

Recobrimentos poliméricos hidrofóbicos sobre isoladores elétricos de porcelana

Fontanella, C.A.^I; Oliveira, A.P.N.de^{II}; Hotza, D.^{II}

^I Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET/SC), 88020-300 Florianópolis, SC

e-mail: cafontanella@gmail.com

^{II} Departamentos de Engenharia Mecânica (EMC) e Engenharia Química (ENQ), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 88040-900 Florianópolis, SC

e-mails: pedro@emc.ufsc.br, hotza@enq.ufsc.br

RESUMO

Recobrimentos poliméricos de acrílico, poliéster, poliuretano e silicone foram aplicados sobre substratos porcelânicos, usados como isoladores elétricos. Os recobrimentos foram aplicados em forma de resina líquida por meio de uma pistola ou por deposição na forma de pó. Medidas de ângulo de contato entre as superfícies e uma gota de 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, alterações microscópicas nas superfícies e rugosidades foram também determinadas. Os resultados mostraram que o recobrimento com silicone apresentou ângulo de contato ~116° ou 35% superior aos outros recobrimentos poliméricos. Após os ensaios de degradação superficial houve decréscimo nos ângulos de contato mantendo-se, no entanto, o comportamento hidrofóbico para todos os recobrimentos poliméricos.

Palavras-chaves: recobrimentos, polímeros, porcelana, superfície, isoladores elétricos.

Hydrophobic polymeric coatings on porcelain electrical insulators

ABSTRACT

Polymeric coatings of acrylic, polyester, polyurethane and silicone were applied on porcelain substrates used as electrical insulators. The coatings were applied as a liquid resin by spraying or as a powder by surface deposition. Contact angle measurements between the surfaces and a water drop were taken with a goniometer in order to characterize the coating hydrophobic behavior. The samples were submitted to tests simulating degradation by saline fog, UV radiation accelerated aging and erosion. Layer thicknesses, surface microscopic alterations as well as surface roughness were also determined. Results showed that silicone coatings presented contact angles ~116° or 35% higher than those of other polymeric coatings. After surface degradation tests, there was a decrease in contact angles, however, the hydrophobic behavior was retained for all polymeric coatings.

Keywords: coatings, polymers, porcelain, surface, electrical insulators.

1 INTRODUÇÃO

Um das causas de 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 reduzindo 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 a base de porcelana com o recobrimento de uma camada fina e contínua de esmalte vítreo, que contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e elétricas [1, 2]. Esses isoladores cerâmicos apresentam um bom desempenho na transmissão de energia elétrica em grandes distâncias porque a porcelana apresenta propriedades adequadas, é um excelente dielétrico e tem boa resistência superficial às intempéries. São inertes e estáveis, podendo suportar considerável quantidade de arcos elétricos sem degradação que comprometa a superfície por causa da capacidade de suportar descargas.

Um inconveniente desses isoladores é o fato de as suas superfícies serem constituídas de óxidos metálicos que possuem alta energia ou alta molhabilidade. Essa característica pode ocasionar a formação de película de água que, se for contínua por toda a altura do isolador, é capaz de conduzir corrente e fechar um arco (fenômeno conhecido como *flashover*). Em decorrência disso, pode haver a interrupção da passagem de energia elétrica pela rede. Esse problema que 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 *flashover*.

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. [3, 4]

Nos EUA são utilizados isoladores poliméricos para alta tensão há trinta anos [5] 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 [6]. A finalidade é melhorar o desempenho elétrico na superfície em presença de poluição e maresia. Esta prática alia a resistência mecânica e dielétrica da cerâmica à hidrofobicidade do filme polimérico que repele a água e tem baixa aderência de impurezas. Nos isoladores, a película hidrofóbica cria um filme protetor sobre os isoladores cerâmicos, não deixando a água formar um caminho contínuo para a corrente de fuga. Desta maneira, os polímeros sobre a cerâmica retardam o aparecimento da corrente de fuga e uma conseqüente descarga disruptiva. 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. [7]

No âmbito deste trabalho, foram caracterizados recobrimentos que podem vir a ser aplicados sobre as superfícies de isoladores elétricos, visando a torná-las hidrofóbicas e evitar conseqüentemente o acúmulo de sais e poluentes que podem desencadear descargas disruptivas. Para tanto, substratos cerâmicos de porcelana foram recobertos com cinco tipos de filmes poliméricos, e posteriormente submetidos à avaliação de desempenho em condições simuladas de operação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Substrato

Os substratos cerâmicos foram feitos na empresa Porcelanas Industriais Germer, em Timbó, SC, a partir de uma massa padrão de porcelana elétrica. 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. Os discos foram inicialmente secados ao ar durante 24 h e depois secados por 6 h em estufa. A queima foi feita em forno câmara, na empresa Germer a 1260°C por 36 h. 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.

2.1.2 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 h.

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.

- Tinta poliéster em pó (Politherm 464A-7602 46WF, 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 2180C durante 17 minutos. Para o tratamento térmico utilizou-se uma estufa (Fanem, 320-SE) com circulação mecânica e a temperatura foi monitorada com um termopar (Minipa, MA-128).

- 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 a temperatura ambiente.

- Silicone (Bota Top SS, hidrofugante à base de silano/siloxano, Botament). 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. A cura ocorreu à temperatura ambiente.

- Poliuretano (tinta marítima de poliuretano bicomponente em sistema aromático e alifático, Plastimper). 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 em apenas uma demão, por meio de uma pistola e a cura ocorreu à temperatura ambiente.

2.2 Análises e Ensaios

2.2.1 Microscopia óptica

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 (Leica, DM 4000M), no Laboratório de Materiais (Labmat/EMC/UFSC). Foi utilizado o software 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.

2.2.2 Rugosidade das superfícies

Foram realizadas medidas usando um rugosímetro (Mahr, Perthometer S2 V2 O6), com apalpador mecânico de raio 3 μm com ponta de diamante, no EMC/UFSC. Foram realizadas 10 medidas no percurso de medição considerado para cada um dos seguintes parâmetros de rugosidade: média aritmética (R_a), desvio médio quadrático (R_q), média de rugosidades parciais (R_z) e maior valor das rugosidades parciais (R_{max}), em 3 corpos-de-prova para cada tipo de recobrimento segundo a norma ABNT NBR 6405 [8]. 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.

2.2.3 Ângulo de contato

As medidas de ângulo de contato foram efetuadas no Laboratório de Materiais Porosos e Propriedades Termodinâmicas (LMPT/EMC) da UFSC, 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 3 amostras de cada recobrimento, cuidadosamente limpas com etanol. Foram feitas 10 medidas para cada tipo de recobrimento, considerando um volume de 5,0 μL de água deionizada depositada sobre a superfície. As medidas foram efetuadas em pontos distintos das amostras. A taxa de deposição da água sobre a superfície foi de 0,50 $\mu\text{L/s}$. As medidas do ângulo formado entre uma gota de água e a superfície do recobrimento foram obtidas utilizando o Software Image Tool.

2.2.4 Envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta

O ensaio de envelhecimento acelerado de polímeros através de radiações UV foi realizado em um equipamento construído no Laboratório de Controle de Processos (LCP/ENQ) da UFSC, de acordo com orientações da literatura [9, 10]. A partir da emissão média de radiação UVA no interior da câmara foi feita uma estimativa teórica do fator de aceleração de envelhecimento (em torno de 14 vezes) que o equipamento proporciona em relação ao envelhecimento natural. [9]. Foram utilizados 3 corpos-de-prova de cada tipo de recobrimento. A câmara de envelhecimento foi mantida a 63 ± 2 °C, por 30 dias (720 h). 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.

2.2.5 Degradação por exposição à névoa salina

O ensaio foi realizado em uma câmara para ensaio de exposição à névoa salina (Equiplastia, EQ-40-SS-Super) segundo a norma ABNT NBR 8094 [11] no Laboratório de Automobilística do CEFET/SC. A aparelhagem 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. A zona de exposição da câmara de ensaio foi mantida a temperatura de 35°C. Foram utilizados 5 corpos-de-prova de cada tipo de recobrimento, pendurados no interior da câmara através de fios de nylon. A duração do ensaio foi de 31 dias (744 h) 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, 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.

2.2.6 Erosão por jateamento de areia

Para a realização dos ensaios de erosão foi projetado e construído um dispositivo, no Laboratório de Automobilística do CEFET/SC, adaptado em uma câmara de jato de areia para simular o processo de 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. As amostras foram inicialmente secadas em uma estufa (Famem, 320-SE) a 110°C por 2 h. 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, WS 2310) e mantida constante em 18 m/s. Foram utilizadas partículas de areia de tamanho médio de 105 µm, 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 s, até o tempo total de 180 s. Após o jateamento, os corpos-de-prova foram retirados do dispositivo, limpos com um leve jato de ar comprimido seco, inspecionados visualmente para verificar possíveis danos na superfície, pesados em uma balança (Marte, AL 500, com resolução 0,001 g), embalados em sacos plásticos e submetidos a uma análise microscópica da região atingida. Os corpos-de-prova foram analisados quanto à sua variação de massa e mediram-se novamente os ângulos de contato.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microscopia Óptica

A Figura 1 apresenta um comparativo das espessuras dos diversos recobrimentos. A Figura 2 apresenta micrografias com aumento de 100×, mostrando em corte transversal, os recobrimentos aplicados sobre os substratos.

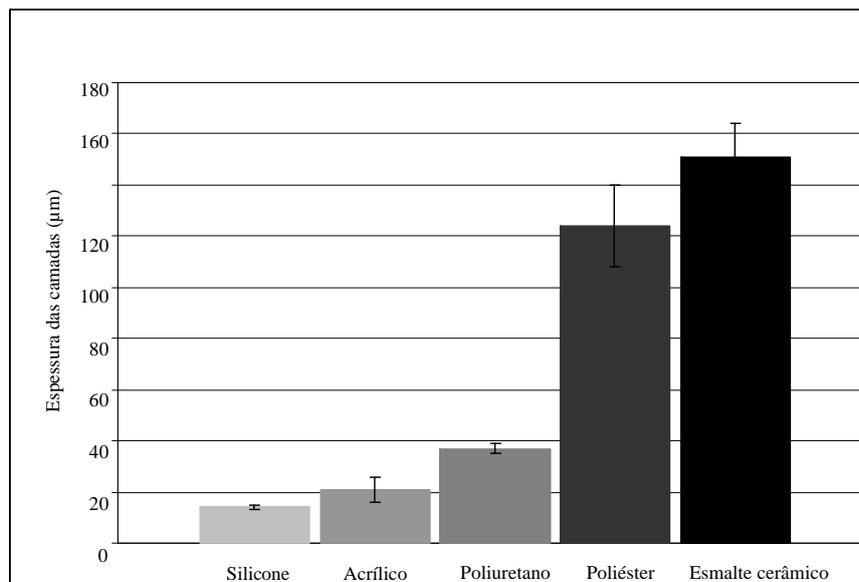


Figura 1: Espessura das camadas dos recobrimentos poliméricos. As barras de erro correspondem aos desvios-padrão.

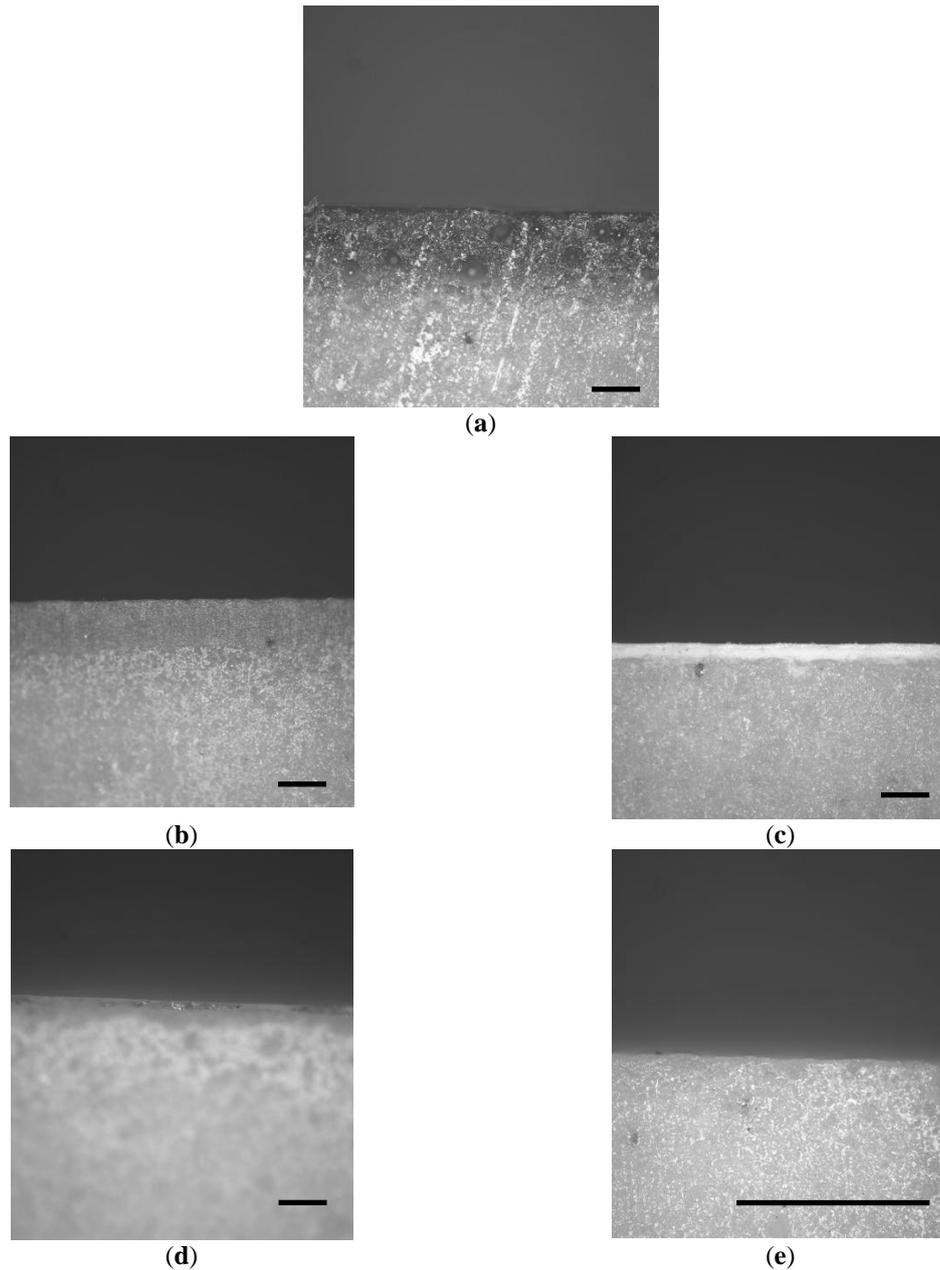


Figura 2: Micrografias (seção transversal) dos recobrimentos poliméricos: (a) esmalte cerâmico, (b) poliéster, (c) poliuretano, (d) resina acrílica, (e) silicone. Barra = 100 µm.

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. 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. Sugere-se investigar outra forma de aplicação, lembrando, porém, que o processo eletrostático não é viável em virtude de o substrato apresentar muito pouca condutividade elétrica, por ser constituído da cerâmica dos isoladores elétricos.

3.2 Rugosidade

A Tabela 1 mostra comparativamente os valores dos parâmetros R_a , R_q , R_z e R_{max} para os diversos recobrimentos e também para as superfícies dos substratos sem recobrimento.

Tabela 1: Valores médios de rugosidade (\pm desvio-padrão) para as superfícies dos recobrimentos.

Rugosidade (μm)	Acrílico	Esmalte	Poliéster	Poliuretano	Silicone	Sem recobrimento
R_a	$0,34 \pm 0,06$	$0,15 \pm 0,08$	$0,14 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,08$	$2,5 \pm 0,3$	$1,4 \pm 0,2$
R_q	$0,5 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$	$0,20 \pm 0,08$	$0,3 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,3$
R_z	$2,0 \pm 0,4$	$0,7 \pm 0,3$	$0,8 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,5$	19 ± 3	11 ± 2
R_{max}	3 ± 1	1 ± 1	$1,4 \pm 0,8$	$2,1 \pm 2,1$	30 ± 10	16 ± 4

Os recobrimentos de acrílico, poliéster e poliuretano apresentam valores muito próximos entre si em todos os parâmetros avaliados, R_a , R_q , R_z e R_{max} . 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. Tal fato pode estar relacionado com a baixa dureza do silicone, ocasionando alterações no deslocamento da agulha do apalpador na camada desse polímero.

3.3 Ângulo de Contato

A Tabela 2 apresenta os valores médios dos ângulos de contato entre os recobrimentos e uma gota de água, antes dos ensaios de degradação superficial. A Figura 3 apresenta os perfis das gotas de água sobre os diversos recobrimentos obtidos através do goniômetro.

Os ângulos a partir dos quais as superfícies são consideradas hidrofóbicas variam segundo diversos autores. Van Oss & Giese [12], Santos [13] e Valcarce et al. [14] consideram hidrofóbicas superfícies com ângulos de contato $\theta > 50^\circ$, 60° ou 65° , respectivamente. 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 os 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 polímeros aqui investigados. O melhor desempenho do recobrimento de silicone em relação aos outros recobrimentos é evidenciado nas imagens das gotas apresentadas na Figura 3.

Tabela 2: Valores médios dos ângulos de contato (\pm desvio-padrão) antes dos ensaios de degradação superficial.

Recobrimento	Ângulo de contato (em graus)
Esmalte cerâmico	46 ± 9
Poliéster	84 ± 6
Poliuretano	82 ± 6
Resina acrílica	86 ± 4
Silicone	116 ± 5

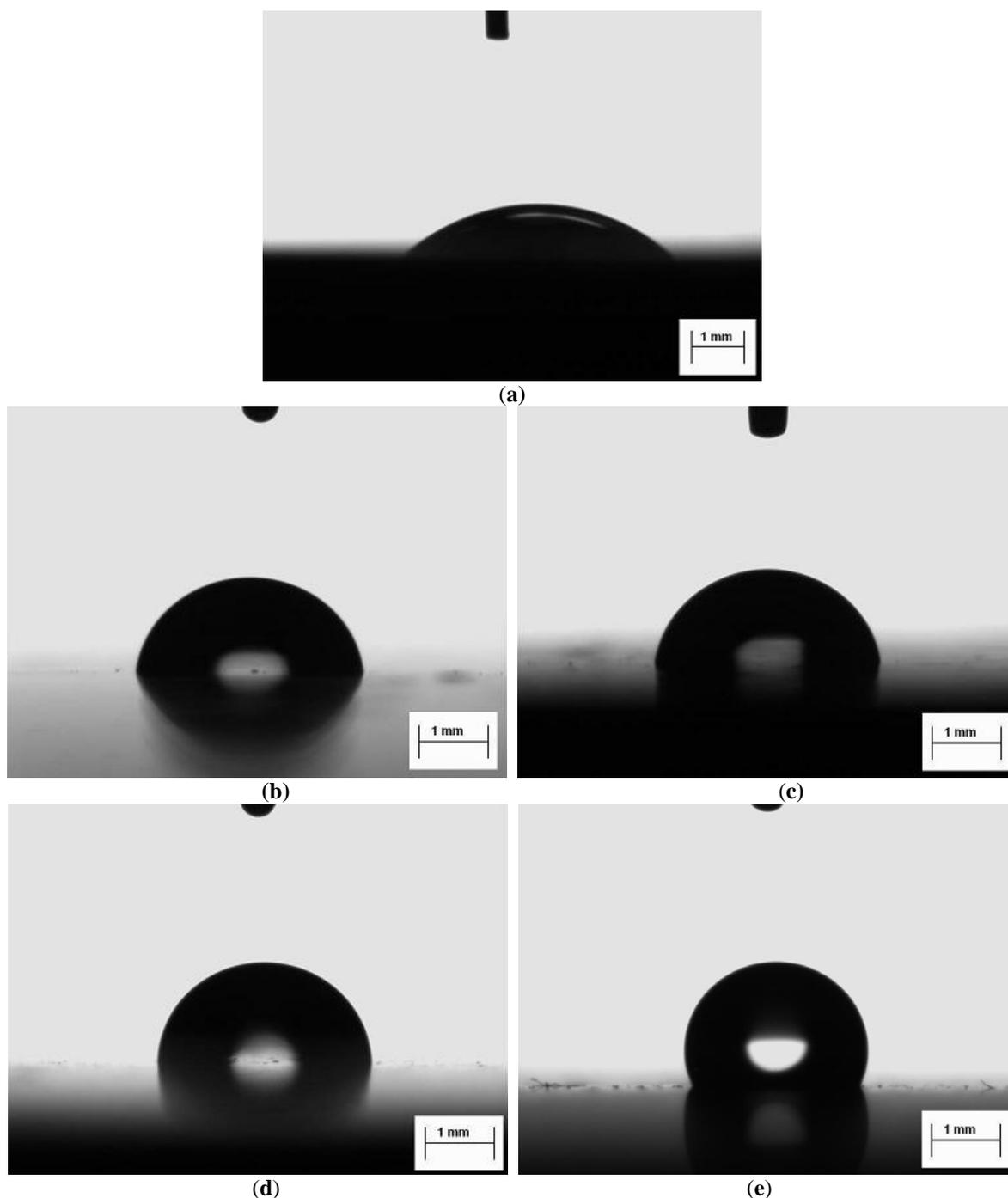


Figura 3: Gotas de água sobre recobrimentos antes dos ensaios de degradação superficial: (a) esmalte cerâmico, (b) poliéster, (c) poliuretano, (d) resina acrílica, (e) silicone.

3.4 Radiação Ultravioleta

Na Tabela 3 apresenta-se comparativamente a variação dos valores médios dos ângulos de contato dos diversos recobrimentos, antes do ensaio, na metade do período e ao final do ensaio.

Como a exposição à radiação no interior da câmara provoca uma aceleração de aproximadamente 14 vezes em relação à exposição natural, 15 e 30 dias de ensaio correspondem respectivamente a 7 e 14 meses de exposição solar em ambiente externo. Com exceção do silicone, os 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, dentro da faixa de indeterminação das medidas.

Tabela 3: Valores médios dos ângulos de contato (\pm desvio-padrão) após exposição à UV.

Recobrimento	Ângulo de contato (em graus)		
	Dias de exposição		
	0	15	30
Esmalte cerâmico	46 \pm 9	32 \pm 4	34 \pm 4
Poliéster	84 \pm 6	77 \pm 3	52 \pm 4
Poliuretano	82 \pm 6	69 \pm 3	54 \pm 6
Resina acrílica	86 \pm 4	75 \pm 15	66 \pm 4
Silicone	116 \pm 5	112 \pm 8	117 \pm 3

A olho nu apenas o recobrimento de acrílico apresentou alteração significativa de coloração, com sensível amarelecimento. Esta alteração na coloração já havia ocorrido na metade do ensaio e se tornou mais acentuada ao final do mesmo. Uma análise da Figura 4, com os aspectos 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 4(e).

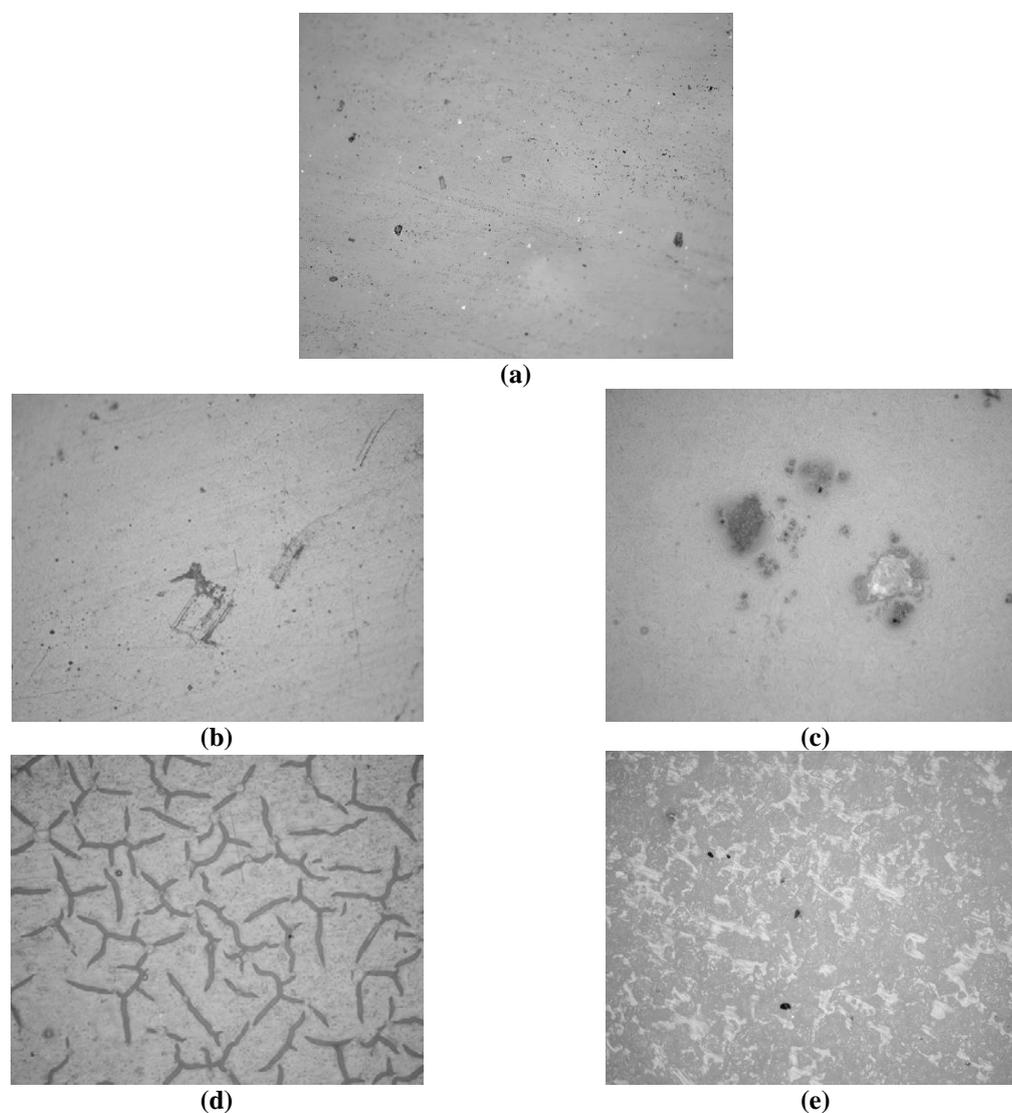


Figura 4: Micrografias (vista superior) dos recobrimentos após 30 dias de exposição a UV: (a) esmalte cerâmico, (b) poliéster, (c) poliuretano, (d) resina acrílica, (e) silicone. Barra = 100 μ m.

3.5 Névoa Salina

A Tabela 4 apresenta um comparativo entre os valores médios dos ângulos de contato medidos antes e depois de as peças serem submetidas ao 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 2% no ângulo de contato. 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 para 40°.

Uma análise a olho nu nos corpos-de-prova após o ensaio de névoa salina não indicou alterações visuais. Os corpos-de-prova foram então examinados por meio de um microscópio óptico (aumento de 100×) e as imagens confirmaram a ausência de processo de erosão ou degradação que poderia comprometer o desempenho do material se fosse utilizado como recobrimento em isoladores elétricos.

Tabela 4: Valores médios dos ângulos de contato (\pm desvio-padrão) após exposição à névoa salina.

Recobrimento	Antes do ensaio de névoa salina	Após ensaio de névoa salina	Varição (%)
Esmalte cerâmico	46 \pm 9	40 \pm 5	-13
Poliéster	84 \pm 6	74 \pm 4	-12
Poliuretano	82 \pm 6	71 \pm 4	-13
Resina acrílica	86 \pm 4	82 \pm 7	-5
Silicone	116 \pm 5	113 \pm 7	-2

3.6 Erosão

A Figura 5 apresenta a variação (perda) de massa dos corpos-de-prova com os diversos recobrimentos em função do tempo de ensaio de erosão. 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 à incrustação de partículas de areia na camada de poliéster, como se pode observar na Figura 6.

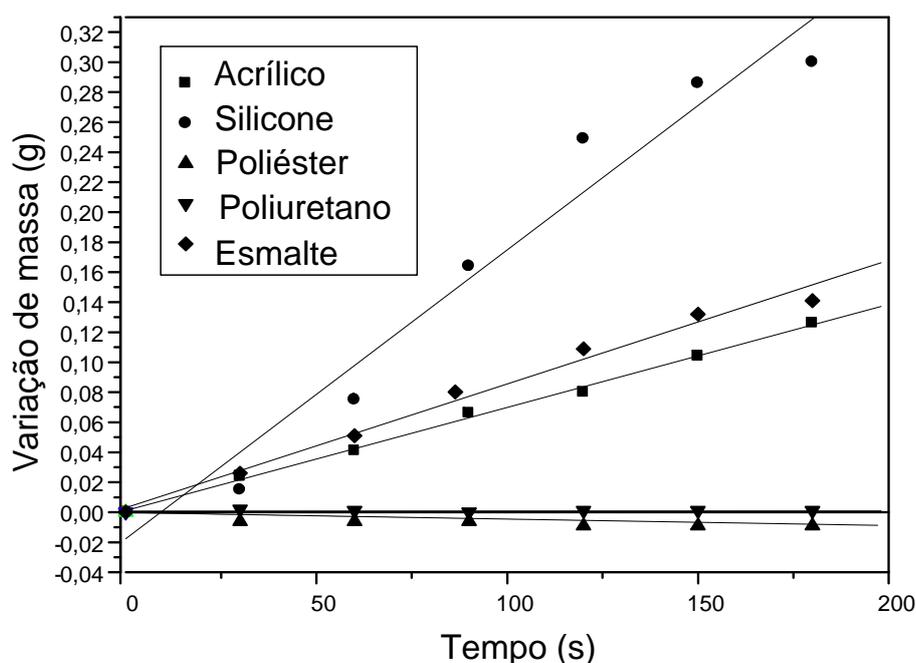


Figura 5: Variação de massa dos corpos-de-prova com os diversos recobrimentos ao longo do ensaio de erosão por jateamento. Variação negativa corresponde a um ganho de massa.

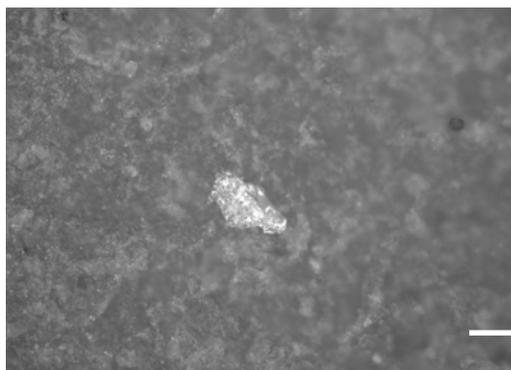


Figura 6: Micrografia (vista superior) de recobrimento de poliéster, após o ensaio de erosão por jateamento, mostrando uma partícula de areia incrustada na superfície. Barra = 50 µm.

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 correspondentes ao silicone apresentam grande dispersão porque uma das amostras apresentou perda de massa muito superior às outras duas.

As peças recobertas com esmalte cerâmico apresentaram grande desgaste por erosão, sendo superadas apenas pelas amostras revestidas com silicone. Estas últimas apresentaram, relativamente, a menor resistência ao desgaste por esse processo. Os recobrimentos de poliéster e poliuretano apresentariam a maior 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 SILVA e REZENDE [15] se referem a um período de incubação que pode ocorrer no início de ensaios de erosão, no qual a massa das amostras aumenta ligeiramente antes de decrescer, o que pode ter ocorrido com as peças recobertas com poliéster e poliuretano.

As medidas dos ângulos de contato da água sobre as superfícies de alguns recobrimentos, realizadas após o ensaio de erosão, apresentaram grande dispersão, conforme dados da Tabela 5. 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 medidas em locais que teriam sofrido maior ou menor erosão durante o ensaio.

Tabela 5: Valores médios dos ângulos de contato (\pm desvio-padrão) após ensaio de erosão por jateamento.

Recobrimento	Amostra nova	Após ensaio de erosão
Esmalte cerâmico	46 \pm 9	52 \pm 5
Poliéster	84 \pm 6	80 \pm 20
Poliuretano	82 \pm 6	80 \pm 10
Resina acrílica	86 \pm 4	70 \pm 30
Silicone	116 \pm 5	80 \pm 30

4 CONCLUSÕES

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

- Quanto à determinação quantitativa dos ângulos de contato, o maior valor foi apresentado pelo recobrimento de silicone.

- Ao final do ensaio de envelhecimento acelerado por radiação UV, o recobrimento em silicone novamente apresentou o melhor desempenho, apresentando um pequeno aumento no ângulo de contato. Uma análise microscópica das superfícies após a exposição a UV, no entanto, indicou que todos os recobrimentos poliméricos apresentaram alterações, notadamente o acrílico, motivada provavelmente por degradação fotooxidativa.

- Com relação ao ensaio de simulação de intempérie, verificou-se que o silicone apresenta o melhor desempenho frente à ação da atmosfera salina, com o ângulo de contato sendo reduzido em apenas 2%. Os recobrimentos não apresentaram alterações visuais significativas, mesmo após serem analisados por meio de microscopia óptica.

- Após o ensaio de erosão, verificou-se que as peças com recobrimento de silicone apresentaram o pior desempenho, com grande dispersão de medidas. O recobrimento em poliuretano não apresentou variação significativa de massa, enquanto que as peças recobertas com poliéster apresentaram ligeiro aumento de massa.

- O recobrimento em silicone apresentou a camada mais fina, com espessura média de 14 μm , sendo seguido pelo acrílico com espessura de 21 μm e pelo poliuretano, com espessura de 37 μm . O poliéster, que foi aplicado em duas demãos, apresentou espessura média da camada de 124 μm e o esmalte cerâmico com espessura média de 151 μm foi o mais espesso.

- A aplicação dos recobrimentos diminuiu a rugosidade superficial em relação aos substratos, exceto para o caso do silicone, que fez aumentar os valores em todos os parâmetros de rugosidade que foram medidos. Tal fato pode estar relacionado com a baixa dureza do silicone, ocasionando alterações no deslocamento da agulha do apalpador na camada desse polímero.

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, exceto quanto ao ensaio de erosão, após o qual, no entanto, ainda apresentou tendência a repelir a água.

5 REFERÊNCIAS

- [1] CHINELATTO, A.L., SOUZA, D.P.F., “Porcelanas elétricas aluminosas: Parte I – Revisão da literatura”, *Cerâmica*, v. 50, n. 313, pp. 62-68, 2004.
- [2] CHINELATTO, A.L., SOUZA, D.P.F., “Porcelanas elétricas aluminosas: Parte II – Desenvolvimento da microestrutura e sua influência no módulo de ruptura”, *Cerâmica*, v. 50, n. 315, pp. 172-184, 2004.
- [3] LIEBERMANN, J., “Electric behavior of porcelain insulators in polluted environments”, *American Ceramic Society Bulletin*, v. 81, n. 6, pp. 31-36, 2002.
- [4] LIEBERMANN, J., “New effective ways toward solving the problem of contamination of porcelain insulators”, *Refractories and Industrial Ceramics*, v. 43, n. 1-2, pp. 55-64, 2002.
- [5] GUBANSKI, S.M., VLASTOS, A.E., “Wettability of naturally aged silicone and EPDM composite insulators”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 3, pp. 1527-1535, 1990.
- [6] LIEBERMANN, J., “New possibilities for cost-effective solutions regarding the pollution layers of porcelain insulators”, *Interceram*, v. 49, n. 5, pp. 362-368, 2000.
- [7] AGUIAR, R., PASKOCIMAS, C.A., LEITE, E.R., LONGO, E., MAURÍCIO, M.R.D., “Desenvolvimento do pigmento condutor $\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$ e sua aplicação em vidrados semicondutores”, *Cerâmica*, v. 50, n. 314, pp. 134-137, 2004.
- [8] NBR 6405, “Rugosidade da superfície”, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1988.
- [9] SARON, C., FELISBERTI, M.I., SANCHEZ, E.M.S., “Construção de um simulador ambiental para envelhecimento acelerado de polímeros”, In: *Anais do 14º Congresso Brasileiro de Engenharia Ciência dos Materiais (CBECIMAT)*, TC404-014, pp.9, São Pedro, SP, Brasil, 2000.
- [10] ASTM G-53, “Operating light and water exposure apparatus (fluorescent UV-condensation type) for exposure of nonmetallic materials”, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1996.

- [11] NBR 8094, “Corrosão por exposição à névoa salina”, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1983.
- [12] VAN OSS, C.J., GIESE, R.F., “Hydrophilicity and hydrophobicity of clay minerals”, *Clays and Clay Minerals*, v. 43, n. 4, pp. 474-477, 1995.
- [13] SANTOS, S.F., *Análise de filmes poliméricos densos de ACC/PHANMCL por técnicas de DSC, DMA, XPS, ângulo de contato e AFM*, Dissertação de M.Sc. em Física, PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [14] VALCARCE, M.B., BUSALMEN, J.P., SÁNCHEZ, S.R., “The influence of the surface condition on the adhesion of pseudomonas fluorescens (ATCC 17552) to copper and aluminium brass”, *International Journal of Biodeterioration & Biodegradation*, v. 50, n. 1, pp. 61-66, 2002.
- [15] SILVA, R.A., REZENDE, M.C., “Erosão em compósitos a base de fibras de vidro/kevlar e resina epóxi de uso aeronáutico”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 13, n. 1, pp. 79-86, 2003.