, cuja composição é uma resina acrílica estirenada, solventes aromáticos e aditivo polivinílico. A mesma foi diluída em solvente Solvcryll, um solvente acrílico concentrado da Hidronorth, na proporção de 10%, e aplicada por meio de uma pistola no Laboratório de Mecânica do CEFET/SC em Florianópolis – SC. A cura ocorreu à temperatura ambiente.

- Silicone.

Foi aplicado o produto Bota[®]Top SS, um hidrofugante à base de silano/siloxano da BOTAMENT[®] Sistemas para Construção. O produto foi escolhido entre outros silicones no mercado em virtude de não necessitar a adição de solventes químicos, sendo solúvel em água e, segundo o fabricante, apresentar excelentes propriedades de repelência à água e a formação de películas não visíveis a olho nu. A aplicação foi realizada por imersão seguida da imediata emersão das peças, em duas demãos com intervalo máximo de uma hora, como recomenda o fabricante, no Laboratório de Mecânica do CEFET/SC em Florianópolis – SC. A cura ocorreu à temperatura ambiente.

- Poliuretano.

Foi aplicada em apenas uma demão, na forma de tinta marítima de poliuretano bicomponente em sistema aromático e alifático, destinado principalmente para aplicações em embarcações, fornecido pela empresa Plastimper Indústria e Comércio de Tintas Ltda. A tinta foi misturada com o secante na proporção de três por um e após a diluição com um solvente a base de acetato. A aplicação foi realizada por meio de uma pistola no Laboratório de Mecânica do CEFET/SC em Florianópolis – SC e a cura ocorreu à temperatura ambiente.

3.2 Ensaaios

D'AJUZ et al. (1987) estudaram como o estado da superfície, a quantidade de poluição e o grau de umidificação da camada superficial afetam o desempenho de isoladores elétricos. Através de medidas de condutância superficial, que é a relação entre a corrente através do isolador e a tensão à frequência industrial aplicada, estabeleceram que este método é adequado para se avaliar a poluição de um determinado lugar. Usando um método artificial para teste de poluição, obtiveram medidas semelhantes ao isolador submetido às condições ambientais, o que permite expressar o grau de severidade de poluição existente no campo em

termos de um grau de severidade equivalente obtido no laboratório. Usando o método da névoa salina, por exemplo, a severidade equivalente obtida em laboratório é a salinidade da névoa artificial que produz na superfície do isolador a mesma condutância superficial que no campo.

O ensaio em névoa salina tem sido utilizado para se testar o desempenho de isoladores, bem como o desempenho de materiais utilizados na confecção de isoladores elétricos. A influência do envelhecimento sobre a hidrofobicidade do material tem sido bem documentada na literatura. Medidas de correntes de fuga em isoladores sob névoa salina também têm sido publicadas (Inone et al., 2003).

O grau de hidrofobicidade de materiais isolantes também é dependente da rugosidade superficial e somente amostras com igual rugosidade superficial podem ser razoavelmente comparadas umas com as outras (Exl e Kindersberger, 2005).

É também conhecido o fato de que a radiação UV e descargas corona levam à perda da hidrofobicidade na superfície de isoladores poliméricos. Para alguns isoladores, esta perda é temporária, pois o material tem a capacidade de recuperar total ou parcialmente sua hidrofobicidade. Esta propriedade, de recuperar a hidrofobicidade, é de grande importância para o desempenho do isolador em regiões de alta agressividade ambiental (Inone, et al., 2003).

Considerando o exposto acima, e conhecendo-se os parâmetros que afetam o desempenho dos isoladores elétricos frente ao fenômeno de flashover, foi possível selecionar alguns recobrimentos poliméricos e elencar os ensaios indispensáveis para se verificar como estas características superficiais são afetadas pela intempérie, realizando-se ensaios que simulam situações ambientais.

Considerando que as propriedades superficiais importantes para se evitar a umidade e o depósito de sais e poluentes são determinadas pela rugosidade e pelo molhamento da superfície, conclui-se pela necessidade de determinar os graus de rugosidade e de hidrofobicidade dos recobrimentos e os parâmetros que afetam esta última propriedade. Para atingir esses objetivos selecionou-se os seguintes ensaios:

3.2.1 Ângulo de Contato

O método universalmente 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.

A medida do ângulo de contato é um dos métodos convencionais mais rápidos para a caracterização de superfícies, sendo muito utilizada em laboratórios de pesquisa e industriais. Com este parâmetro macroscópico é possível quantificar a molhabilidade de uma superfície, identificando portanto o caráter hidrofóbico ou hidrofílico quando o líquido em questão é a água, revelando características em nível microscópico da superfície em estudo, como a energia de superfície. O conhecimento desta propriedade tem grande relevância quando se trabalha com processos de recobrimento de materiais.

Para a medida do ângulo de contato 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. Este sistema, ilustrado na Figura 10, é constituído por uma câmera de vídeo que registra uma imagem da gota e um computador conectado à câmera calcula os ângulos de contato usando o software de medida Image Tool.

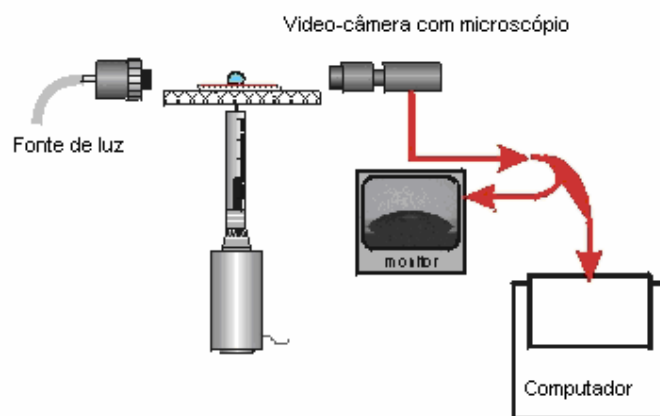


Figura 10 – Diagrama esquemático de um medidor de ângulo de contato

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

As medidas de ângulo de contato foram efetuadas no Laboratório de Materiais Porosos e Propriedades Termodinâmicas (LMPT-EMC) da UFSC, em Florianópolis-SC através de um goniômetro DATA PHYSICS equipado com uma micro-seringa capaz de produzir gotas de diferentes volumes. Para as medidas de ângulo de contato foram utilizadas três amostras de cada recobrimento que foram cuidadosamente limpas com etanol. Foram feitas dez medidas para cada tipo de revestimento, considerando um volume de gota de água depositada sobre a superfície de 5,0 μL . As medidas foram efetuadas em pontos distintos das amostras e foram realizadas com água deionizada. A taxa de deposição da água sobre a superfície foi de 0,50 $\mu\text{L/s}$. O resultado das medidas do ângulo formado entre uma gota de água e a superfície do revestimento foi obtido utilizando o Software Image Tool, instalado em um computador acoplado ao equipamento e que calculou automaticamente os ângulos de contato dos lados direito e esquerdo da gota. Em seguida determinou-se a média desses ângulos para a caracterização do comportamento hidrofóbico/hidrofílico das superfícies.

A Figura 11 apresenta o goniômetro utilizado nas medidas do ângulo de contato.



Figura 11 – Goniômetro DATA PHYSICS do Laboratório LMPT (EMC) – UFSC

3.2.2 Envelhecimento Acelerado por Radiação Ultravioleta.

O ensaio foi realizado em câmara de envelhecimento acelerado no Laboratório de Controle de Processos - LCP do Departamento de Engenharia Química da UFSC, em Florianópolis .

Neste ensaio os corpos de prova são expostos a altos níveis de radiação ultravioleta, simulando a incidência de luz solar. Apesar de o Sol emitir radiação em uma ampla faixa de comprimentos de onda, as responsáveis pelos principais processos degradativos são as compreendidas na faixa de 280 nm 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 nm a 400 nm) e UVB (280 nm a 315 nm) (Saron, Felisberti e Sanchez, 2006).

O ensaio de envelhecimento acelerado de polímeros através de radiações UV foi realizado em um equipamento construído no próprio LCP a partir de orientações da literatura (Saron, 2006) seguindo recomendações da norma ASTM G53 para lâmpadas UVA.

A Figura 12 mostra a câmara de envelhecimento acelerado usada para esse ensaio.

A partir da emissão média de radiação UVA no interior da câmara foi feita uma estimativa teórica do fator de aceleração de envelhecimento que o equipamento proporciona em relação ao envelhecimento natural. Este cálculo levou em consideração a intensidade média de radiação UVA que incide sobre a região de Campinas - SP. Os dados de radiação UVA foram obtidos a partir de dados de irradiância total fornecidos pelo CEPAGRI-UNICAMP, considerando que a radiação UVA corresponde a 6% da irradiância total. Com base nestas considerações, Saron, Felisberti e Sanchez (2006) obtiveram-se uma estimativa de que o equipamento possui um fator de aceleração do envelhecimento em torno de 14 vezes em relação ao envelhecimento natural. É importante lembrar que estes cálculos fornecem apenas uma estimativa do fator de aceleração, calculado apenas com base na radiação UVA que incide sobre as amostras e o envelhecimento natural representa um conjunto complexo de condições.

Essas condições foram escolhidas na tentativa de simular as condições a que esses polímeros seriam submetidos durante seus ciclos de vida, como componente de isoladores elétricos por exemplo.

A radiação ultravioleta é um dos fatores mais efetivos para a degradação de materiais orgânicos através de fotooxidação. Esse é um fator importante com relação ao tempo de vida de polímeros que são expostos ao tempo. 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 (Sanchez, Ferreira e Felisberti, 1999).



Figura 12 – Câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.

Este ensaio tem como objetivo avaliar alterações no comportamento hidrofílico/hidrofóbico a partir da degradação térmica e fotooxidativa das finas camadas dos revestimentos poliméricos de poliéster, acrílico, silicone e poliuretano. Corpos de prova cerâmicos recobertos com esses polímeros e, para efeito comparativo, também com esmalte cerâmico foram submetidos ao envelhecimento acelerado segundo as normas ASTM G26 e G53 .

Foram utilizados 3 corpos de prova de cada tipo de revestimento, que foram limpos de maneira adequada antes de serem introduzidos na câmara. A temperatura na câmara de envelhecimento foi mantida em $63^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. A duração do ensaio foi de 30 dias (720 horas) sendo que na metade do período do ensaio (15 dias) as amostras foram retiradas para a realização da caracterização mecânica. As amostras então foram analisadas quanto à alteração de cor e foram medidos novamente os ângulos de contato. O procedimento foi repetido ao final do período do ensaio. O ensaio de envelhecimento acelerado foi realizado segundo a norma ASTM G53 (ASTM, 1991).

3.2.3 Névoa Salina.

O teste realizado para a avaliação da resistência a intempéries consistiu-se no ensaio de exposição à câmara de névoa salina. Este ensaio é importante porque evidencia o processo de degradação em curto espaço de tempo, através da exposição do material a uma atmosfera bastante agressiva de cloreto de sódio, simulando a exposição desses materiais à atmosfera marítima, o que poderia afetar o comportamento hidrofóbico dos recobrimentos.

Neste ensaio foram investigados os efeitos do envelhecimento em névoa salina, sobre a propriedade superficial de repelência a água, em diferentes materiais poliméricos que poderiam ser aplicados sobre isoladores elétricos.

O objetivo desse ensaio é, portanto, avaliar a resistência desses materiais quanto ao comportamento hidrofóbico, utilizando um método eficiente e rápido, através da exposição à câmara de névoa salina. Tal método é capaz de proporcionar uma resposta rápida ao lento processo corrosivo que, geralmente ocorre nos isoladores elétricos quando submetidos à atmosfera marítima.

O ensaio foi realizado em uma câmara para ensaio de exposição à névoa salina, marca Equiplastia - Equipamentos para Galvanoplastia Ltda., modelo EQ-40-SS-Super e foi executado segundo a norma ABNT NBR 8094 no Laboratório de Automobilística do CEFETSC em Florianópolis – SC. A aparelhagem, mostrada na Figura 13, é constituída por uma câmara de ensaio com volume interno de 400 litros e a névoa salina foi formada por ação de ar comprimido sobre uma solução aquosa obtida por diluição de 5% de cloreto de sódio P.A. em água deionizada.



Figura 13 - Câmara para ensaio de exposição à névoa salina.

A zona de exposição da câmara de ensaio foi mantida a temperatura de 35°C. Foram utilizados 3 corpos de prova de cada tipo de revestimento, que foram limpos de maneira adequada antes de serem introduzidos na câmara. Os corpos de prova foram pendurados no interior da câmara através de fios de nylon. A duração do ensaio foi de 31 dias (744 horas) e após exposição dos materiais à câmara de névoa salina, os corpos de prova foram lavados em água deionizada para remover o excesso de cloreto de sódio remanescente, e secados imediatamente. Em seguida foram medidos novamente os ângulos de contato entre a água e a superfície dos recobrimentos e as superfícies foram analisadas por microscopia óptica.

O efeito do envelhecimento sobre as propriedades superficiais dos materiais foi avaliado principalmente através da caracterização dos ângulos de contato dos materiais antes e depois do envelhecimento. Foram feitas inspeções visuais, medidas de ângulo de contato e análise por microscopia óptica.

3.2.4 Erosão

A erosão por partículas sólidas é um processo de desgaste, definido como sendo a remoção de material de uma superfície pelo impacto repetitivo de partículas, movendo-se a velocidades superiores a 1,0 m/s, constituindo-se em um importante mecanismo de desgaste, que ocorre em diversas condições ambientais (Shewmon, 1983).

A extensão do desgaste depende de diversos parâmetros, como número e massa das partículas que atingem a superfície, bem como da forma, natureza, tamanho, velocidade, tempo e ângulo de impacto das partículas abrasivas. Os mecanismos de desgaste por erosão podem envolver deformação plástica e fratura frágil (Silva, 2001).

Nos ensaios de erosão são considerados alguns fatores, tais como a natureza física das partículas abrasivas de areia, a distância entre o bico da pistola e os corpos de prova, a velocidade e o ângulo de ataque das partículas e a pressão do jato de ar durante o processo de jateamento. Entretanto, esses fatores atuam na atmosfera de modo aleatório e imprevisível, o que torna impossível uma simulação fiel das variações ambientais nos ensaios em laboratório.

Para a realização dos ensaios de erosão foi projetado e construído um dispositivo, no Laboratório de Automobilística do CEFET/SC, que depois foi adaptado em uma câmara de jato de areia para simular em laboratório o processo de erosão, como mostra a Figura 14.



Figura 14 – Dispositivo projetado e construído para os ensaios de erosão por jateamento, com o corpo de prova na posição para o ensaio.

Este dispositivo foi adaptado em uma câmara de jateamento, mostrada na Figura 15, e o fluido utilizado para simular o processo de erosão foi baseado em uma mistura de ar e partículas de areia de tamanho médio de $105 \mu\text{m}$. Este tipo de partícula foi escolhido de maneira a simular as partículas existentes no ar e que entram em contato frontal direto com os isoladores elétricos, provocando a erosão. O jato de areia foi frontal aos corpos de prova, mantendo-se uma distância de 20 cm entre o bico da pistola e as amostras, simulando os processos naturais.

A velocidade de impacto das partículas nas amostras foi de 18 m/s, aproximadamente 65 km/h. Este valor aproxima-se dos valores médios das velocidades das rajadas dos ventos fortes que ocorrem no litoral do estado de Santa Catarina. Esta informação foi obtida junto ao Curso Técnico em Meteorologia do CEFETSC, em Florianópolis – SC. A distância de jateamento foi estabelecida em função da dispersão das partículas de areia, de maneira a se obter um perfil de ataque homogêneo na região central do corpo de prova. Para isso, a distância de jateamento foi definida em 20 cm, de modo a atingir na região frontal do corpo de prova uma área de aproximadamente metade da superfície do recobrimento.



Figura 15 – Câmara de jateamento do CEFET/SC.

As amostras foram inicialmente secadas em uma estufa de secagem e esterilização, modelo 320-SE da FANEM com circulação mecânica, na temperatura de 110°C durante duas horas. A pressão hidrostática na tubulação foi mantida em 7,5 kgf/cm² e pressão hidrodinâmica em 4,0 kgf/cm². A velocidade do fluxo de ar foi medida com um anemômetro La Crosse, modelo WS - 2310 e mantida constante no valor de 18 m/s. Foram utilizadas partículas de areia de tamanho médio de 105 µm que foram secadas em estufa a 110°C antes do jateamento.

Os corpos de prova foram submetidos individualmente ao jateamento frontal com as partículas de areia. As massas das peças foram medidas antes dos ensaios e em intervalos de 30 segundos, até o tempo total de jateamento de 180 segundos. Após o jateamento, os corpos de prova foram retirados do dispositivo, limpos com um leve jato de ar comprimido seco, de maneira a remover partículas de poeira da superfície, inspecionados visualmente para

verificar possíveis danos na superfície, pesados em uma balança Marte Balanças e Equipamentos de Precisão - modelo AL 500, com precisão de 0,001 g, embalados em sacos plásticos e submetidos a uma análise mais detalhada da região atingida.

Os corpos de prova foram analisados quanto à sua variação de massa e mediram-se novamente os ângulos de contato para verificar possíveis alterações em seus comportamentos hidrofílicos ou hidrofóbicos.

3.2.5 Microscopia Óptica

A microscopia óptica tem como principal potencialidade permitir a análise de grandes áreas, além de ser de utilização simples, rápida e pouco dispendiosa. Dois tipos de microscópio óptico são utilizados na análise de materiais: de reflexão, também conhecido como metalúrgico e de transmissão. O microscópio óptico de transmissão é bastante utilizado na análise de materiais cerâmicos e poliméricos, como por exemplo, no estudo e determinação da fração cristalizada em plásticos e vidros.

A observação direta da estrutura morfológica de um objeto está limitada pelo poder de resolução do olho humano. Este valor, aproximadamente 70 μm , corresponde a distância mínima entre dois pontos para que possa ser percebida pelo olho humano como entidades distintas. A função do microscópio é produzir uma imagem ampliada para a percepção correta da estrutura de um objeto. Como a formação da imagem depende da interação entre a luz e o objeto, a natureza da luz limita a resolução máxima do microscópio óptico em aproximadamente 0,1 μm (Canevarolo Jr., 2003).

A espessura aproximada pode ser obtida pela análise da fotomicrografia da secção transversal da amostra no microscópio óptico.

Este ensaio teve por objetivo verificar as espessuras das camadas dos recobrimentos aplicados sobre os substratos. As amostras foram cortadas e embutidas a frio e em seguida foram realizadas 20 medidas de espessura para cada tipo de recobrimento, usando um microscópio óptico marca LEICA, modelo DM 4000M, no Labmat - Laboratório de Materiais da UFSC em Florianópolis – SC. Foi utilizado o software computacional *Microsoft Office Picture Manager* para efetuar o tratamento gráfico de medida das espessuras das camadas por meio de uma comparação das imagens obtidas através do microscópio com a barra de escala LEICA.

3.2.6 Rugosidade.

Este ensaio teve como objetivo verificar se todos os recobrimentos apresentavam o mesmo grau de rugosidade e então relacionar uma possível variação no comportamento hidrofóbico dos recobrimentos com essa grandeza.

O estudo do acabamento superficial é importante na medida em que a molhabilidade de uma superfície por um líquido é afetada pela rugosidade (Exl, 2005).

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície, geralmente provocadas pela ferramenta que atuou sobre ela. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos como o rugosímetro e no Brasil os conceitos de rugosidade superficial são definidos pela norma ABNT NBR 6405-1985.

Na análise dos desvios da superfície real em relação à superfície geométrica ideal, podem-se distinguir os erros macro-geométricos, ou erros de forma, que podem ser medidos com instrumentos de medição convencionais e erros micro-geométricos, que apenas podem ser medidos com instrumentos especiais como o rugosímetro, o qual pode ser eletromecânico, ótico ou a laser. A Figura 16 ilustra esquematicamente a medição da rugosidade superficial através de um rugosímetro eletromecânico.

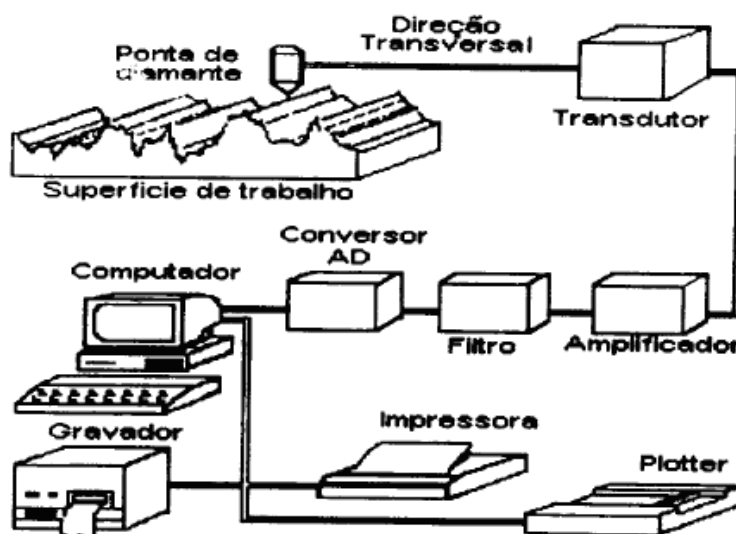


Figura 16 – Rugosímetro eletromecânico (Rosa, 2006).

A norma ABNT NBR 6405-1985 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. A linha média é a linha 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 17, onde $A_1 + A_2 = A_3$.

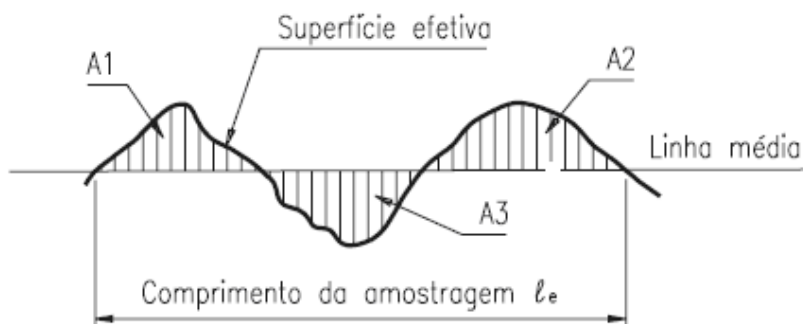


Figura 17 – Sistema da linha média (Rosa, 2006).

Quando se mede a rugosidade, o instrumento mostrará o perfil da peça composto da rugosidade e da ondulação. A ondulação é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento bem maior que sua amplitude e a frequência destas ondas é pequena. A rugosidade é, portanto, o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento semelhantes à sua amplitude sendo a frequência destas ondas bastante elevada.

Para a medição da rugosidade, esta deve ser separada da ondulação e dos desvios macro-geométricos. Esta separação é realizada através de um filtro de rugosidade que separa o perfil de rugosidade dos demais desvios de forma. O comprimento de onda do filtro, chamado “cutt-off”, determina o que deve passar e o que não deve passar. O sinal da rugosidade apresenta altas frequências (pequenos comprimentos de onda) e as ondulações e demais erros de forma apresentam sinais com baixas frequências (grandes comprimentos de ondas). Os rugosímetros utilizam para isso filtros, que deixam passar os sinais de altas frequências e eliminam os sinais de baixas frequências (Novaski, 1994).

Dentre os diversos parâmetros de rugosidade descritos na literatura, destacam-se R_a , R_q e R_z e R_{max} . A rugosidade média R_a (roughness average) é a média aritmética das

distâncias entre a linha média (eixo x) e cada ponto do perfil de rugosidade da superfície, sendo calculada segundo a equação 3:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L} \quad (3)$$

ABNT recomenda o parâmetro Ra para avaliação da rugosidade, expresso em μm . Muitas vezes, porém, é necessário conhecer algo mais sobre a superfície. Como exemplo pode-se citar os dois perfis representados na Figura 18, que apesar de possuírem o mesmo valor de Ra podem apresentar resultados bem diferentes conforme a aplicação.

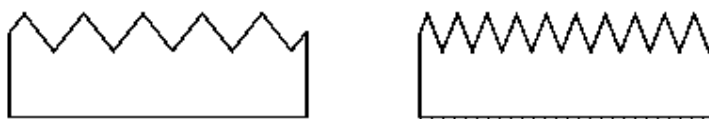


Figura 18 – Diferentes perfis de rugosidade, porém com o mesmo valor de Ra.

Rq representa o desvio médio quadrático sendo um parâmetro correspondente ao Ra e calculado pela equação 4:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n yi^2}{n}} \quad (4)$$

A elevação ao quadrado aumenta o efeito das irregularidades que se afastam da média.

A rugosidade máxima, Rmax, é o maior valor das rugosidades parciais Z_i , que se apresenta no percurso de medição L_m e a rugosidade média R_z é a média aritmética dos 5 valores da rugosidade parcial Z_i , como representa a equação 5.

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (5)$$

A rugosidade parcial Z_i é definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maiores afastamentos (acima e abaixo da linha média) existentes dentro de um comprimento de amostragem L_e . Graficamente, este valor representa a altura.

Neste trabalho foram realizadas medidas usando um rugosímetro MAHR, modelo Perthometer S2 V2 O6, com apalpador mecânico de raio 3 μm com ponta de diamante, no Laboratório de Análise de Superfícies do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC em Florianópolis – SC. Foram realizadas 10 medidas para cada um dos parâmetros Ra, Rq, Rz e Rmax, em 3 corpos de prova para cada tipo de recobrimento segundo a norma ABNT 6405 – 1985. Para esse ensaio incluíram-se também 3 corpos de prova sem recobrimento com o objetivo de verificar se os recobrimentos poliméricos alteram de maneira significativa a rugosidade superficial dos substratos.

3.3 Desenvolvimento Experimental

Todos os ensaios foram realizados em laboratórios da UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina e do CEFETSC – Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, em Florianópolis – SC, como está discriminado abaixo.

- 1. Ângulo de Contato:** Laboratório de Materiais Porosos e Propriedades Termodinâmicas (LMPT-EMC) da UFSC, em Florianópolis-SC.
- 2. Envelhecimento Acelerado:** Laboratório de Controle de Processos do Departamento de Engenharia Química da UFSC, em Florianópolis-SC.
- 3. Corrosão por exposição à névoa salina:** Laboratório de Automobilística, no CEFETSC, em Florianópolis – SC.
- 4. Erosão** – Laboratório de Automobilística, no CEFETSC, em Florianópolis – SC.
- 5. Microscopia Óptica:** Laboratório de Materiais (LABMAT) da UFSC, em Florianópolis-SC.
- 6. Rugosidade:** Laboratório de Análise de Superfícies do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, em Florianópolis – SC.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ângulo de Contato

A Figura 19 mostra um gráfico comparativo dos valores médios dos ângulos de contato entre os recobrimentos e uma gota de água, com seus respectivos desvios padrões, relativos as medidas realizadas antes de as amostras passarem por qualquer ensaio.

A Figura 20 apresenta os perfis das gotas de água sobre os diversos recobrimentos obtidos através do goniômetro DATA PHYSICS, durante as medidas de ângulo de contato.

Nas Tabelas A.1 a A.5 em anexo, apresentam-se todos os valores das medidas dos ângulos de contato da água sobre os recobrimentos, realizadas antes de as amostras passarem por qualquer ensaio.

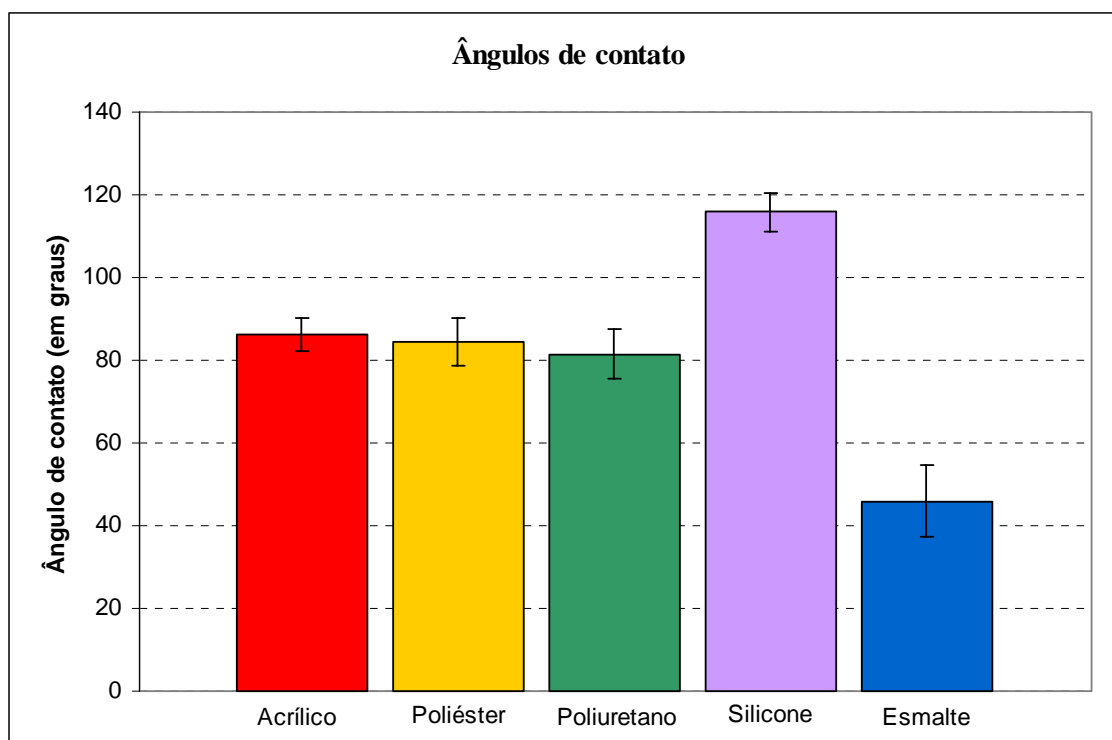


Figura 19 – Valores médios dos ângulos de contato entre a água e os recobrimentos antes dos ensaios.

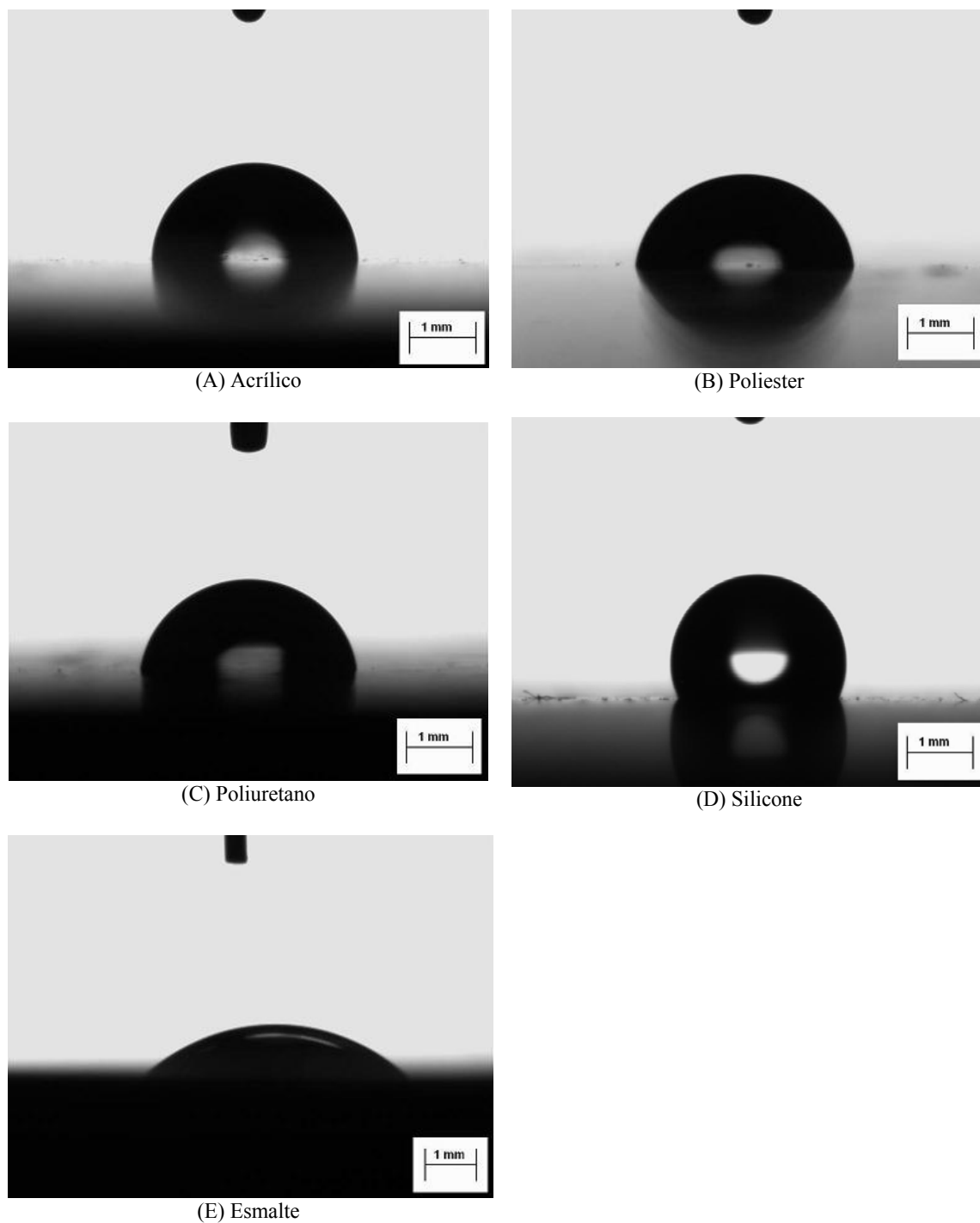


Figura 20 – Imagem de uma gota de água, antes dos ensaios, sobre o recobrimento: (A)acrílico, (B) poliéster, (C) poliuretano, (D) silicone e (E) esmalte cerâmico.

A maioria dos métodos existentes para a avaliação da hidrofobicidade de materiais não permite a determinação de um valor quantitativo absoluto desse comportamento, e então simplesmente comparam-se as superfícies verificando relativamente se são mais ou menos hidrofóbicas.

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 19 permitem algumas conclusões. Deve-se lembrar que os ângulos, a partir do qual as superfícies são consideradas hidrofóbicas, variam segundo diversos autores. Por qualquer um dos critérios citados anteriormente, todos os recobrimentos poliméricos aqui estudados apresentam comportamento hidrofóbico, enquanto que o esmalte cerâmico apresenta comportamento hidrofílico.

Entre esses recobrimentos poliméricos, o silicone apresenta-se o mais hidrofóbico, com ângulo de contato de 116° , e os outros recobrimentos apresentam valores semelhantes entre si, quase atingindo o ângulo de 90° . O silicone apresenta ângulo de contato com a água, aproximadamente 35% superior aos demais recobrimentos poliméricos aqui investigados. Este valor está de acordo com a literatura. Inone et al. (2003), em estudos de caracterização de isoladores poliméricos realizaram medidas de ângulo de contato entre a água e superfícies de silicone e obtiveram valores de 106° . Liebermann (2002) encontrou valores sempre maiores do que 90° para ângulos de contato entre a água e recobrimentos de silicone aplicados sobre superfícies de isoladores elétricos.

Os valores médios apresentados pelo acrílico, poliéster e poliuretano foram 86° , 84° e 82° respectivamente. Esses valores também caracterizam comportamento hidrofóbico por qualquer um dos critérios da literatura citada anteriormente, onde o valor médio obtido para o esmalte cerâmico, 46° , caracteriza comportamento hidrofílico.

O maior desempenho do recobrimento de silicone em relação aos outros recobrimentos, em especial em relação ao esmalte cerâmico, está evidente nas imagens das gotas apresentadas na Figura 20. Pelos valores expostos no gráfico da Figura 19 verifica-se que ocorreu pequena dispersão nas medidas dos ângulos de contato.

4.2 Envelhecimento Acelerado por Radiação Ultravioleta.

Na Figura 21 apresenta-se um gráfico comparativo com a variação dos valores médios dos ângulos de contato entre a água e os recobrimentos em função do tempo de exposição e na

Figura 22 mostra-se uma comparação visual entre corpos de prova que não passaram por ensaios e corpos de prova ao final dos ensaios de envelhecimento acelerado. A Figura 23 mostra vistas superiores de aspectos micrográficos das superfícies dos recobrimentos após o referido ensaio.

As Tabelas A.6 a A.10 em anexo apresentam as medidas dos ângulos de contato entre a água e os recobrimentos realizadas na metade do tempo de duração do ensaio, isto é, após 15 dias de permanência dos corpos de prova na câmara de envelhecimento acelerado e as Tabelas A.11 a A.15, também em anexo, apresentam os valores das medidas dos ângulos de contato ao final do ensaio.

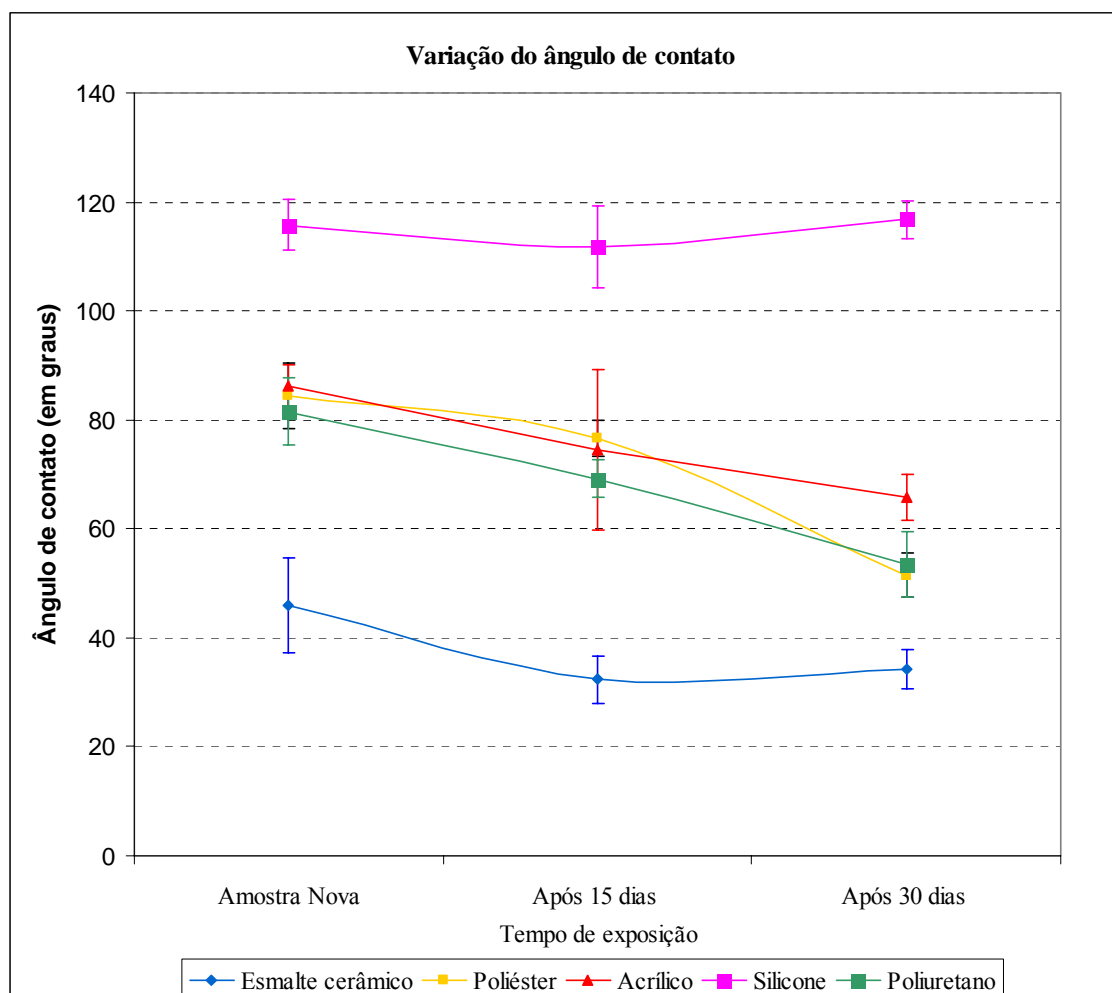
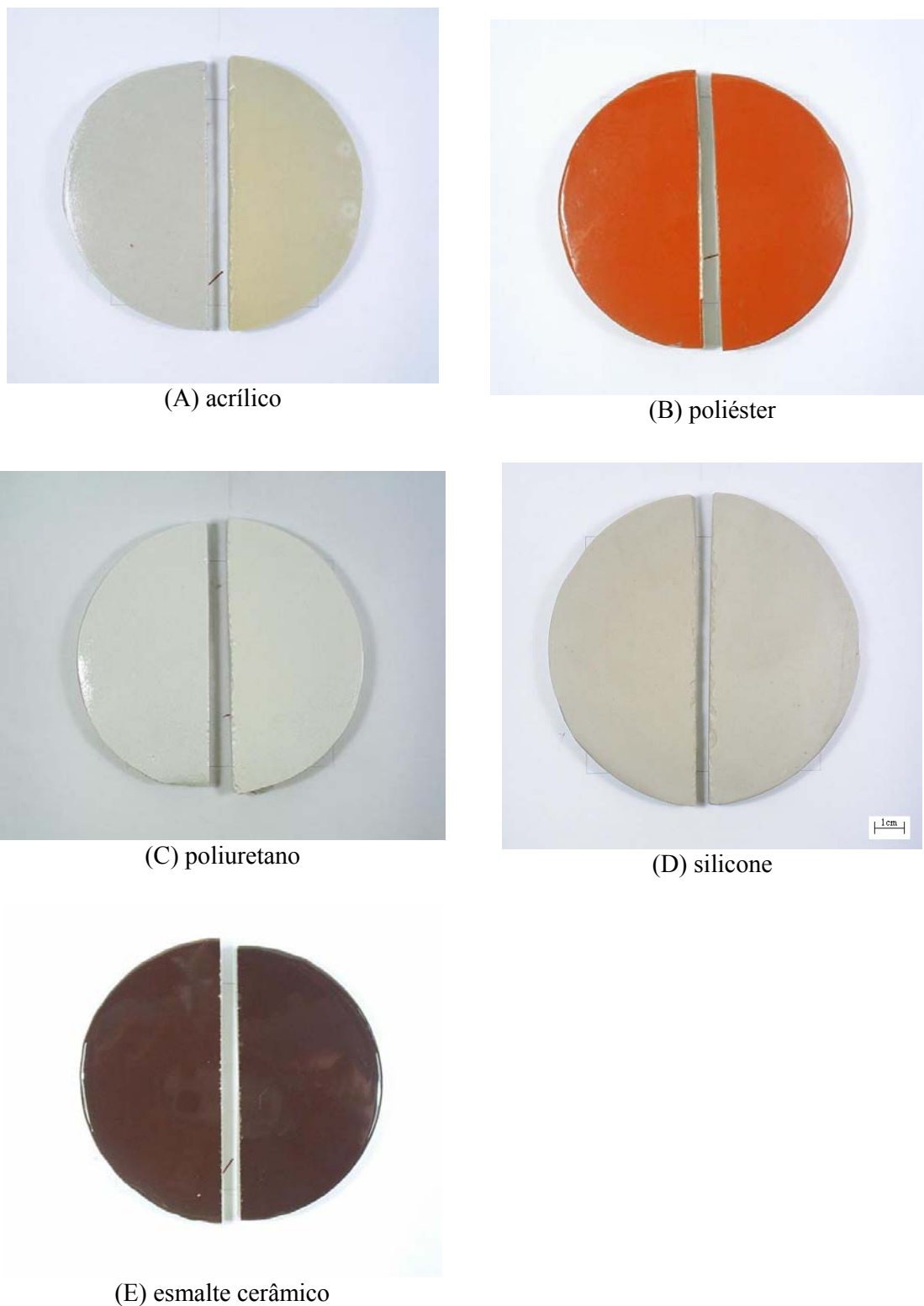


Figura 21 - Variação dos valores médios dos ângulos de contato entre a água e os recobrimentos durante o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação UV.



(E) esmalte cerâmico
Figura 22 – Corpos de prova antes do ensaio (esquerda) e após o ensaio (direita) de envelhecimento acelerado por radiação UV com recobrimento de: (A) acrílico, (B) poliéster, (C) poliuretano, (D) silicone e (E) esmalte cerâmico.

Como a exposição à radiação no interior da câmara provoca uma aceleração de aproximadamente 14 vezes em relação à exposição natural, os primeiros 15 dias de ensaio já correspondem a aproximadamente 7 meses de exposição solar em ambiente externo. Ao final do ensaio, isto é, após 30 dias de exposição à radiação UV na câmara de envelhecimento acelerado, os materiais ficaram submetidos ao tempo corresponde a aproximadamente 14 meses de exposição solar em ambiente externo.

No gráfico da Figura 21 verifica-se que, exceto o silicone, os outros recobrimentos apresentaram decréscimos significativos nos ângulos de contato, inclusive o esmalte cerâmico. O ângulo de contato entre uma gota de água e o recobrimento de silicone apresentou um ligeiro acréscimo, passando de 116° para 117° . O recobrimento em poliéster apresentou com variação de 84° para 52° , uma redução de 38%. Seguiu-se o poliuretano com variação de 82° para 54° , redução de 34% e por último o acrílico, onde o ângulo de contato ao final do ensaio, 66° é 23% menor do que o ângulo no início do ensaio, cujo valor foi de 86° . Verificou-se também que no recobrimento de esmalte cerâmico o ângulo de contato decresceu 26%, passando de 46° para 34° .

Os desvios padrões, representados pelas barras de erros na Figura 21, mostram que as medidas apresentaram pequenas dispersões.

Dependendo da referência de literatura adotada, ao final do ensaio, os recobrimentos de poliéster e poliuretano já não manifestariam comportamento hidrofóbico, já que apresentavam ângulos de contato de valores respectivamente iguais a 52° e 54° .

Quanto a alterações visuais, como mostra a Figura 22, a olho nu apenas o recobrimento de acrílico apresentou alteração significativa de coloração, com sensível amarelecimento. Esta alteração na coloração, que já havia ocorrido na metade do ensaio e se tornou mais acentuada ao final do mesmo, está relacionada com o fato de ter sido usado uma resina acrílica estirenada.

Uma análise da Figura 23, com os aspectos micrográficos das superfícies obtidos por microscopia óptica, no entanto, mostra que todas as superfícies apresentam alterações, provavelmente provocadas pela degradação fotooxidativa. Essa mudança é bem mais evidente na superfície do acrílico, como se verifica na Figura 23.A.

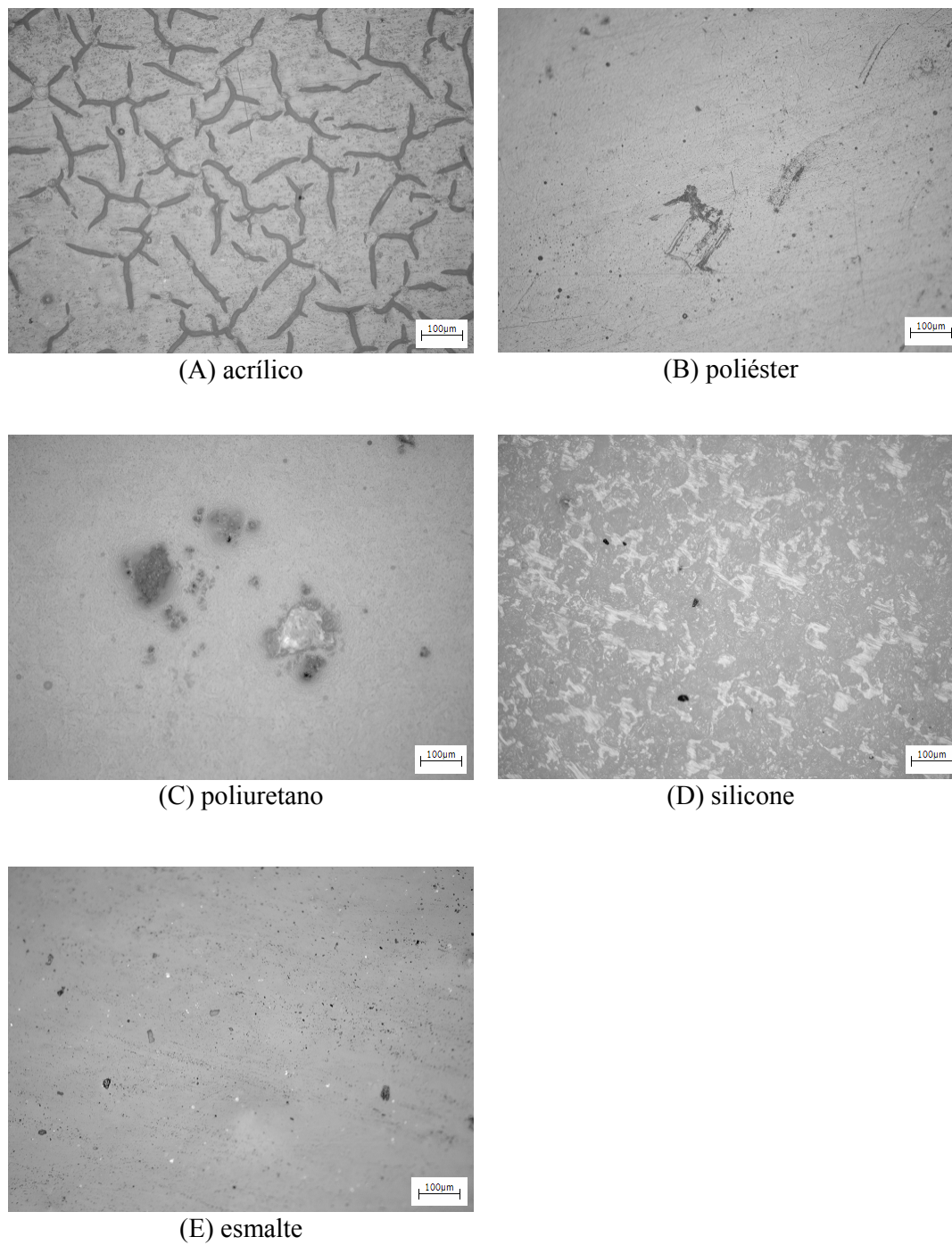


Figura 23 – Fotomicrografias em vista superior com aumento de 100x, dos recobrimentos depois do ensaio de envelhecimento acelerado por radiação UV: (A) acrílico, (B) poliéster, (C) poliuretano, (D) silicone e (E) esmalte cerâmico.

4.3 Névoa Salina

A Figura 24 apresenta um gráfico comparativo com os valores médios dos ângulos de contato medidos antes e depois de as peças serem submetidas ao ensaio de névoa salina e as Figuras 25 a 29 apresentam os aspectos visuais dos diversos recobrimentos antes e depois do ensaio, obtidos por microscopia óptica.

As Tabelas A.16 a A.20 em anexo apresentam todas as medidas dos ângulos de contato efetuadas entre a água e os diversos recobrimentos após o ensaio de névoa salina.

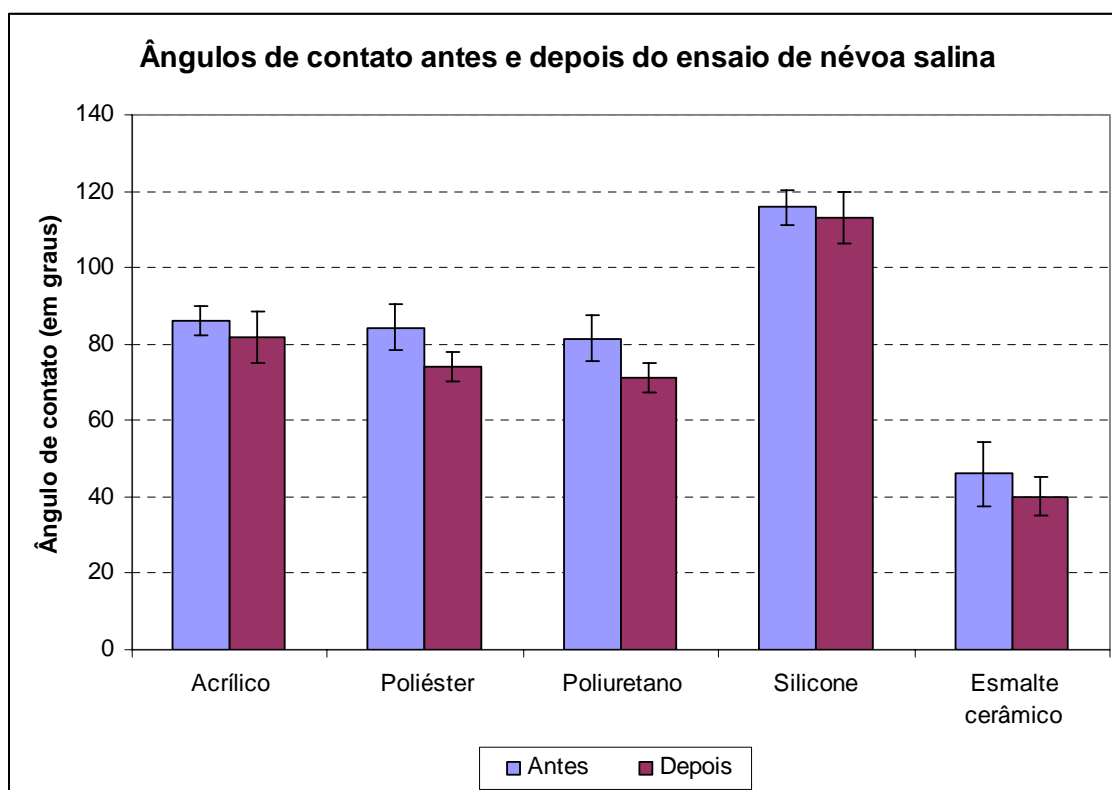


Figura 24 – Valores médios dos ângulos de contato antes e após o ensaio de névoa salina.

Esses resultados evidenciam que o silicone apresenta o melhor desempenho frente à ação de atmosfera salina, sofrendo uma diminuição de apenas 3% no ângulo de contato, cujo valor passou de 116° para 113°. O segundo melhor desempenho foi apresentado pelo acrílico, com 5% de decréscimo enquanto que os recobrimentos de poliéster e poliuretano

apresentaram decréscimos bem maiores e semelhantes entre si, em torno de 12%. O recobrimento de esmalte cerâmico, que já apresentava comportamento hidrofílico, passou a apresentar ainda maior molhabilidade, com o ângulo de contato reduzindo-se de 46° para 40°.

Os ângulos de contato entre a água e os recobrimentos apresentaram, portanto, um decréscimo após o ensaio de névoa salina, especialmente as superfícies de esmalte cerâmico, poliéster e poliuretano. Por outro lado, as superfícies em acrílico e principalmente em silicone apresentaram uma diminuição não significativa nos valores dos ângulos de contato. Após este ensaio, no entanto, todos os recobrimentos poliméricos continuavam a apresentar comportamento hidrofóbico, qualquer que fosse o critério adotado como referência na literatura citada anteriormente.

Uma análise preliminar nos corpos de prova após o ensaio de névoa salina, não indicou nenhuma alteração visual. Os corpos de prova, então, foram examinados por microscopia óptica e as imagens confirmaram esta evidência nas superfícies, como está demonstrado nas Figuras 25 a 29 que apresentam fotomicrografias com vistas superiores dos recobrimentos, em aumentos de 100x, obtidas através de microscópio óptico, antes e depois do ensaio de névoa salina.

Foram, portanto, feitas inspeções visuais, medidas de ângulo de contato e análise por microscopia óptica após o ensaio. Os resultados mostraram que neste ensaio de duração relativamente curta, mesmo a nível microscópico não foi visualizado nenhum processo de erosão ou degradação que poderia comprometer o desempenho do material se fosse utilizado como recobrimento em isoladores elétricos. Sugere-se, no entanto, realizar os ensaios em períodos de tempo mais longos.

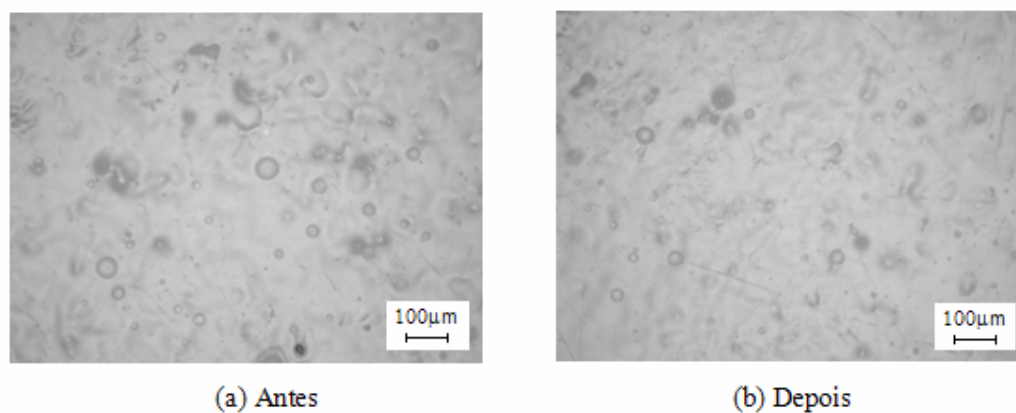


Figura 25 – Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de acrílico: (a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.

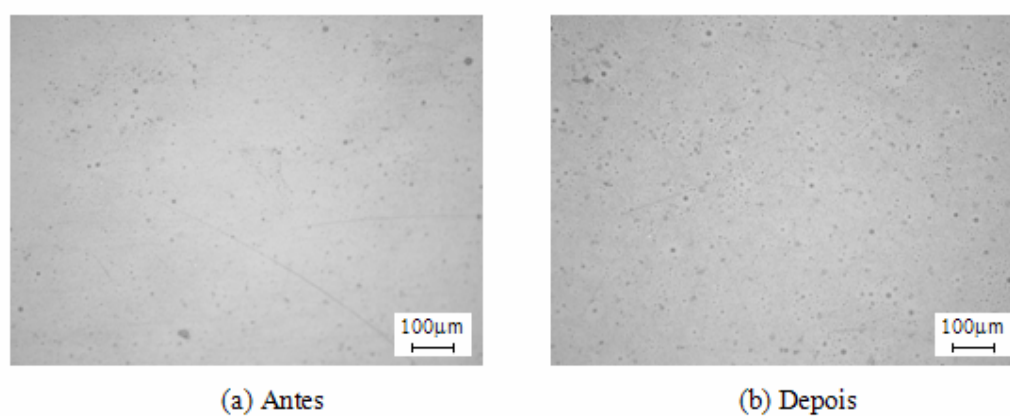


Figura 26 – Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de poliéster: (a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.

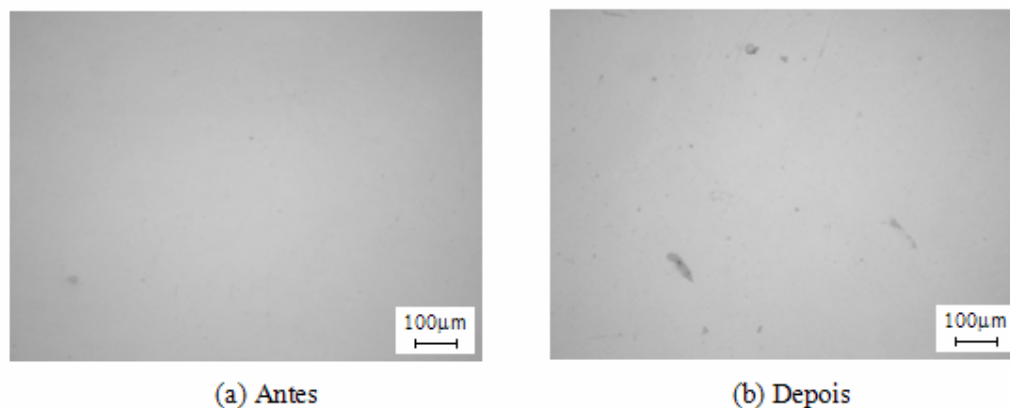


Figura 27 – Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de poliuretano: (a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.

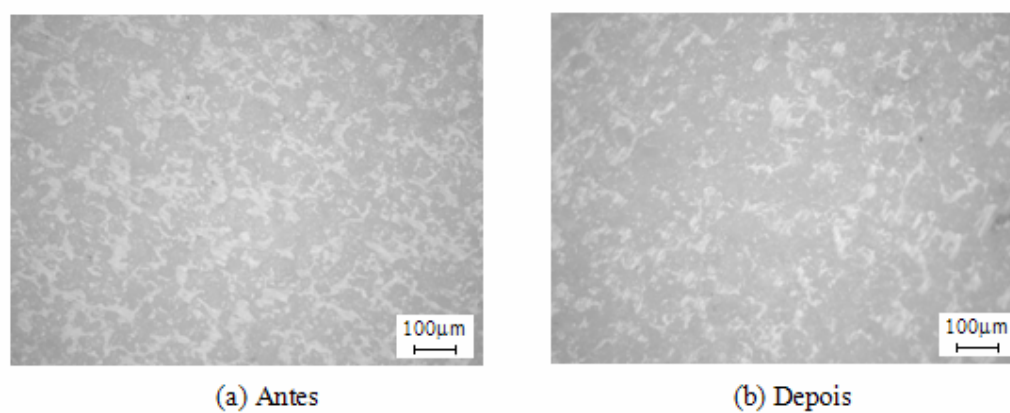


Figura 28 – Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de silicone: (a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.

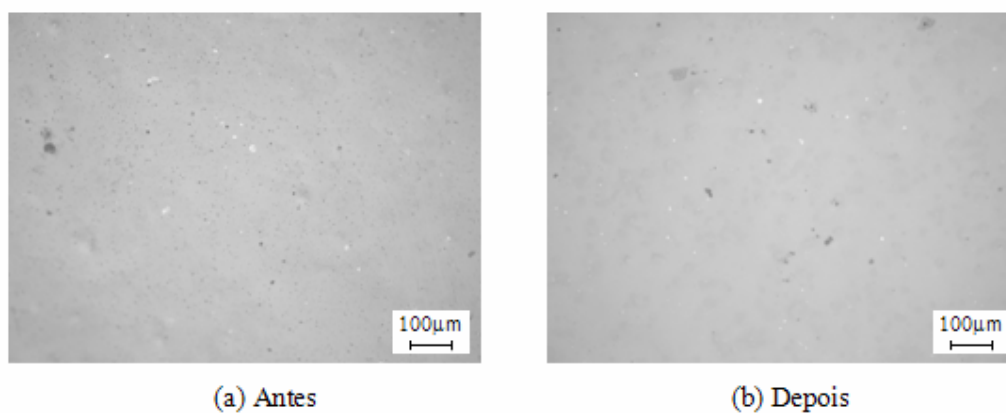


Figura 29 – Fotomicrografia (aumento 100x) do recobrimento de esmalte cerâmico: (a) antes e (b) depois do ensaio de névoa salina.

Os ângulos de contato entre a água e os recobrimentos apresentaram um decréscimo após o ensaio de névoa salina, especialmente as superfícies de esmalte cerâmico, poliéster e poliuretano. Por outro lado, as superfícies em acrílico e principalmente em silicone apresentaram uma diminuição não significativa nos valores dos ângulos de contato. Após este ensaio, no entanto, todos os recobrimentos poliméricos continuavam a apresentar comportamento hidrofóbico, qualquer que fosse o critério adotado como referência na literatura citada anteriormente.

As amostras não apresentaram alterações visuais significativas em seus aspectos, nem a olho nu, nem ao microscópio óptico, como demonstram as fotomicrografias das Figuras 25 a 29, em vistas superiores com aumento de 100x. Isto indica que, mesmo estando expostos a uma atmosfera salina, se esses recobrimentos poliméricos estivessem aplicados sobre isoladores elétricos, após serem lavados manteriam o comportamento hidrofóbico, ainda que o ângulo de contato fosse menor do que sem a agressão do sal.

4.4 Erosão

O gráfico da Figura 30 apresenta a variação de massa dos corpos de prova com os diversos recobrimentos em função do tempo de ensaio e a Figura 31 mostra uma fotomicrografia, obtida por microscopia óptica, da superfície de um corpo de prova recoberto com poliéster, mostrando uma partícula de areia incrustada na superfície após o ensaio de erosão, com aumento de 200x.

A Figura 32 apresenta a perda média de massa dos corpos de prova ao final do ensaio de erosão e o gráfico da Figura 33 mostra a variação dos valores médios dos ângulos de contato com o referido ensaio.

Os resultados individuais dos ensaios de erosão estão apresentados nas Tabelas A.21 a A.25, em anexo, com as variações de massa em intervalos de 30 s e também o desvio padrão para cada intervalo de dados. Nessas tabelas os valores negativos correspondem a perda de massa enquanto que os valores positivos correspondem a ganho de massa das amostras. Também em anexo, na Tabela A.26, apresentam-se todas as medidas dos ângulos de contato efetuadas entre os diversos recobrimentos e a água.

As medidas efetuadas nas amostras revestidas com poliéster demonstram que ocorreu pequeno aumento de massa. Após uma análise microscópica constatou-se que isso foi devido ao fato de partículas de areia ficar incrustadas na camada de poliéster como está visível na Figura 31, em uma vista superior da superfície com aumento de 200x, obtida com um microscópio óptico.

Os valores médios da perda de massa do recobrimento de poliuretano correspondem aos valores da amostra que resistiu até o final do ensaio. Os ensaios com as outras duas amostras revestidas com esse recobrimento foram interrompidos após 90 s porque ocorreu a erosão completa da camada de polímero na área atingida pelas partículas e então, os dados correspondentes a essas duas amostras foram descartados. Os dados indicam que não houve variação significativa de massa para essa amostra, podendo ter ocorrido a erosão de partículas do recobrimento e ao mesmo tempo a incrustação de partículas de areia, como aconteceu com o recobrimento de poliéster.

Os valores médios da perda de massa do recobrimento de silicone correspondem a variação de massa de duas amostras porque uma das peças apresentou perda de massa uma ordem de grandeza maior do que a média das outras duas e então, os dados correspondentes a essa amostra foram descartados.

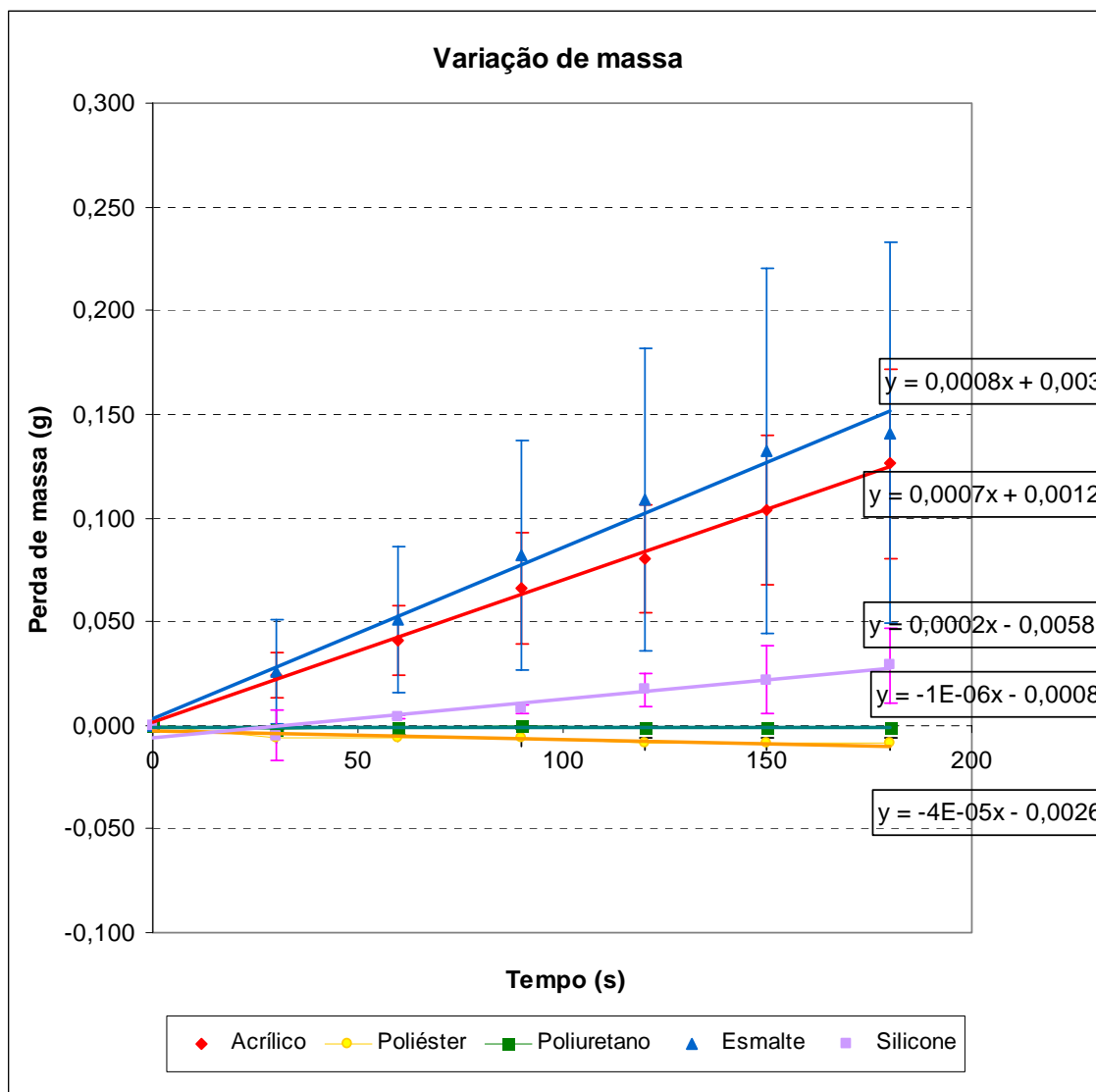


Figura 30 – Variação de massa dos corpos de prova com os diversos recobrimentos.

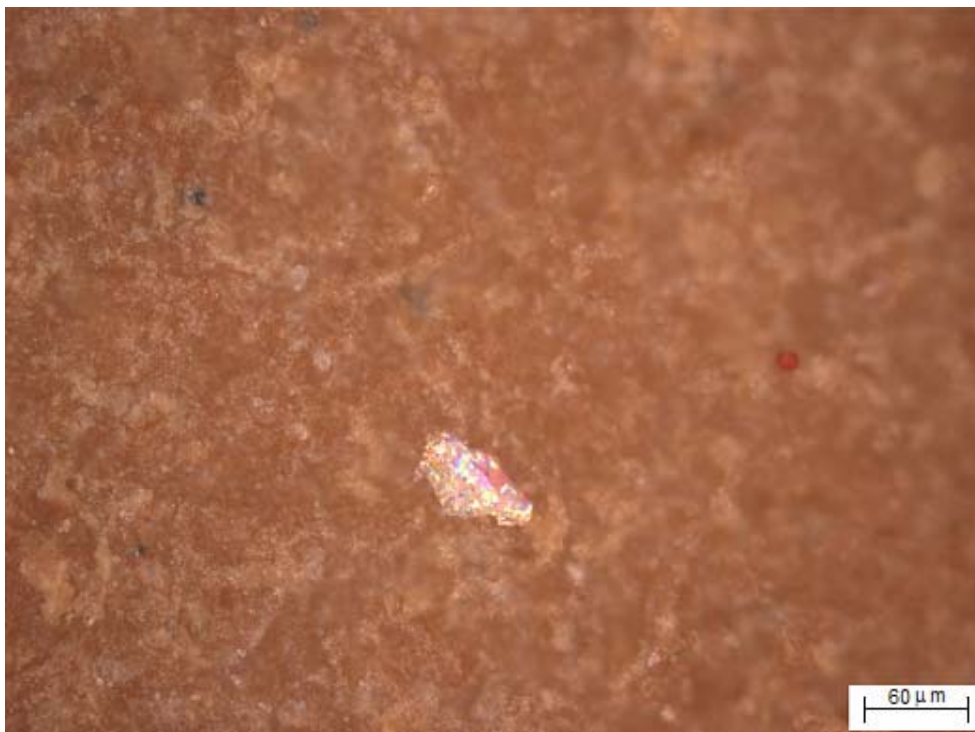


Figura 31 – Fotomicrografia da superfície de um corpo de prova recoberto com poliéster, mostrando uma partícula de areia incrustada na superfície, após o ensaio de erosão por jateamento. Vista superior com aumento de 200x.

As peças recobertas com esmalte cerâmico apresentaram, relativamente, o maior desgaste por erosão, sendo seguidas pelas amostras recobertas com acrílico e pelas amostras com recobrimento em silicone.

A interpretação das variações de massa entre os diversos recobrimentos pode estar relacionada com o grau de dureza e tenacidade dos materiais. O fato de um material apresentar alta dureza não significa que oferecerá grande resistência ao desgaste, é preciso também alta tenacidade (Oliveira, 2004).

No gráfico correspondente ao esmalte cerâmico, na Figura 30, apesar da grande dispersão nas medidas de perda de massa em função do tempo, a análise da regressão linear simples forneceu o valor de R-quadrado muito próximo de 1,0 ($R^2= 0,98$) indicando uma relação linear entre as duas variáveis. A dispersão pode ser devido a problemas na superfície do recobrimento sobre o substrato cerâmico.

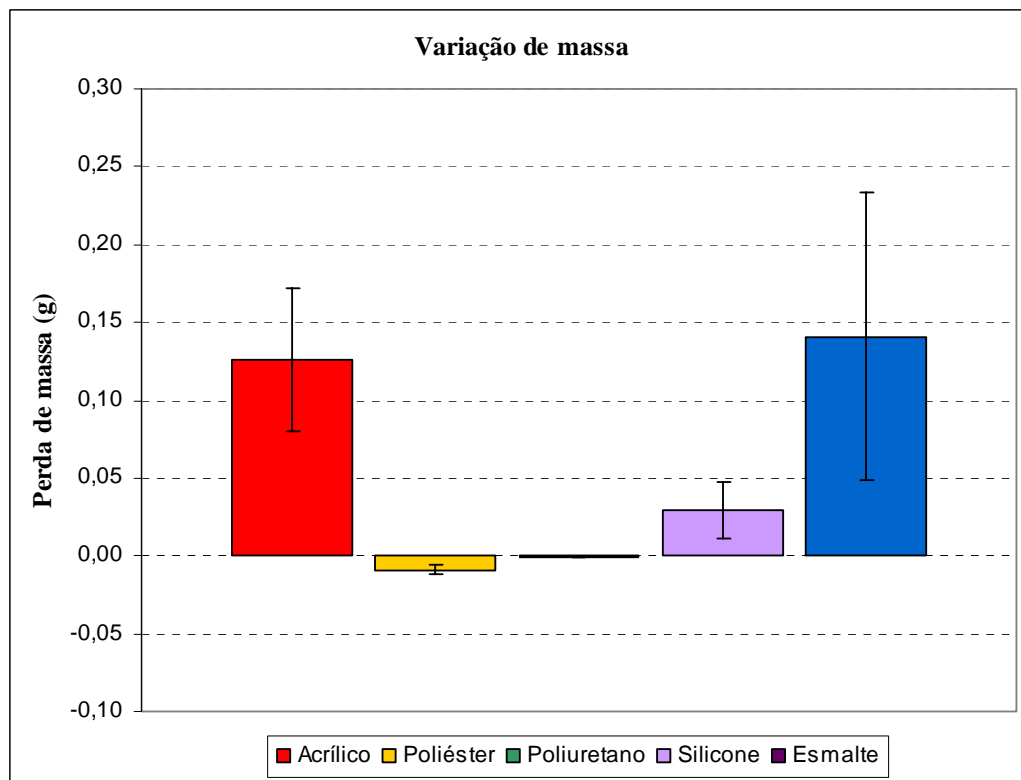


Figura 32 – Perda média de massa dos corpos de prova ao final do ensaio de erosão.

A se manter o comportamento observado no gráfico da Figura 30, se poderia estimar, comparativamente, a expectativa de vida das diversas camadas dos revestimentos. Como os coeficientes angulares das retas representam fisicamente a perda de massa por unidade de tempo, os revestimentos de esmalte cerâmico e acrílico apresentam uma expectativa de vida bem menor do que os outros revestimentos, aproximadamente $\frac{1}{4}$ da expectativa de vida do silicone. Por outro lado, os revestimentos de poliéster e poliuretano apresentam as maiores expectativa de vida, considerando-se o intervalo de tempo de duração do ensaio e se for mantido o comportamento observado durante o ensaio. Ressalta-se, no entanto, que a literatura (Silva, 2001) refere-se a um período de incubação que pode ocorrer no início de ensaios de erosão, onde a massa das amostras aumenta ligeiramente antes de decrescer, o que poderia ter ocorrido com as peças recobertas com esses dois últimos polímeros.

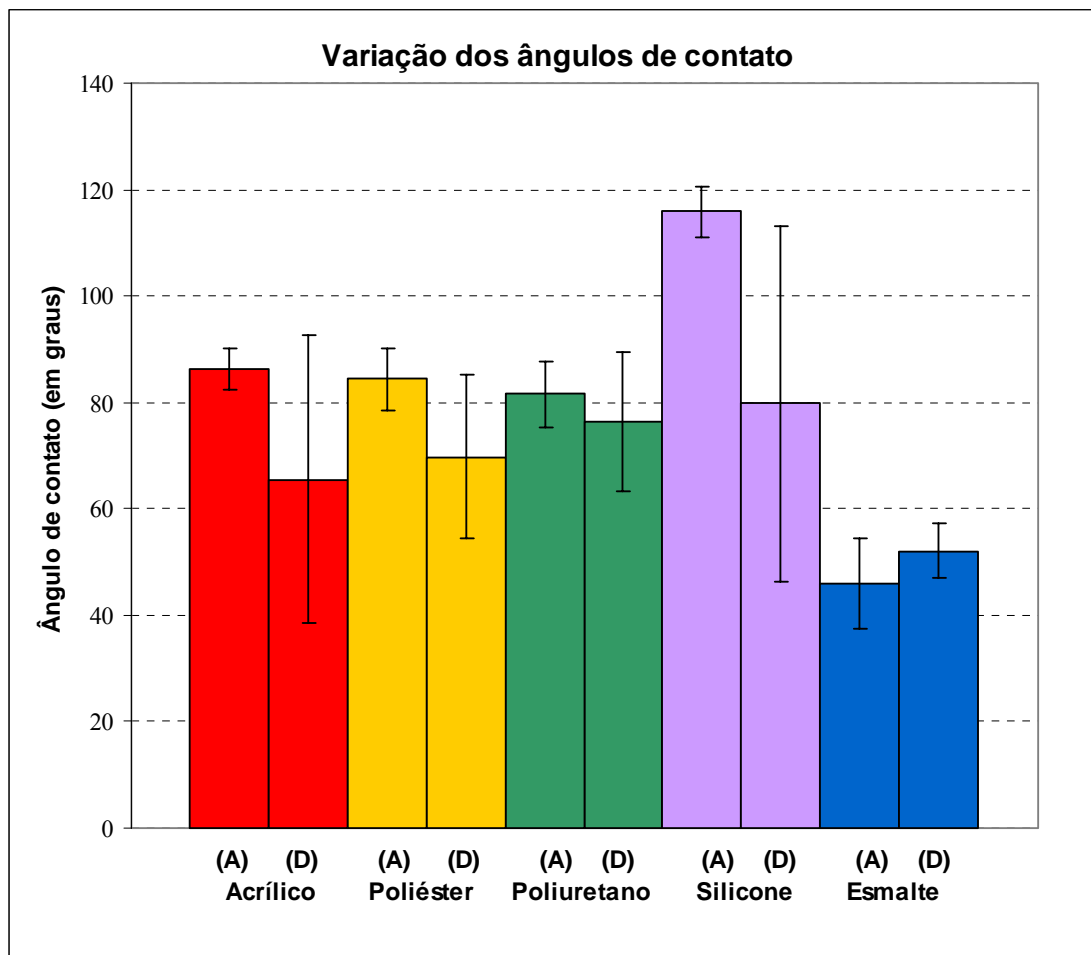


Figura 33 – Variação dos ângulos de contato com o ensaio de erosão: (A) antes e (B) depois do ensaio.

O gráfico da figura 33 apresenta os valores médios dos ângulos de contato dos diversos recobrimentos, antes (A) e depois do ensaio de erosão (D).

As medidas dos ângulos de contato da água sobre as superfícies de alguns recobrimentos, realizadas após o ensaio de erosão, apresentaram grande dispersão, como mostra o gráfico da Figura 33. Isso foi mais evidente nas amostras com recobrimento de silicone e de acrílico. O desvio padrão para as medidas realizadas sobre o silicone foi de 34° e para o acrílico foi de 27° . O provável fator que provocou tais resultados foi que, sendo as medidas realizadas em pontos aleatórios sobre a superfície, podem ter sido efetuadas em locais que teriam sofrido maior ou menor erosão durante o ensaio, ou seja, pode não ter ocorrido uma erosão uniforme sobre essas superfícies.

Uma análise do gráfico da Figura 33 também permite ver que os recobrimentos de silicone apresentaram o maior decréscimo no comportamento hidrofóbico, onde o ângulo de contato variou de 116° para 79° , sendo acompanhados pelas peças com recobrimento em acrílico, com decréscimo de 86° para 66° ao final de ensaio. Ressalta-se, no entanto, que as medidas de ângulo de contato realizadas sobre a amostra de silicone (S11), que já apresentara grande disparidade nas medidas de perda de massa, e por isso foram descartadas, provavelmente aqui também provocaram grande dispersão. Tal fato também pode estar relacionado com uma erosão não uniforme nos diferentes pontos onde foram efetuadas as medidas do ângulo de contato.

Quanto a razão para o decréscimo nos ângulos de contato, o processo erosivo por jateamento pode ter provocado um aumento na rugosidade média, com aumento da área efetiva, causando um aumento da energia livre superficial e levando a menores valores nas medidas de ângulo de contato, ou seja, maior molhabilidade.

Os recobrimentos em esmalte cerâmico por sua vez apresentaram ângulos de contato maiores do que antes dos ensaios, variando de 46° para 52° . Esta alteração também pode estar relacionada com uma variação da rugosidade superficial do material.

4.5 Microscopia Óptica

Os resultados das medidas de espessura para os diversos recobrimentos estão expressos pelo valor médio, com seus respectivos desvios padrões, no gráfico da Figura 34. A Figura 35 apresenta fotomicrografias com aumento de 100x, mostrando em corte transversal, os recobrimentos aplicados sobre os substratos.

A Tabela A.27, em anexo, apresenta as todas as medidas de espessura das camadas dos recobrimentos sobre os substratos com os respectivos desvios padrões.

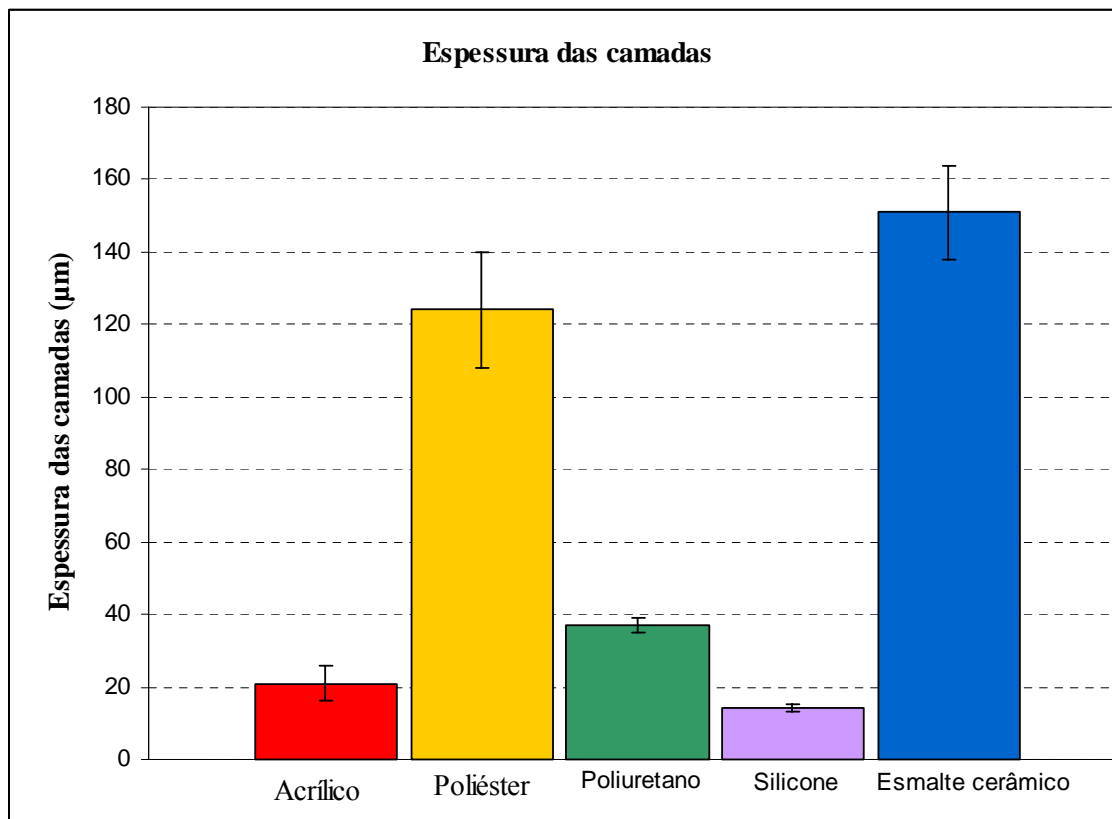


Figura 34 – Espessura das camadas dos recobrimentos.

Dentre os recobrimentos poliméricos o silicone apresentou a menor espessura, com uma camada média de apenas 14 µm, sendo seguido pelo acrílico com 21 µm e pelo poliuretano com 37 µm. A espessura do poliéster, 124 µm, aproximou-se do valor da espessura do recobrimento de esmalte cerâmico cujo valor médio encontrado foi 151 µm.

Uma observação se torna necessária. O poliéster foi aplicado em duas demãos porque a tentativa de manter apenas uma demão não se mostrou eficaz, já que não ocorria a completa cobertura do substrato. Tal fato explica a espessura dessa camada ser bem maior do que a espessura dos demais recobrimentos poliméricos. Sugere-se investigar outra forma de aplicação, lembrando, porém, que o processo eletrostático não é viável em virtude de o substrato apresentar valor muito pequeno de condutividade elétrica, por ser constituído da porcelana dos isoladores elétricos.

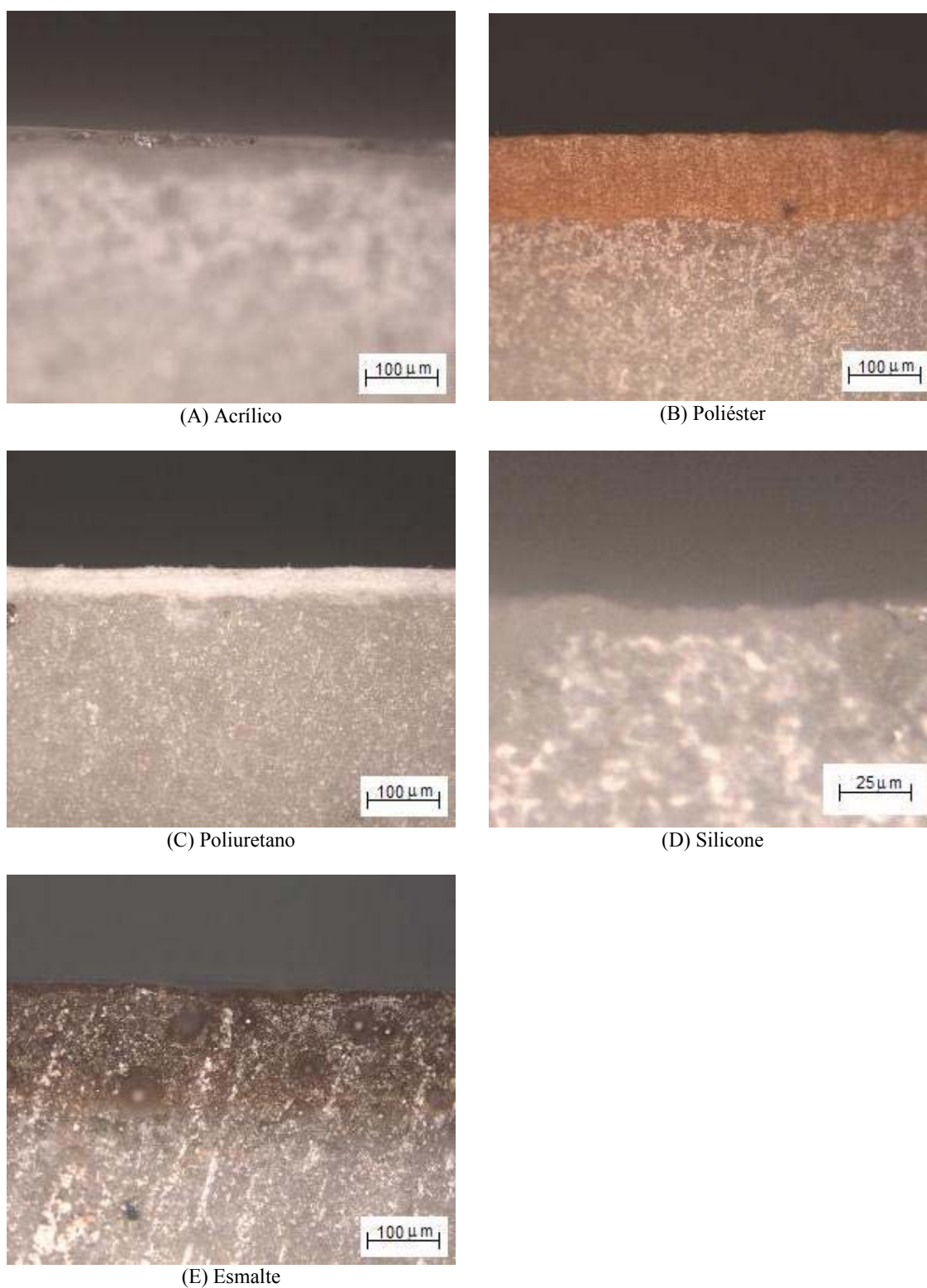


Figura 35 – Fotomicrografia, com aumento de 100x, mostrando os substratos recobertos com: (A) acrílico, (B) poliéster, (C) poliuretano, (D) silicone e (E) esmalte cerâmico.

4.6 Rugosidade

Os resultados das medidas dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rz e Rmax para as superfícies dos diversos recobrimentos superficiais e também para as peças sem recobrimento estão apresentados pelos seus valores médios, com os respectivos desvios padrões, nos gráficos das Figuras 36 a 39.

Os resultados completos das medidas de Ra para os diversos recobrimentos e também para os corpos de prova sem recobrimento encontram-se em anexo, na Tabela A.28. Os valores médios das medidas dos parâmetros Ra, Rq, Rz e Rmax estão apresentados também em anexo, nas Tabelas A.29 a A.32 respectivamente. Para essas Tabelas, X representa o valor médio das medidas e S representa o desvio padrão da série de dados.

As Figuras 40 a 45 apresentam os perfis de rugosidade obtidos para cada tipo de recobrimento e também para peças sem recobrimento.

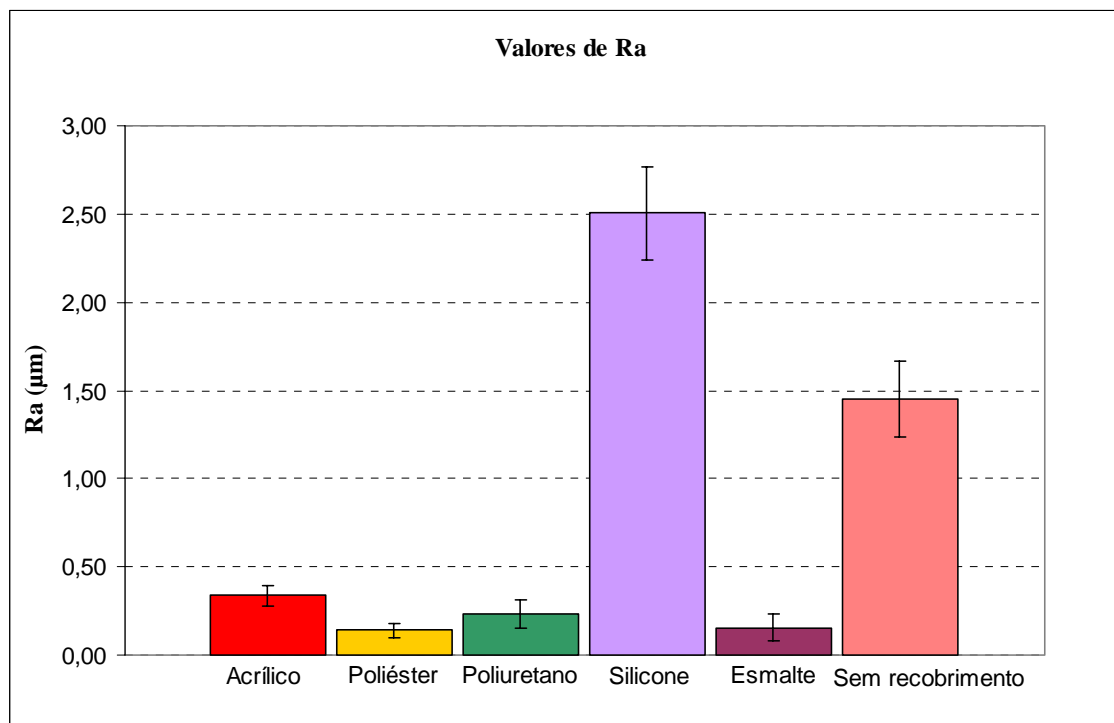


Figura 36 – Gráfico comparativo dos valores médios de Ra.

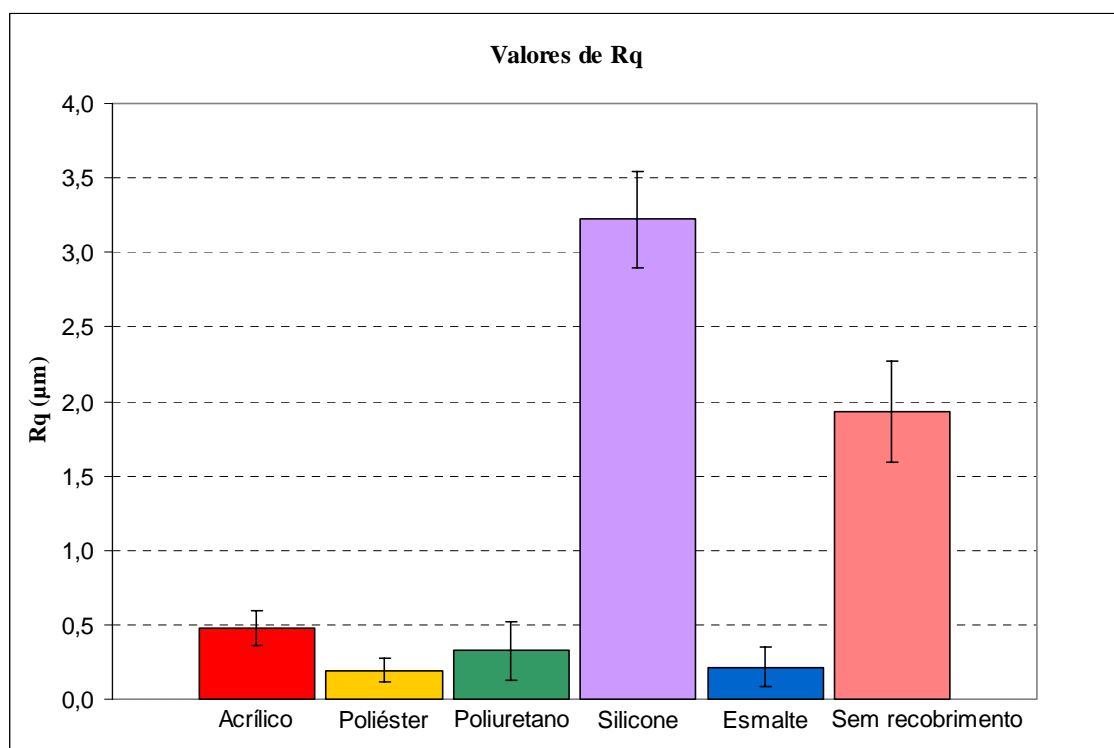


Figura 37 – Gráfico comparativo dos valores médios de Rq.

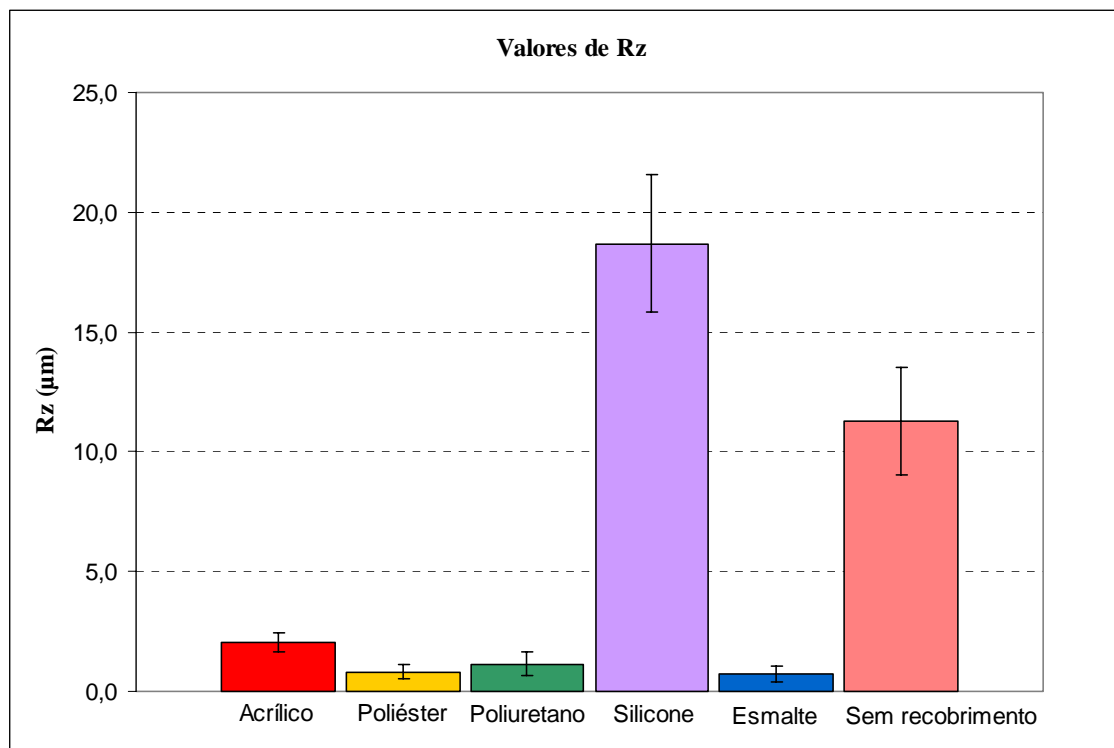


Figura 38 – Gráfico comparativo dos valores médios de Rz.

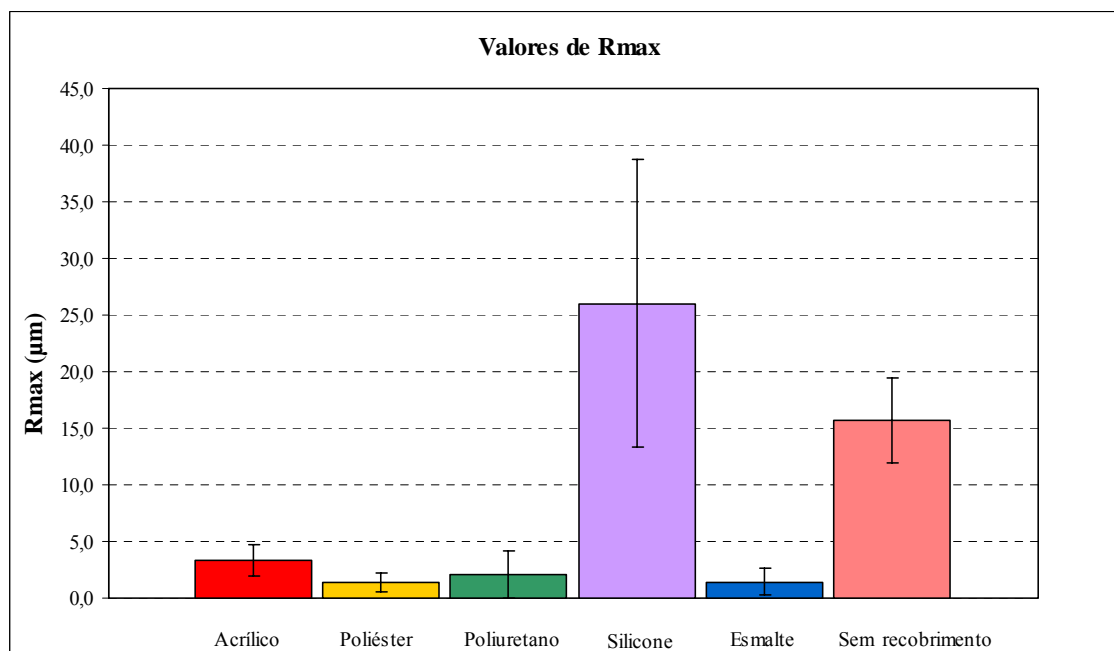


Figura 39 – Gráfico comparativo dos valores médios de Rmax.

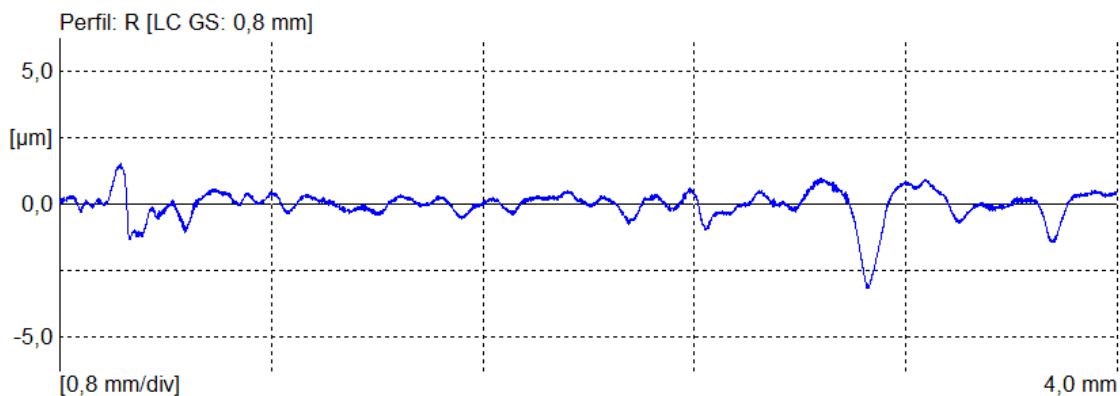


Figura 40 – Perfil de rugosidade para recobrimento com acrílico

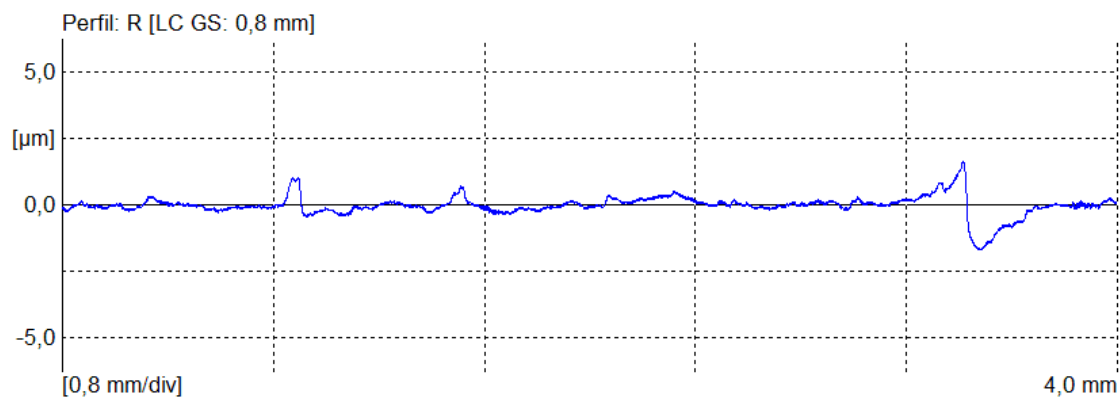


Figura 41 – Perfil de rugosidade para recobrimento com poliéster.

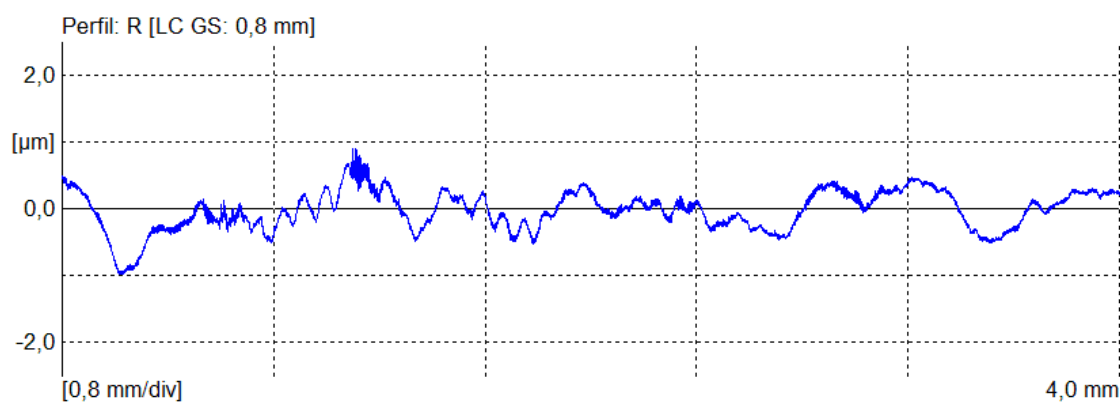


Figura 42 – Perfil de rugosidade para recobrimento com poliuretano.

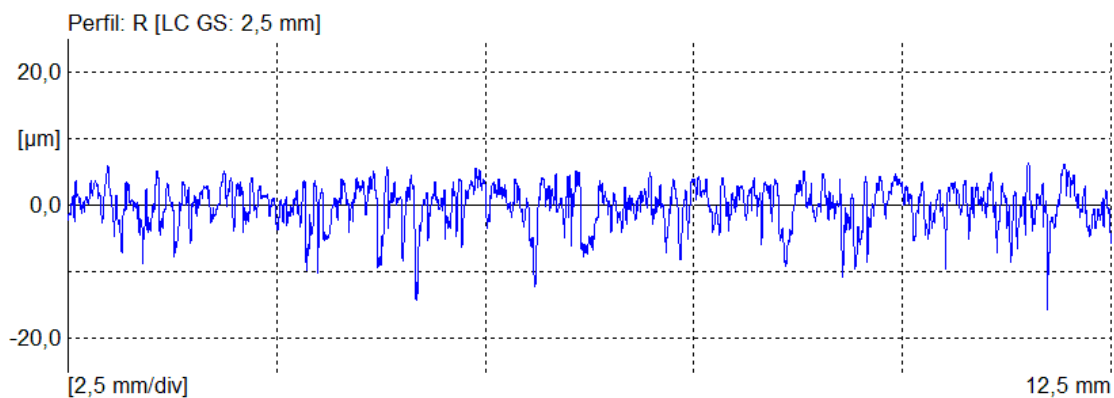


Figura 43 – Perfil de rugosidade para recobrimento com silicone.

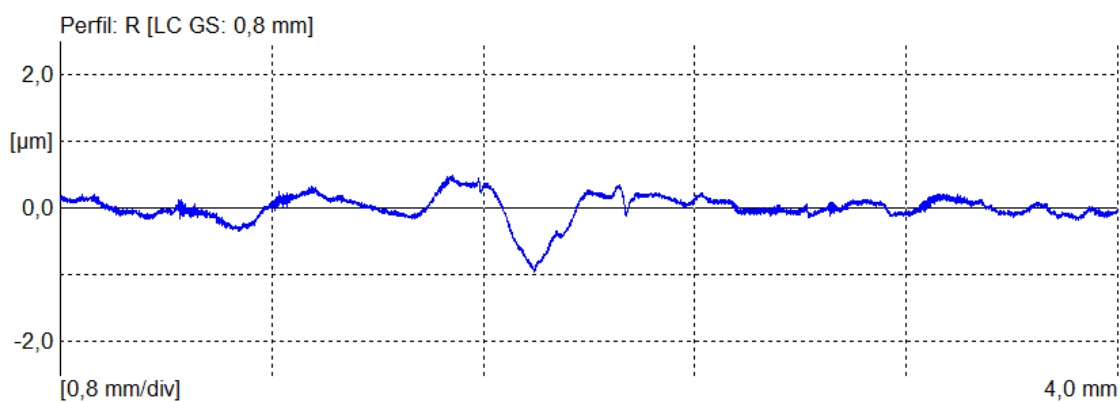


Figura 45 – Perfil de rugosidade para recobrimento com esmalte.

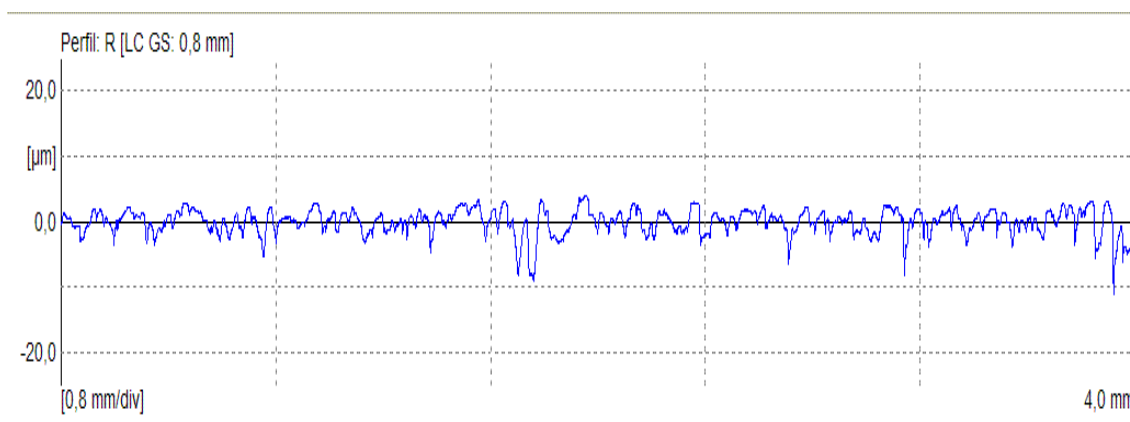


Figura 44 – Perfil de rugosidade para amostras sem recobrimento.

Sabe-se que os ângulos de contato de entre a água e as superfícies são influenciadas pela rugosidade superficial e esta grandeza tem que ser verificada quando materiais hidrofóbicos são comparados.

Inicialmente procurou-se determinar o melhor parâmetro para avaliar as rugosidades das superfícies e, ao analisar os gráficos comparativos para os diversos recobrimentos, não se verificou diferença significativa se fosse adotado Ra, Rz, Rq ou Rmax.

Os gráficos das Figuras 36 a 39 mostram que os recobrimentos de acrílico, poliéster e poliuretano apresentam valores muito próximos entre si em todos os parâmetros avaliados, Ra, Rq, Rz e Rmax. O recobrimento de silicone, no entanto, apresenta valores médios com uma ordem de grandeza acima dos outros recobrimentos, porém na mesma ordem de grandeza que as superfícies dos substratos sem recobrimentos.

Nas Figuras 40 a 45 pode-se ver também que as rugosidades nas superfícies desses três primeiros recobrimentos, acrílico, poliéster e poliuretano, e também no esmalte cerâmico apresentaram perfis semelhantes entre si, enquanto que o perfil apresentado pelo silicone assemelha-se ao perfil apresentado pelas superfícies sem recobrimento.

É também evidente nos dados apresentados nos gráficos anteriores que o recobrimento em silicone aumentou a rugosidade superficial em relação ao substrato, fato verificado em todos os parâmetros. Essa diferença, entretanto, não é significativa, visto que os valores estão na mesma ordem de grandeza. A rugosidade média Ra da superfície dos corpos de prova sem revestimento, com valor médio de 1,45 μm , assumiu valor médio de 2,50 μm para o recobrimento de silicone. Tal fato pode estar relacionado com a pequena espessura desse recobrimento, cuja superfície acompanharia o relevo da superfície do substrato, ou com a baixa dureza do material, ocasionando alterações no deslocamento da agulha do apalpador na camada desse polímero.

Os recobrimentos de acrílico, poliéster, poliuretano e também de esmalte cerâmico apresentaram valores muito próximos entre si em todos os parâmetros de rugosidade que foram medidos e também apresentaram perfis semelhantes. Isto significa que a rugosidade dessas superfícies não afetou de maneira distinta os ângulos de contato para esses recobrimentos. No caso do silicone, os valores de rugosidade apresentaram valores de uma ordem de grandeza maior do que os outros recobrimentos, porém com Rz = 19 μm .

Segundo a literatura citada (Exl e Kindersberger, 2005), para superfícies com Rz até aproximadamente 15 μm a 20 μm , os ângulos de contato se comportam de acordo com a

teoria, isto é, ângulos de contato maiores do que 90° aumentam com o aumento da rugosidade, o que pode ter acontecido com o silicone e ângulos de contato menores do que 90° diminuem quando a rugosidade aumenta. Esse pode ter sido o caso dos recobrimentos de acrílico, poliéster e poliuretano, cuja aplicação sobre as superfícies dos substratos diminuiu a rugosidade e, portanto teria causado um incremento nos ângulos de contato. A alteração de rugosidade, portanto, teria potencializado uma variação nos ângulos de contato no mesmo sentido para todos os recobrimentos.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Em função da metodologia, ensaios experimentais e recursos empregados para análise dos recobrimentos testados, foi possível obter as seguintes conclusões:

1. Quanto à determinação quantitativa dos ângulos de contato, o maior valor foi apresentado pelo recobrimento de silicone, com valor médio superior em aproximadamente 35% aos outros recobrimentos poliméricos. Mesmo o pior desempenho entre os recobrimentos poliméricos, apresentado pelo poliuretano, foi bem superior ao apresentado pelo esmalte cerâmico. Todas as superfícies poliméricas apresentaram comportamento hidrofóbico, tomando como referência a literatura adotada e aumentaram muito esse comportamento em relação ao recobrimento em esmalte cerâmico, que apresentou comportamento hidrofílico.

2. No ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta verificou-se que o recobrimento em silicone novamente apresentou o melhor desempenho. Com relação a variação no ângulo de contato, o pior desempenho foi apresentado pelo recobrimento de poliéster, enquanto que o recobrimento de esmalte cerâmico apresentou aumento da molhabilidade. Conforme o critério adotado para definir superfícies hidrofóbicas, os recobrimentos de poliéster e poliuretano já poderiam ser excluídos desse comportamento. Apesar de apenas o recobrimento de acrílico ter apresentado variação significativa de coloração durante o ensaio, uma análise microscópica das superfícies, indicou que todos os recobrimentos poliméricos apresentaram alterações, notadamente o acrílico, motivadas provavelmente por degradação fotooxidativa.

3. Com relação ao ensaio de simulação de intempérie, verificou-se que o silicone apresentou o melhor desempenho frente à ação da atmosfera salina, com o ângulo de contato sendo reduzido em apenas 3%. O pior desempenho foi apresentado pelo poliuretano, enquanto que o

recobrimento de esmalte cerâmico tornou-se ainda mais hidrofílico. Os recobrimentos não apresentaram alterações visuais significativas, mesmo em uma análise por meio de microscopia óptica.

4. No ensaio de erosão, as peças com recobrimento de esmalte cerâmico apresentaram o pior desempenho com relação a perda de massa, sendo seguidas pelas peças com recobrimentos de acrílico e silicone e os recobrimento em poliuretano e poliéster não apresentaram variação significativa de massa. Quanto a variação no comportamento hidrofóbico, o recobrimento de silicone mostrou o pior desempenho, com o ângulo de contato diminuindo 32% ao final do ensaio, porém ainda mantendo comportamento hidrofóbico. Esse decréscimo foi seguido pelos outros recobrimentos poliméricos. Por outro lado, o ângulo de contato das superfícies com recobrimento de esmalte cerâmico apresentou ligeiro aumento.

5. As fotomicrografias das superfícies em corte transversal, permitiram avaliar as espessuras das camadas dos recobrimentos sobre os substratos. O recobrimento em silicone apresentou a camada mais fina, sendo seguido pelos recobrimentos em acrílico, poliuretano e poliéster. O esmalte cerâmico apresentou a camada de maior espessura.

6. A aplicação dos recobrimentos diminuiu a rugosidade em relação aos substratos, exceto para o silicone, que fez aumentar os valores em todos os parâmetros de rugosidade que foram medidos. No entanto, todos os recobrimentos apresentaram valores de Rz inferiores a 20 μm , o que, segundo a literatura (Exl e Kindersberger, 2005), poderia ter promovido aumentos nos ângulos de contato em todos os recobrimentos.

Analisando todos os resultados em conjunto, o recobrimento de silicone apresentou o maior comportamento hidrofóbico e também manteve esse comportamento com desempenho bem superior aos demais recobrimentos frente aos ensaios de simulação de intempérie, como envelhecimento por radiação ultravioleta e névoa salina. Também apresentou bom desempenho quanto a perda de massa no ensaio de erosão exceto na variação do ângulo de contato, onde, ainda assim conservou o comportamento em repelir a água após o referido ensaio. Os outros recobrimentos poliméricos, apesar de não serem tão eficazes como o silicone, também manifestaram um desempenho bem superior ao esmalte cerâmico.

5.2 Sugestões

Como sugestões para trabalhos futuros apresentam-se algumas situações que também poderiam ser analisadas:

- Estudar o mecanismo segundo o qual a radiação ultravioleta afeta a molhabilidade das superfícies poliméricas.
- Tendo em vista que o melhor desempenho foi apresentado pelo silicone, sugere-se fazer um estudo com recobrimentos de diversos tipos deste polímero, investigando o seu comportamento hidrofóbico quando aplicado sobre substratos com diferentes rugosidades e porosidades.
- Investigar a resistência dos recobrimentos poliméricos frente à erosão elétrica, um processo de desgaste que ocorre através de pequenas descargas sobre a superfície.
- Investigar a ação do ozônio gerado pelos arcos elétricos, um agente oxidante e causador de corrosão elétrica nos isoladores, sobre os recobrimentos poliméricos.
- Investigar quantitativamente a relação entre a rugosidade dos recobrimentos e os ângulos de contato entre uma gota de água e a superfície de um sólido.
- Avaliar as alterações no comportamento hidrofóbico dos materiais em ensaios mais longos de névoa salina.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELAZIZ, E.O.; JAVORONKOV, M.; ABDELAZIZ, C.; FETHI, G.; ZOHRA, B. **Prevention of the interruptions due to the phenomena of the electric insulators pollution**, IEEE, (2004) 493497.

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.

American Society for Testing and Materials - **ASTM G - 53 Operating Light - and Water-Exposure Apparatus (Fluorescent UV- Condensation Type) for Exposure of Nonmetallic Materials**. Philadelphia (EUA), 1991.

ANEEL – **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>, acessado em maio 2005.

Associação Brasileira de Cerâmica. **Anuário Brasileiro de Cerâmica - 2003**. São Paulo: ABC, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 8094 – Corrosão por exposição à névoa salina**. Rio de Janeiro, 1983.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering. An introduction**. John Wiley e Sons: USA, 1994.

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

CANEVAROLO Jr., S. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber editora, 2003.

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

CASTELLAN, G. **Fundamentos de físico-química**. Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Ltda, 1986. Cap. 18, 16 p.

CTEEP - **Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista**. Disponível em http://www.cteep.com.br/setor_sistemas_linhas.shtml. Acessado em 05/07/2006.

D'AJUZ, A. et al. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamentos**. Ed. Da U.F. Fluminense: RJ, 1987.

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

FAZANO, C. A. T. V. **Tintas: métodos de controle de pinturas e superfícies**. São Paulo: Hemus. 2002.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas e Vernizes: ciência e tecnologia**. São Paulo: Abrafati, 1993, vol.2.

FONTANA, L.C., **Triodo-Magnetron Sputtering** -Tese de Doutorado, UFSC, 1997.

GOMES, M.L.; RODRIGUES, A.J. **Aisladores**. Disponível em <http://www.iespana.es/peasodeproyecto/aisladores.jtm>. Acessado em 15/05/2005

GUBANSKI, S. M, VLASTOS, A. E. **Wettability of naturally aged silicone and EPDM composite insulators**. IEEE Transactions on Power Delivery, v.5, n.3, July 1990.

HARPER, C. A. **Handbook of materials for product design**. New York: McGraw-Hill, 2001. 3 ed.

INONE, P. C.; PIAZZA, F.; TOMIOKA, J.; SALES, J. M. M. **Caracterização de Isoladores Poliméricos Envelhecidos Artificialmente**. Instituto de tecnologia para o desenvolvimento (lactec) e Companhia energética de Ceará (coelce). 2003.

KEMMITT, T., AL-SALIM, N. I., WATERLAND, M., KENNEDY, V. J., MARKWITZ, A. **Photocatalytic Titania Coatings, Current Applied Physics**, v. 4, p. 189-192, 2004.

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.

MAIA, S. B. **O Vidro e sua Fabricação.** Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia.** São Paulo: E. Blücher, 1991.

MELLO, D. R. de; COSTA Jr, R. T. D.; BATISTA, J. T.; MELO, M. E. **Avaliação do Grau de Poluição em Instalações de Transmissão, Subestações e Distribuição.** Relatório Técnico Cepel, 1999.

MELONI, A. E. M. et al. **Análise técnico-econômica da utilização de isoladores compostos, de porcelana ou de vidro em linhas de transmissão de energia elétrica.** Grupo de estudos de linhas de transmissão; SNPTEE Campinas – SP, 2001.

MILLS, A. et al. **Characterisation of the photocatalyst Pilkington Activ™: a reference film photocatalyst.** Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, v. 160, p. 213-224, 2003.

MONTOYA, G.; RAMIREZ, I.; MONTOYA, J. L.. **Measuring pollution level generated on electrical insulators after a strong storm, electric power systems research,** v. 71, p. 267-273, 2004.

NIGRI, A. I., **Desempenho de Linhas de Transmissão. Ponto de Vista da Manutenção.** XV-SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 1999.

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

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

OLIVEIRA, A. P. N. de. **Notas de aula da disciplina Vidro e Vitrocerâmicos.** 2004. EMC/CTC/UFSC.

ROSA, L. C. **Acabamento de Superfícies - rugosidade superficial** UNESP – Universidade Estadual Paulista - Unidade Diferenciada de Sorocaba/Iperó-SP. Disponível em http://www.sorocaba.unesp.br/professor/luizrosa/index_arquivos/pdf. Acesso em 20/10/2006.

SANTOS, S. F. **Análise de filmes poliméricos densos de AcC/PHAmcl por técnicas de DSC, DMA, XPS, Ângulo de Contato e AFM.** Dissertação. Mestrado em Física, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005

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

SCHMIDT, W. **Materiais Elétricos.** 2. ed. Revista. São Paulo: Edgard Blücher: 1979, v.2: Isolantes e Magnéticos.

SHEWMON P.; SUNDARAJAN G.S. **The Erosion of Metals.** Ann. Rev. Mater. Sci., 13,301(1983).

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

SILVA, R. A.; REZENDE, M. C.. **Erosão em compósitos à base de fibras de vidro/kevlar e resina epóxi de uso aeronáutico.** Polímeros, São Carlos, v. 13, n.1, 2003.

SANCHEZ, E. M. S.; FERREIRA, M. M. C.; FELISBERTI, M. I. **Thermal degradation and Photo-oxidation of the ABS used for automotive applications.** Polímeros. São Carlos, v. 9, n. 4, 1999.

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

VALCARCE, M. B.; BUSALMEN, J. P.; SÁNCHEZ, S. R. (2002) **The influence of the surface condition of the adhesion of Pseudomonas fluorescens (ATCC 17552) to copper and aluminium brass.** International. Biodeterioration and Biodegradation. 50, 61-66.

VIEIRA, D. do C. **Fabricação de elementos vítreos porosos para o depósito de polímeros visando à obtenção de membranas com superfícies ativas.** 2002. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - USP, São Paulo, 2002

VAN OSS, C. J.; GIESE, R. F. (1995) **The hydrophilicity and hydrophobicity of clay minerals.** Clay minerals. 43, 474-477

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologias e aplicações**. São Paulo: Artliber, 2005.

ANEXOS

Tabela A.1 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de acrílico antes dos ensaios

Acrílico	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 1	91,1	89,3	90,2
Medida 2	89,7	88,7	89,2
Medida 3	87,0	88,0	87,5
Medida 4	87,7	86,1	86,9
Medida 5	88,9	89,2	89,1
Medida 6	83,7	83,0	83,4
Medida 7	81,6	81,4	81,5
Medida 8	83,9	84,1	84,0
Medida 9	80,5	80,5	80,5
Medida 10	80,7	80,6	80,7
Medida 11	90,7	89,7	90,2
Medida 12	91,7	91,2	91,5
Média			86,2
Desvio Padrão			4,0

Tabela A.2 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliéster antes dos ensaios.

Poliéster	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 01	78,8	78,4	78,6
Medida 02	78,4	78,1	78,3
Medida 03	76,6	77,7	77,2
Medida 04	75,6	76,1	75,9
Medida 05	81,1	81,4	81,3
Medida 06	92,4	92,1	92,3
Medida 07	90,0	89,9	90,0
Medida 08	87,9	87,9	87,9
Medida 09	89,2	88,6	88,9
Medida 10	81,4	81,3	81,4
Medida 11	92,5	92,5	92,5
Medida 12	85,0	85,4	85,2
Medida 13	87,4	87,9	87,7
Média			84,4
Desvio Padrão			5,9

Tabela A.3 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliuretano antes dos ensaios.

Poliuretano	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 01	75,6	75,6	75,6
Medida 02	72,7	72,4	72,6
Medida 03	75,2	75,1	75,2
Medida 04	77,0	77,4	77,2
Medida 05	76,1	75,4	75,8
Medida 06	80,4	78,8	79,6
Medida 07	85,9	86,6	86,3
Medida 08	85,9	86,0	86,0
Medida 09	89,9	89,6	89,8
Medida 10	89,2	89,6	89,4
Medida 11	86,0	86,3	86,2
Medida 12	84,6	84,8	84,7
Média			81,5
Desvio Padrão			6,1

Tabela A.4 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de silicone antes dos ensaios

Silicone	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 1	102,8	103,0	102,9
Medida 2	114,2	113,6	113,9
Medida 3	114,9	114,7	114,8
Medida 4	119,0	118,8	118,9
Medida 5	114,4	114,2	114,3
Medida 6	113,4	113,2	113,3
Medida 7	118,7	119,0	118,9
Medida 8	118,1	117,9	118,0
Medida 9	120,0	119,8	119,9
Medida 10	117,3	118,0	117,7
Medida 11	117,1	116,7	116,9
Medida 12	120,2	120,5	120,4
Média			115,8
Desvio Padrão			4,7

Tabela A.5 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de esmalte antes dos ensaios.

Esmalte	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 1	59,4	59,3	59,4
Medida 2	39,6	44,2	41,9
Medida 3	55,9	52,9	54,4
Medida 4	47,2	48,1	47,7
Medida 5	54,1	55,1	54,6
Medida 6	56,1	54,6	55,4
Medida 7	33,1	32,8	33,0
Medida 8	44,3	42,5	43,4
Medida 9	36,2	33,2	34,7
Medida 10	36,9	37,0	37,0
Medida 11	45,2	44,9	45,1
Medida 12	44,6	46,2	45,4
Média			46,0
Desvio Padrão			8,6

Tabela A.6 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliuretano após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.

Poliuretano	Direito	Esquerdo	Média da medida
(PU02) Medida 01	66,7	65,6	66,2
Medida 02	68,4	67,7	68,1
Medida 03	69,3	68,8	69,1
Medida 04	68,4	67,6	68,0
Medida 05	70,7	70,9	70,8
Medida 06	65,9	64,1	65,0
(PU03) Medida 01	71,1	71,4	71,3
Medida 02	70,4	69,9	70,2
Medida 03	72,7	72,9	72,8
Medida 04	75,1	74,4	74,8
Medida 05	76,1	75,5	75,8
Medida 06	67,1	67,6	67,4
(PU07) Medida 01	69,2	68,7	69,0
Medida 02	66,6	66,2	66,4
Medida 03	69,7	69,4	69,6
Medida 04	68,4	67,3	67,9
Medida 05	62,0	61,9	62,0
Medida 06	71,2	71,1	71,2
Média			69,2
Desvio Padrão			3,4

Tabela A.7 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de esmalte cerâmico após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.

Esmalte	Direito	Esquerdo	Média da medida
(E2a) Medida 01	33,6	39,5	36,6
Medida 02	27,5	31,3	29,4
Medida 03	27,7	28,1	27,9
Medida 04	35,1	33,4	34,3
Medida 05	23,5	23,5	23,5
Medida 06	23,2	23,2	23,2
(E1b) Medida 01	36,4	36,0	36,2
Medida 02	34,1	32,7	33,4
Medida 03	33,9	34,1	34,0
Medida 04	39,4	40,6	40,0
Medida 05	30,8	29,4	30,1
Medida 06	34,1	34,2	34,2
(E3b) Medida 01	32,3	30,7	31,5
Medida 02	36,8	36,1	36,5
Medida 03	34,8	34,1	34,5
Medida 04	31,5	29,6	30,6
Medida 05	33,1	32,9	33,0
Medida 06	30,7	34,0	32,4
Média			32,3
Desvio Padrão			4,4

Tabela A.8 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de silicone após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.

Silicone	Direito	Esquerdo	Média da medida
(S02) Medida 01	121,7	121,5	121,6
Medida 02	125,0	123,8	124,4
Medida 03	115,5	116,3	115,9
Medida 04	117,6	118,1	117,9
Medida 05	116,0	116,4	116,2
Medida 06	118,3	118,0	118,2
(S04) Medida 01	121,6	121,4	121,5
Medida 02	118,7	118,5	118,6
Medida 03	109,6	109,7	109,7
Medida 04	100,4	101,8	101,1
Medida 05	102,7	102,5	102,6
Medida 06	102,6	103,1	102,9
(S03) Medida 01	108,8	108,4	108,6
Medida 02	103,0	102,6	102,8
Medida 03	108,1	107,8	108,0
Medida 04	105,3	105,8	105,6
Medida 05	107,8	109,1	108,5
Medida 06	108,2	108,0	108,1
Média			111,8
Desvio Padrão			7,5

Tabela A.9 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de acrílico após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.

Acrílico	Direito	Esquerdo	Média da medida
(A14) Medida 01	78,1	77,4	77,8
Medida 02	80,1	79,7	79,9
Medida 03	75,5	74,6	75,1
Medida 04	80,6	81,1	80,9
Medida 05	77,7	77,6	77,7
Medida 06	66,4	68,0	67,2
(A08) Medida 01	90,5	89,5	90,0
Medida 02	88,0	87,7	87,9
Medida 03	88,1	90,6	89,4
Medida 04	90,6	88,9	89,8
Medida 05	96,1	96,2	96,2
Medida 06	88,9	89,1	89,0
(A06) Medida 01	54,0	55,1	54,6
Medida 02	54,9	55,2	55,1
Medida 03	53,1	54,6	53,9
Medida 04	56,6	57,8	57,2
Medida 05	58,8	58,6	58,7
Medida 06	62,0	62,0	62,0
Média			74,5
Desvio Padrão			14,6

Tabela A.10 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliéster após 15 dias na câmara de envelhecimento acelerado.

Poliéster	Direito	Esquerdo	Média da medida
(P08a) Medida 01	76,8	77,1	77,0
Medida 02	77,9	76,6	77,3
Medida 03	74,3	74,6	74,5
Medida 04	78,9	78,0	78,5
Medida 05	67,5	68,0	67,8
Medida 06	73,7	71,9	72,8
(P12a) Medida 01	81,5	79,0	80,3
Medida 02	76,8	74,4	75,6
Medida 03	74,8	76,0	75,4
Medida 04	74,9	76,2	75,6
Medida 05	74,1	73,0	73,6
Medida 06	81,6	81,3	81,5
(P09a) Medida 01	76,4	75,7	76,1
Medida 02	78,2	77,7	78,0
Medida 03	76,3	73,9	75,1
Medida 04	79,9	80,1	80,0
Medida 05	81,3	81,3	81,3
Medida 06	76,3	76,9	76,6
Média			76,5
Desvio Padrão			3,3

Tabela A.11 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliuretano após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.

Poliuretano	Direito	Esquerdo	Média da medida
(PU02) Medida 01	59,0	57,0	58,0
Medida 02	57,5	58,7	58,1
Medida 03	56,5	57,5	57,0
Medida 04	56,1	57,2	56,7
Medida 05	53,6	54,7	54,2
Medida 06	59,9	59,0	59,5
(PU03) Medida 01	40,3	41,8	41,1
Medida 02	52,9	53,6	53,3
Medida 03	38,3	36,3	37,3
Medida 04	56,5	56,3	56,4
Medida 05	53,7	52,6	53,2
Medida 06	52,9	53,0	53,0
(PU07) Medida 01	49,2	48,0	48,6
Medida 02	55,7	55,3	55,5
Medida 03	55,1	58,9	57,0
Medida 04	60,1	60,5	60,3
Medida 05	53,9	49,8	51,9
Medida 06	51,6	52,3	52,0
Média			53,5
Desvio Padrão			6,0

Tabela A.12 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de esmalte após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.

Esmalte	Direito	Esquerdo	Média da medida
(E2a) Medida 01	36,2	36,0	36,1
Medida 02	41,4	35,5	38,5
Medida 03	37,1	39,0	38,1
Medida 04	32,3	36,7	34,5
Medida 05	32,4	31,4	31,9
Medida 06	35,3	36,5	35,9
(E1b) Medida 01	32,3	34,8	33,6
Medida 02	36,4	31,5	34,0
Medida 03	36,7	35,3	36,0
Medida 04	42,6	42,5	42,6
Medida 05	35,1	36,2	35,7
Medida 06	35,5	37,7	36,6
(E3b) Medida 01	29,1	30,4	29,8
Medida 02	28,4	28,3	28,4
Medida 03	33,5	34,1	33,8
Medida 04	36,4	30,6	33,5
Medida 05	32,4	30,3	31,4
Medida 06	26,5	29,6	28,1
Média			34,3
Desvio Padrão			3,6

Tabela A.13 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de silicone após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.

Silicone	Direito	Esquerdo	Média da medida
(S02) Medida 01	117,2	117,7	117,5
Medida 02	119,4	119,7	119,6
Medida 03	122,8	123,1	123,0
Medida 04	118,9	119,0	119,0
Medida 05	113,8	114,2	114,0
Medida 06	119,4	119,7	119,6
(S04) Medida 01	109,9	109,9	109,9
Medida 02	113,2	113,7	113,5
Medida 03	112,7	113,0	112,9
Medida 04	113,3	113,4	113,4
Medida 05	115,7	115,3	115,5
Medida 06	114,8	115,2	115,0
(S03) Medida 01	114,8	114,8	114,8
Medida 02	118,1	118,1	118,1
Medida 03	120,3	120,4	120,4
Medida 04	117,2	117,8	117,5
Medida 05	119,0	119,4	119,2
Medida 06	119,5	120,3	119,9
Média			116,8
Desvio Padrão			3,4

Tabela A.14 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de acrílico após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV.

Acrílico	Direito	Esquerdo	Média da medida
(A14) Medida 01	67,0	70,0	68,5
Medida 02	72,5	70,7	71,6
Medida 03	64,2	64,6	64,4
Medida 04	63,1	60,5	61,8
Medida 05	68,0	67,1	67,6
Medida 06	73,5	73,1	73,3
(A08) Medida 01	60,3	58,8	59,6
Medida 02	68,4	67,7	68,1
Medida 03	64,1	60,9	62,5
Medida 04	62,2	62,9	62,6
Medida 05	70,6	70,4	70,5
Medida 06	59,4	63,2	61,3
(A06) Medida 01	70,4	69,7	70,1
Medida 02	65,5	66,9	66,2
Medida 03	59,8	61,5	60,7
Medida 04	64,6	64,3	64,5
Medida 05	61,7	60,9	61,3
Medida 06	71,0	68,5	69,8
Média			65,8
Desvio Padrão			4,3

Tabela A.15 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliéster após 30 dias na câmara de envelhecimento acelerado

Poliéster	Direito	Esquerdo	Média da medida
(P08a) Medida 01	47,9	46,8	47,4
Medida 02	56,2	57,7	57,0
Medida 03	57,2	58,4	57,8
Medida 04	55,4	54,7	55,1
Medida 05	52,7	52,5	52,6
Medida 06	60,7	56,0	58,4
(P12a) Medida 01	46,0	45,7	45,9
Medida 02	51,0	50,9	51,0
Medida 03	50,1	49,5	49,8
Medida 04	51,3	52,1	51,7
Medida 05	46,2	47,9	47,1
Medida 06	47,3	46,6	47,0
(P09a) Medida 01	52,8	53,0	52,9
Medida 02	48,4	47,3	47,9
Medida 03	48,2	48,6	48,4
Medida 04	47,6	48,7	48,2
Medida 05	56,3	53,8	55,1
Medida 06	54,9	54,6	54,8
Média			51,5
Desvio Padrão			4,1

Tabela A.16 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de silicone após o ensaio de névoa salina.

Silicone	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 01	107,5	107,1	107,3
Medida 02	110,4	109,2	109,8
Medida 03	104,7	105,0	104,9
Medida 04	105,6	105,1	105,4
Medida 05	108,9	109,5	109,2
Medida 06	120,3	120,2	120,3
Medida 07	121,1	121,4	121,3
Medida 08	117,6	117,7	117,7
Medida 09	120,9	120,8	120,9
Medida 10	113,2	113,3	113,3
Média			113,0
Desvio Padrão			6,6

Tabela A.17 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de acrílico após o ensaio de névoa salina.

Acrílico	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 01	87,7	87,7	87,7
Medida 02	89,1	88,5	88,8
Medida 03	87,3	87,1	87,2
Medida 04	86,0	86,0	86,0
Medida 05	89,1	89,2	89,2
Medida 06	80,0	79,7	79,9
Medida 07	71,6	71,9	71,8
Medida 08	77,0	76,7	76,9
Medida 09	79,9	78,4	79,2
Medida 10	71,2	71,6	71,4
Média			81,8
Desvio Padrão			6,9

Tabela A.18 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliuretano após o ensaio de névoa salina.

Poliuretano	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 01	73,8	74,2	74,0
Medida 02	71,2	71,0	71,1
Medida 03	75,3	75,1	75,2
Medida 04	78,1	77,1	77,6
Medida 05	75,2	74,8	75,0
Medida 06	69,4	69,7	69,6
Medida 07	67,0	67,0	67,0
Medida 08	69,5	68,9	69,2
Medida 09	67,5	67,8	67,7
Medida 10	66,0	65,6	65,8
Média			71,2
Desvio Padrão			4,0

Tabela A.19 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de poliéster após o ensaio de névoa salina.

Poliéster	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 01	80,6	80,4	80,5
Medida 02	75,8	76,1	76,0
Medida 03	71,6	71,3	71,5
Medida 04	70,0	69,4	69,7
Medida 05	80,1	79,5	79,8
Medida 06	75,2	74,1	74,7
Medida 07	72,8	71,6	72,2
Medida 08	75,8	75,0	75,4
Medida 09	72,8	72,7	72,8
Medida 10	69,5	70,3	69,9
Média			74,2
Desvio Padrão			3,8

Tabela A.20 – Medidas do ângulo de contato (em graus) para o revestimento de esmalte cerâmico após o ensaio de névoa salina.

Esmalte	Direito	Esquerdo	Média da medida
Medida 01	40,1	44,5	42,3
Medida 02	42,4	45,6	44,0
Medida 03	48,2	49,5	48,9
Medida 04	34,3	34,3	34,3
Medida 05	37,7	34,0	35,9
Medida 06	40,5	39,6	40,1
Medida 07	46,7	47,4	47,1
Medida 08	39,8	36,9	38,4
Medida 09	33,5	35,4	34,5
Medida 10	39,6	36,6	38,1
Medida 11	36,1	31,7	33,9
Medida 12	43,9	43,9	43,9
Média			40,1
Desvio Padrão			5,1

Tabela A.21 – Variação de massa (em gramas) dos corpos de prova com recobrimento de acrílico durante o ensaio de erosão.

Amostra	Inicial	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s
A03R	0,000	-0,016	-0,029	-0,061	-0,089	-0,122	-0,143
A06R	0,000	-0,037	-0,060	-0,095	-0,100	-0,128	-0,160
A05R	0,000	-0,019	-0,033	-0,042	-0,050	-0,062	-0,074
Média	0,000	-0,024	-0,041	-0,066	-0,080	-0,104	-0,126
Desvio Padrão	0,000	0,011	0,017	0,027	0,026	0,036	0,046

Tabela A.22 – Variação de massa (em gramas) dos corpos de prova com recobrimento de silicone durante o ensaio de erosão.

Amostra	Inicial	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s
SR1	0,000	0,013	-0,003	-0,009	-0,023	-0,033	-0,042
S12	0,000	-0,004	-0,005	-0,006	-0,011	-0,011	-0,016
S11	0,000	-0,054	-0,217	-0,476	-0,713	-0,815	-0,843
Média	0,000	0,005	-0,004	-0,008	-0,017	-0,022	-0,029
Desvio Padrão	0,000	0,012	0,001	0,002	0,008	0,016	0,018

Tabela A.23 – Variação de massa (em gramas) dos corpos de prova com recobrimento de poliéster durante o ensaio de erosão.

Amostra	Inicial	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s
P01	0,000	0,005	0,005	0,007	0,008	0,007	0,007
P02	0,000	0,003	0,005	0,002	0,007	0,008	0,007
P06	0,000	0,009	0,009	0,009	0,013	0,012	0,013
Média	0,000	0,006	0,006	0,006	0,009	0,009	0,009
Desvio Padrão	0,000	0,003	0,002	0,004	0,003	0,003	0,003

Tabela A.24 – Variação de massa (em gramas) dos corpos de prova com recobrimento de poliuretano durante o ensaio de erosão.

Amostra	Inicial	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s
PU09	0,000	0,002	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001
PU11	0,000	-0,011	-0,020	-0,059			
PU10	0,000	0,002	-0,025	-0,049			
Média	0,000	0,002	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001
Desvio Padrão							

Tabela A.25 – Variação de massa dos corpos de prova com recobrimento de esmalte cerâmico durante o ensaio de erosão.

Amostra	Inicial	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s
E01	0,000	0,002	-0,011	-0,018	-0,025	-0,03	-0,034
E02	0,000	-0,041	-0,074	-0,113	-0,145	-0,184	-0,192
E03	0,000	-0,040	-0,067	-0,114	-0,158	-0,181	-0,196
Média	0,000	-0,026	-0,051	-0,082	-0,109	-0,132	-0,141
Desvio Padrão	0,000	0,025	0,035	0,055	0,073	0,088	0,092

Tabela A.26 - Ângulos de contato (em graus) depois do ensaio de erosão.

	Acrílico	Esmalte	Poliéster	Poliuretano	Silicone
Medida 1	98,1	53,5	59,7	59,7	80,3
Medida 2	98,8	55,0	62,7	62,7	51,1
Medida 3	98,1	53,3	59,5	59,5	60,1
Medida 4	102,6	52,5	64,0	64,8	63,8
Medida 5	39,3	52,4	68,2	68,2	58,9
Medida 6	46,1	50,5	52,9	95,8	123,0
Medida 7	49,6	51,2	62,6	90,1	124,4
Medida 8	45,1	53,0	58,2	98,1	124,7
Medida 9	45,4	53,2	57,7	74,2	123,1
Medida 10	46,9	54,4	54,0	75,5	122,8
Medida 11	50,4	41,7	86,6	80,6	50,1
Medida 12		52,1	89,2	81,6	59,6
Medida 13		55,3	100,5	81,2	63,2
Medida 14		62,8	88,4		38,4
Medida 15		41,1	82,1		44,6
Média	65,5	52,1	69,8	76,3	79,2
Desvio Padrão	27,1	5,2	15,3	13,1	33,8

Tabela A.27 – Espessura das camadas (em μm)

Medida	Acrílico	Esmalte	Poliéster	Poliuretano	Silicone
1	17	136	117	32	15
2	17	124	107	36	12
3	18	143	103	34	15
4	16	137	104	38	14
5	18	136	115	40	13
6	28	154	138	40	14
7	30	159	127	40	15
8	17	160	143	37	13
9	20	164	137	38	12
10	30	164	144	35	15
11	11	149	127	38	14
12	23	139	110	36	12
13	19	146	110	34	
14	23	151	118	35	
15	19	143	102	33	
16	21	165	124	39	
17	25	164	133	39	
18	-	151	148	35	
19	-	168	123	37	
20	-	165	153	37	
Média(μm)	21	151	124	37	14
Desvio Padrão (μm)	5	13	16	2	1

Tabela A.28 – Medidas de Ra (em μm) para os diversos tipos de recobrimento.

Medida	Esmalte	Poliéster	Silicone	Poliuretano	Acrílico	Sem recobrimento
1	0,215	0,163	2,408	0,157	0,334	1,418
2	0,123	0,151	2,873	0,195	0,38	1,423
3	0,106	0,174	2,745	0,226	0,275	1,480
4	0,147	0,153	2,886	0,198	0,300	1,459
5	0,123	0,122	2,581	0,237	0,346	1,342
6	0,287	0,094	2,106	0,219	0,310	1,607
7	0,111	0,087	2,529	0,186	0,334	1,222
8	0,119	0,094	2,283	0,443	0,468	1,129
9	0,105	0,136	2,263	0,225	0,281	1,915
10	0,143	0,216	2,367	0,241	0,355	1,483

Tabela A.29 – Valores médios de Ra (em μm).

Ra (μm)	Acrílico	Poliéster	Poliuretano	Silicone	Esmalte	Sem recobrimento
X	0,34	0,14	0,23	2,50	0,15	1,45
S	0,06	0,04	0,08	0,27	0,08	0,21
Max	0,47	0,22	0,44	2,89	0,29	1,92
Min	0,28	0,09	0,18	2,11	0,11	1,13
Max-Min	0,19	0,13	0,27	0,78	0,18	0,79

Tabela A.30 – Valores médios de Rq (em μm).

Rq (μm)	Acrílico	Poliéster	Poliuretano	Silicone	Esmalte	Sem recobrimento
X	0,47	0,20	0,32	3,22	0,21	1,93
S	0,12	0,08	0,20	0,32	0,13	0,34
Max	0,71	0,37	0,88	3,81	0,44	2,73
Min	0,35	0,11	0,21	2,89	0,13	1,44
Max-Min	0,37	0,26	0,67	0,92	0,31	1,28

Tabela A.31 – Valores médios de Rz (em μm).

Rz (μm)	Acrílico	Poliéster	Poliuretano	Silicone	Esmalte	Sem recobrimento
X	2,0	0,8	1,2	18,7	0,7	11,3
S	0,4	0,3	0,5	2,9	0,3	2,3
Max	2,6	1,4	2,5	24,6	1,3	16,4
Min	1,5	0,5	0,8	16,2	0,5	8,9
Max-Min	1,1	0,9	1,7	8,4	0,8	7,6

Tabela A.32 – Valores médios de Rmax (em μm).

Rmax (μm)	Acrílico	Poliéster	Poliuretano	Silicone	Esmalte	Sem recobrimento
X	3,3	1,4	2,1	26,0	1,4	15,7
S	1,4	0,8	2,1	12,7	1,2	3,7
Max	6,0	3,3	7,8	60,5	3,5	22,4
Min	1,8	0,6	0,9	19,4	0,7	10,4
Max-Min	4,1	2,7	6,9	41,1	2,8	12,1