

Avaliação do desempenho dos materiais poliméricos e da interface de isoladores compostos tipo bastão

Guilherme C. Silva, Marilda Munaro, Fernando Piazza, Paulo C. Inone, Thales F. dos Santos, Michael F. C. Frigatti e Juliana P. de Lima

Resumo – Três características importantes que devem ser verificadas para atestar a qualidade de isoladores compostos tipo bastão e garantir elevado desempenho em campo são: hidrofobicidade, resistência ao trilhamento elétrico e aderência da interface núcleo-revestimento. O presente trabalho apresenta três metodologias alternativas para avaliação destas características: (a) Hidrofobicidade e Capacidade de Recuperação, (b) Trilhamento Elétrico Modificado e (c) Aderência. Para validar estas metodologias foram utilizados isoladores compostos tipo bastão de oito fornecedores distintos. As duas primeiras metodologias mostraram-se eficazes para a qualificação do material polimérico do revestimento. A utilização da perda de massa como indicador quantitativo de desempenho no Trilhamento Elétrico Modificado parece promissora. A terceira metodologia também apresentou bons resultados para avaliação da qualidade da interface núcleo-revestimento. Além disto, as metodologias (a) e (c) são simples, de fácil execução e baixo custo, podendo ser utilizada pela concessionária quando do recebimento de materiais.

Palavras-chave – borracha de silicone, interface, isolador polimérico, trilhamento elétrico.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos as concessionárias de energia têm ampliado a utilização de isoladores compostos [1, 2]. Os isoladores são elementos sólidos dotados de propriedades mecânicas capazes de suportar os esforços produzidos pelos condutores. Eletricamente, exercem a função de isolar os condutores, os quais estão submetidos a uma diferença de potencial em relação à terra (estrutura suporte) ou em relação a um outro condutor fase [3].

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Os autores agradecem às instituições ANEEL, COPEL e CNPq pelo apoio financeiro.

Guilherme C. Silva, Marilda Munaro, Paulo C. Inone trabalham no LACTEC (e-mails: gcsilva@lactec.org.br; munaro@lactec.org.br; inone@lactec.org.br). Thales F. dos Santos e Michael F. C. Frigatti foram alunos de iniciação científica do CNPq durante o desenvolvimento do projeto.

Juliana P. Lima trabalha na COPEL (e-mail: juliana.lima@copel.com).

Os isoladores compostos tipo bastão são constituídos por três componentes: núcleo, terminais metálicos e revestimento (Figura 1).

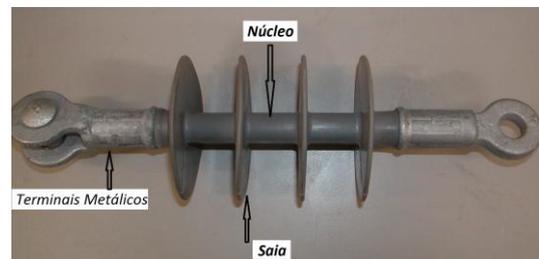


Figura 1. Isolador polimérico tipo bastão.

O núcleo é constituído de resina (poliéster ou epóxi) reforçada com fibra de vidro e tem a função de prover resistência mecânica ao equipamento. Além disto, o núcleo não deve ficar submetido às condições ambientais do local onde o isolador vai ser instalado e, assim sendo, deve ser coberto com um revestimento. Os terminais metálicos (aço forjado, ferro fundido ou alumínio) têm de ter boa resistência mecânica e resistência à corrosão, sendo que sua forma é importante para limitar a produção de descargas corona, as quais podem tornar o material polimérico do revestimento frágil e com fissuras, levando a falha do isolador pelo ingresso de umidade no núcleo. Nos projetos atuais as terminações metálicas incorporam um selante de silicone e são crimpadas ao núcleo. O revestimento, normalmente em borracha de silicone, deve ter resistência ao trilhamento elétrico e ao intemperismo, bem como fornecer a distância de escoamento requerida. A borracha de silicone apresenta uma particularidade única com respeito às outras borrachas, pois não apresenta o carbono na sua cadeia principal, mas sim o silício ligado ao oxigênio (Figura 2). A energia da ligação do silício com o oxigênio é muito maior do que as ligações carbono-carbono e carbono-oxigênio, o que confere propriedades térmicas superiores ao silicone. Além disto, a borracha de silicone possui boas propriedades dielétricas e excelente resistência à degradação por oxigênio, ozônio e radiação solar [1, 2].

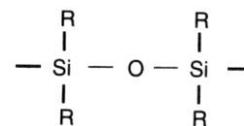


Figura 2. Estrutura geral do silicone.

Uma das principais vantagens da utilização de isoladores compostos reside na excelente hidrofobicidade apresentada

pelo revestimento e saias em silicone, o que lhes confere superior desempenho em ambientes de alta poluição e umidade. A hidrofobicidade constitui uma das propriedades dos materiais poliméricos e se refere a sua capacidade em repelir água evitando que se forme um filme contínuo em sua superfície. A hidrofobicidade contribui para a supressão da corrente de fuga superficial e aumento da suportabilidade frente a descargas disruptivas, melhorando o desempenho dos isoladores em condição de poluição e umidade. Todavia, deve-se lembrar de que outros fatores também influenciam no desempenho do isolador, como distância de escoamento, desenho das saias e posição de instalação [1, 4, 5]. Sob ação de intemperismo (radiação ultravioleta, calor e umidade), poluição e descargas elétricas superficiais os materiais poliméricos podem perder a hidrofobicidade que possuíam inicialmente. Nesse aspecto, o silicone se notabiliza pela capacidade de manter sua hidrofobicidade por longos períodos de tempo quando submetido a condições agressivas, graças a um mecanismo de recuperação que consiste na migração de moléculas de silicone com baixo peso molecular do interior para a superfície do material. Neste mecanismo, a recuperação ocorre em virtude de que as moléculas com baixo peso molecular atuam como uma camada de proteção, recobrimo a superfície danificada do isolador ou recobrimo a camada de poluição eventualmente depositada na superfície [6, 7]. Outras vantagens da utilização dos isoladores poliméricos são as dimensões compactas, resultando em materiais mais leves do que os convencionais, reduzindo o custo das estruturas, do transporte e armazenamento, da mão-de-obra de instalação, entre outros; maior resistência ao vandalismo e alta resistência mecânica a esforços de torção, flexão e tração [1].

Por outro lado, os materiais poliméricos são suscetíveis ao envelhecimento [1]. É sugerido que o envelhecimento de isoladores em serviço começa com a perda da hidrofobicidade devido ao intemperismo, seguido de arco de banda seca e, no caso particular do silicone, com a redução do fluído de baixo peso molecular da superfície. Isto leva ao aumento na corrente de fuga, aumento na rugosidade superficial, depolimerização da camada superficial, mudanças na estrutura devido à cristalização do polímero e aglomeração da carga e, então, falha devido ao trilhamento e erosão [8]. O trilhamento elétrico pode ser definido como a formação de um caminho condutor permanente através da superfície do isolante, resultado da degradação devido à ação das descargas superficiais. Ele varia de acordo com a intensidade do campo elétrico superficial, magnitude da corrente superficial e do estado das descargas superficiais induzidas pelo campo elétrico e corrente superficial, todas as quais sendo influenciadas pela presença de contaminantes e pela umidade na superfície do material. Alguns contaminantes que induzem o fenômeno de trilhamento são os sais, a poeira, a umidade e os agentes químicos atmosféricos [9]. Quando este fenômeno ocorre numa região localizada, tem-se a erosão. A contaminação atmosférica na forma de poluição e a umidade promovem a formação de um filme contínuo, com baixa resistividade superficial, criando condições para fluir correntes entre pontos com diferentes potenciais. Esta baixa resistividade superficial implica em alta corrente superficial e alta dissipação de calor, causando perda da solução deste filme contínuo. Como esta evaporação da so-

lução não é uniforme ocorre formação de bandas secas, que interrompem a corrente superficial. Ocorre então um aumento de tensão elétrica nestas regiões, a qual é suficiente para iniciar a ocorrência de descargas na superfície do material, na região entre as bandas secas. Estas descargas alcançam elevadas temperaturas, causando a formação de erosão e trilhas de material orgânico carbonizado. A ruptura completa da superfície do material ocorre quando uma trilha de material orgânico propaga-se por toda extensão do material [9, 10]. É sugerido pela literatura que a resistência ao trilhamento elétrico é um indicativo importante do desempenho da isolação para uso externo [11].

Outro aspecto importante do revestimento polimérico é que, independente do processo de fabricação, esse deve ficar fortemente aderido ao núcleo e a ferragem, garantindo uma perfeita estanqueidade contra a penetração de umidade. Caso contrário, poderá ocorrer o aparecimento de descargas parciais na interface dos materiais, causando deterioração do revestimento e conseqüentemente a exposição do núcleo, que pode romper devido à fratura frágil. Pode ainda ocorrer uma descarga disruptiva que percorre toda a região não aderida, danificando o núcleo [12].

Tendo em vista a importância que tem para as concessionárias a avaliação das características de hidrofobicidade, resistência ao trilhamento elétrico e de aderência da interface em isoladores compostos tipo bastão, serão apresentadas neste trabalho três metodologias alternativas de teste. A primeira, denominada de ensaio de Hidrofobicidade e Capacidade de Recuperação, visa avaliar a capacidade de recuperação de hidrofobicidade do material elastomérico depois de contaminado; a segunda, denominada de ensaio de Trilhamento Elétrico Modificado, tem por objetivo qualificar por meio de um parâmetro quantitativo – perda de massa – o desempenho do material polimérico frente ao trilhamento elétrico. Já a terceira metodologia, denominada de ensaio de Aderência, foi desenvolvida para avaliar o desempenho da interface núcleo-revestimento.

Os dados aqui apresentados fazem parte do projeto ANEEL/COPEL/LACTEC intitulado “Desenvolvimento de novas metodologias para avaliação da interface revestimento/núcleo/terminais e do envelhecimento e degradação de isoladores poliméricos tipo bastão e pára-raios poliméricos utilizados em redes de distribuição”, realizado nos ciclos 2005/2006 e 2006/2007. Este projeto teve como principais objetivos: (a) desenvolver uma nova metodologia para verificação da interface revestimento/núcleo/terminais de isoladores poliméricos tipo bastão e pára-raios poliméricos (classe 15 kV), (b) desenvolver uma nova metodologia para verificação dos compostos poliméricos utilizados em isoladores poliméricos tipo bastão e pára-raios poliméricos (classe 15 kV) e (c) definir parâmetros quantitativos para aceitação e qualificação de isoladores poliméricos tipo bastão e pára-raios poliméricos. Neste artigo estão apresentados os resultados relativos aos isoladores compostos tipo bastão.

II. EXPERIMENTAL

As três metodologias desenvolvidas para avaliação de isoladores compostos tipo bastão foram:

- Hidrofobicidade e Capacidade de Recuperação;

- Trilhamento Elétrico Modificado;
- Aderência.

Para avaliação destas metodologias foram adquiridos isoladores compostos tipo bastão de oito fabricantes distintos, os quais foram identificados como A, B, C, D, E, F, G e H.

Para identificação dos compostos orgânicos utilizados no revestimento e saias dos isoladores compostos tipo bastão foi realizado ensaio de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). O equipamento utilizado foi um Espectrômetro de Infravermelho BOMEM, modelo MB-100.

A. Hidrofobicidade e Capacidade de Recuperação

A avaliação da hidrofobicidade foi efetuada pelo método descrito no guia STRI [13], o qual prescreve uma maneira de classificar a superfície de isoladores dentro de uma escala de classes de hidrofobicidade. Esta escala se inicia com a classe HC1 (completamente hidrofóbico) e termina com a classe HC7 (completamente hidrofílico).

O procedimento consistiu em borrifar água sobre o isolador, com o auxílio de um pulverizador manual e, em seguida, fotografar sua superfície. Posteriormente, as fotos obtidas foram comparadas com fotos padrões presentes no guia do STRI [13], as quais definem uma escala de hidrofobicidade. Os padrões do STRI estão apresentados na Figura 3. Para avaliação da recuperação da hidrofobicidade dos compostos poliméricos dos isoladores bastão foi desenvolvida uma metodologia alternativa. Inicialmente todos os isoladores foram lavados com água e detergente e secos com papel toalha. Foi realizado ensaio de hidrofobicidade de acordo com o procedimento descrito anteriormente. Na sequência, as duas primeiras saias dos isoladores foram cobertas com argila. O objetivo da utilização da argila é drenar as moléculas de baixo peso molecular que estão presentes no silicone e que são responsáveis pela propriedade de recuperação da hidrofobicidade e pelo elevado desempenho deste material em ambientes com elevado nível de poluição. A argila incrustada nos isoladores visa simular um ambiente industrial (por ex. região próxima a uma indústria de cimento). Os isoladores ficaram com a argila pelo período de 48 horas. Decorrido este tempo a argila foi removida com uma escova de cerdas macias e um novo ensaio de hidrofobicidade foi realizado. Este tempo é considerado o instante inicial (tempo zero) para avaliação da recuperação da hidrofobicidade. O ensaio de hidrofobicidade foi repetido para tempos de recuperação de hidrofobicidade de 48 h e 156 h após a remoção da argila.

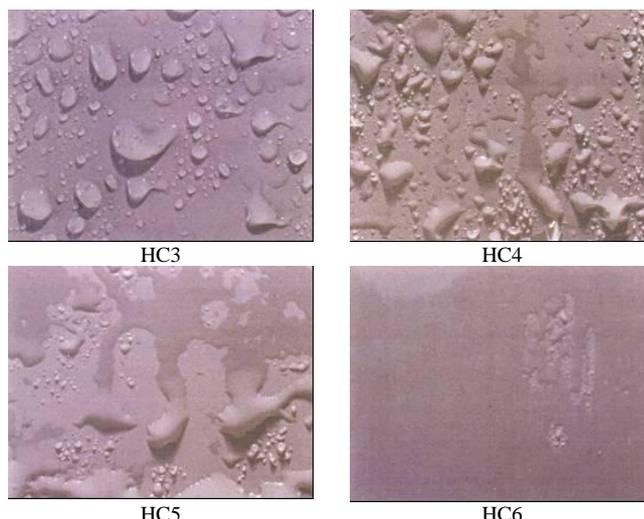
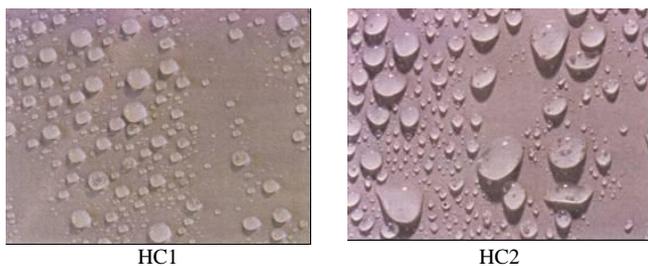


Figura 3. Padrão STRI para classificação da hidrofobicidade.

B. Trilhamento Elétrico Modificado

O ensaio de Trilhamento Elétrico Modificado foi desenvolvido com base na norma IEC 112 [14]. Todavia, a preparação dos corpos de prova, as condições de teste e a forma de qualificação do material foram modificadas. Uma das principais vantagens desta metodologia é que os corpos de prova são retirados diretamente do isolador, não necessitando confeccionar placas a partir do produto acabado. O tratamento térmico do material durante o processamento de placas pode alterar as propriedades finais do material e, conseqüentemente, gerar não-conformidade dos resultados quanto a real representatividade dos corpos de prova. Além disto, a borracha de silicone utilizada no revestimento de isoladores compostos tipo bastão não pode ser reprocessada, uma vez que é um material termofixo.

O arranjo experimental desenvolvido para realização do ensaio de Trilhamento Elétrico Modificado está apresentado na Figura 4. Este é constituído de um transformador; um par de eletrodos de platina (de dimensões 5 mm de largura, 2 mm de espessura e 20 mm de comprimento); um suporte de acrílico, desenvolvido de forma a possibilitar o controle da altura de acordo com o corpo de prova utilizado e permitindo o distanciamento de 5 mm entre os eletrodos e um sistema de gotejamento que fica a uma altura de 35 ± 5 mm do corpo de prova. A solução contaminante utilizada no sistema de gotejamento foi obtida da dissolução de cloreto de amônio, de concentração 0,1% em peso em água destilada. Esta tem resistividade de $3,95 \pm 0,05 \Omega \cdot m$ (a 23 ± 1 °C). Foi também desenvolvido um circuito eletrônico de proteção, o qual foi ajustado para atuar para correntes iguais ou superiores a 500 mA.

Os corpos de prova foram retirados da 2ª saia de cada um dos isoladores compostos (A, B, C, ..., H) com uma punção circular de ½ polegada. O peso de cada corpo de prova foi medido e o valor obtido devidamente registrado em uma planilha. Após pesagem, o corpo de prova foi colocado no arranjo experimental com a superfície em sentido horizontal sobre o suporte, de maneira que os eletrodos exerçam a força de 1 N sobre o corpo de prova. A distância entre os eletrodos é de 5 mm. Foi aplicada tensão elétrica de 1500 VAC, na frequência de 60 Hz, entre os eletrodos. Simultaneamente à aplicação de tensão a solução contaminante ficou

gotejando de uma altura de 30 a 40 mm, a uma taxa de 12 gotas/min, sobre o corpo de prova. As gotas do contaminante caem sobre a superfície a ser ensaiada no ponto médio entre os eletrodos.



Figura 4. Trilhamento elétrico modificado: arranjo experimental.

Decorrida 1 h o corpo de prova foi retirado do arranjo experimental para realização de nova pesagem. O valor obtido foi registrado. Calculou-se a perda de massa do corpo de prova, isto é, a diferença de peso do corpo-de-prova antes e após o ensaio. O corpo de prova foi colocado novamente no arranjo experimental e testado por mais 2 h. O mesmo procedimento foi repetido para outros tempos de ensaio, a saber, 3 h e 4 h. Desta forma, foram obtidos os valores de perda de massa para os seguintes períodos de tempo: 1 h, 3 h, 6 h e 10 h. O mesmo procedimento foi adotado para os corpos-de-prova de todos os isoladores. Todos os testes foram realizados em local livre de correntes de ar, com temperatura ambiente (23 ± 5 °C) e umidade relativa de $30 \pm 5\%$.

C. Aderência

Para verificar a adesão da interface núcleo-revestimento dos isoladores compostos tipo bastão foi desenvolvido a metodologia denominada ensaio de Aderência, baseada nos estudos realizados por Mello [12]. Esta metodologia foi dividida em dois testes, denominados: (a) Esforço Lateral e (b) Arrancamento.

Para realização dos testes de aderência os equipamentos utilizados foram: arco de serra, mini serra de disco, alicate universal e morsa.

No ensaio de esforço lateral as ferragens de cada um dos isoladores foram cortadas, deixando um comprimento de 5 mm. Em cada um dos isoladores foi efetuado um corte longitudinal, com profundidade suficiente para atingir o núcleo, ao longo de todo o isolador. O revestimento foi tensionado manualmente com o objetivo de avaliar a aderência nas interfaces (Figura 5). A aderência ao longo de todo o isolador caracteriza o bom desempenho do equipamento.

No ensaio de arrancamento as ferragens de cada um dos isoladores foram cortadas, deixando um comprimento de 5 mm. Em cada um dos isoladores foram efetuados dois cortes longitudinais, espaçados de 1 cm. Realizados os cortes longitudinais, foi forçado o arrancamento do revestimento, ao longo do corte, com um alicate universal (Figura 6). Para que o material seja adequado ao uso não deve haver exposição total do núcleo após o arrancamento do revestimento.



Figura 5. Teste de esforço lateral.

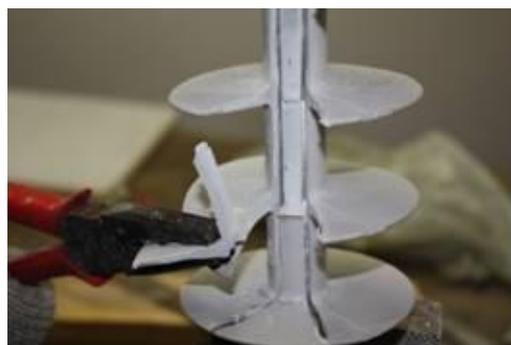


Figura 6. Teste de arrancamento.

III. RESULTADOS

A Tabela I apresenta os resultados obtidos via Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), técnica que permite a identificação dos compostos orgânicos preponderantes dos materiais elastoméricos do revestimento e saias dos isoladores compostos tipo bastão.

Tabela I. Identificação dos compostos orgânicos preponderantes

Isolador	Composição preponderante
A	Borracha de silicone
B	Borracha de silicone
C	Borracha de EPDM
D	Borracha de silicone
E	Borracha de silicone
F	Borracha de silicone
G	Borracha de silicone
H	Borracha de silicone

A. Hidrofobicidade e Capacidade de Recuperação

As Figuras 7 a 10 ilustram o ensaio de hidrofobicidade e capacidade de recuperação para os isoladores A, B, G e H. O resumo dos resultados obtidos para todos os isoladores está apresentado na Tabela II.



(a)



(b)



Figura 7. Isolador A: (a) material novo, (b) após retirada da argila, (c) 48 h após retirada da argila e (d) 156 h após retirada da argila.

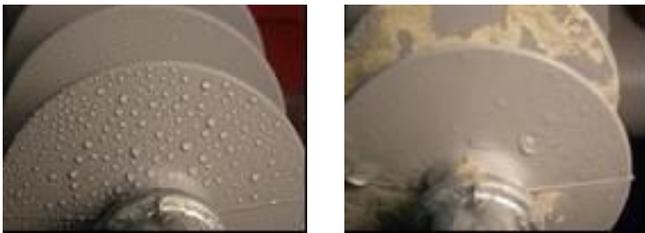


Figura 8. Isolador B: (a) material novo, (b) após retirada da argila, (c) 48 h após retirada da argila e (d) 156 h após retirada da argila.



Figura 9. Isolador G: (a) material novo, (b) após retirada da argila, (c) 48 h após retirada da argila e (d) 156 h após retirada da argila.

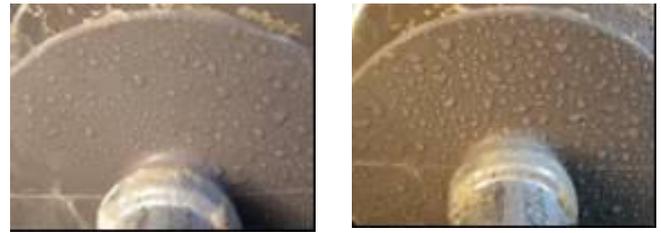
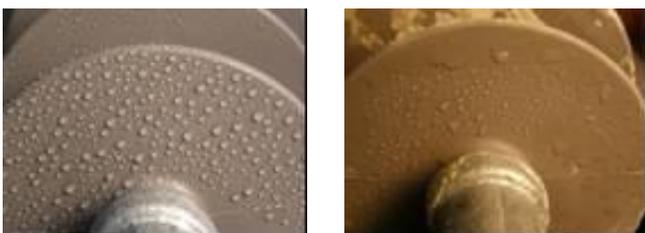


Figura 10. Isolador H: (a) material novo, (b) após retirada da argila, (c) 48 h após retirada da argila e (d) 156 h após retirada da argila.

Tabela II. Hidrofobicidade e capacidade de recuperação

Isolador	Classificação da hidrofobicidade			
	Material novo	0 h	Após 48 h	Após 156 h
A	HC1	HC5	HC4	HC3
B	HC1	HC5	HC3	HC2
C	HC3	HC6	HC5	HC5
D	HC1	HC5	HC4	HC4
E	HC1	HC6	HC3	HC2
F	HC1	HC6	HC6	HC5
G	HC1	HC4	HC3	HC3
H	HC1	HC4	HC2	HC2

No instante inicial (0 h), logo após a retirada da argila, os isoladores C, E e F perderam completamente sua hidrofobicidade original, sendo classificados como HC6. Os isoladores G e H foram os que tiveram menor perda de hidrofobicidade, sendo classificados como HC4.

A capacidade de recuperação da hidrofobicidade foi avaliada ao longo do tempo. Decorridas 48 h após a retirada da argila o isolador H recuperou quase completamente sua hidrofobicidade, sendo classificado como HC2. Os isoladores B, E e G foram classificados como HC3 e os isoladores A, C, D e F foram classificados na faixa de HC4 a HC6.

Após 156 h os isoladores B, E e H recuperaram quase completamente a sua hidrofobicidade original, sendo classificados como HC2. Os isoladores A e G foram classificados como HC3, o isolador D como HC4 e os isoladores C e F não apresentaram sinal de recuperação de hidrofobicidade.

B. Trilhamento Elétrico Modificado

Na Figura 11 é apresentada a perda de massa em função do tempo para cada um dos corpos de prova testados. Pode ser observado que, ao longo do teste, os materiais poliméricos dos isoladores B, C e A foram os que apresentaram a maior perda de massa, respectivamente.

Utilizando o software Excel[®] foi obtida a equação de regressão linear, o coeficiente angular, (α), o coeficiente de determinação (r^2) e o coeficiente de correlação (r) para cada corpo de prova. Os resultados obtidos para o material polimérico dos isoladores A, B, G e H estão apresentados nas Figuras 12 a 15. Gráficos similares foram obtidos para os materiais poliméricos dos demais isoladores.

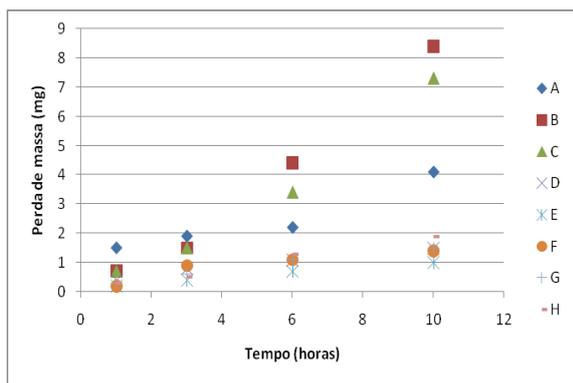


Figura 11. Perda de massa em função do tempo.

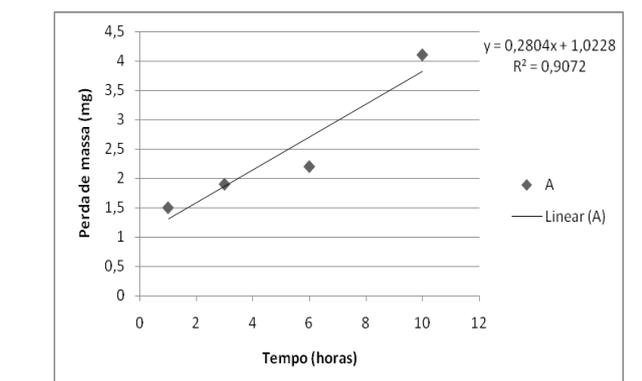
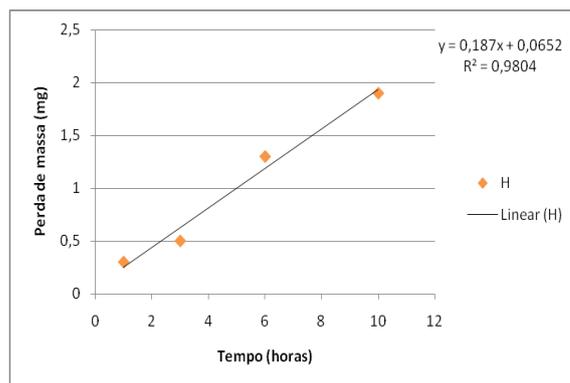


Figura 12. Perda de massa em função do tempo de ensaio para o material polimérico do isolador A.

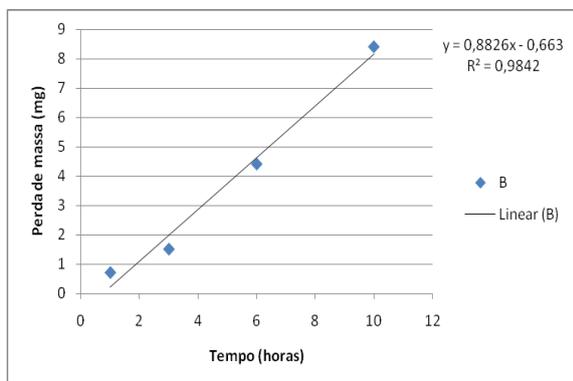


Figura 13. Perda de massa em função do tempo de ensaio para o material polimérico do isolador B.

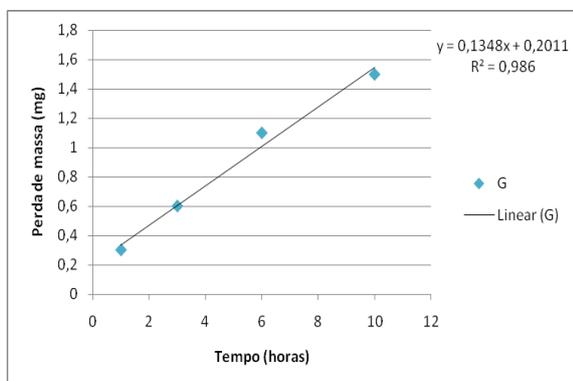


Figura 14. Perda de massa em função do tempo de ensaio para o material polimérico do isolador G.

Figura 15. Perda de massa em função do tempo de ensaio para o material polimérico do isolador H.

A Tabela III mostra um resumo dos parâmetros quantitativos obtidos a partir da equação de regressão linear dos corpos de prova dos distintos isoladores. Pode ser observado que todos os compostos poliméricos testados apresentaram forte correlação linear entre a perda de massa e o tempo de ensaio ($r \geq 0,9$).

Tabela III. Coeficiente angular (α), coeficiente de determinação (r^2) e coeficiente de correlação (r)

Amostra	α (mg/h)	r^2	r
A	0,28	0,90	0,95
B	0,88	0,98	0,99
C	0,74	0,97	0,98
D	0,11	0,97	0,98
E	0,08	0,99	0,99
F	0,12	0,84	0,91
G	0,13	0,98	0,99
H	0,18	0,98	0,99

O coeficiente angular indica a perda de massa por hora que ocorre em cada um dos materiais poliméricos. Os materiais poliméricos dos isoladores B e C apresentaram os maiores valores de coeficiente angular (0,88 e 0,74, respectivamente). Os demais compostos apresentaram coeficientes angulares menores do que 0,3. Isto significa que os compostos dos isoladores B e C perdem uma maior quantidade de massa/hora e, portanto, possuem uma maior suscetibilidade aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão.

A utilização do coeficiente angular para avaliação de desempenho de materiais mostra-se como promissora. Com base nos resultados obtidos sugere-se que o seguinte critério de qualificação de materiais: $a \leq 0,3$ = desempenho satisfatório, $a > 0,3$ = desempenho insatisfatório. Este critério deverá ser corroborado com um número maior de testes por amostra.

C. Aderência

Os resultados dos testes de aderência para os isoladores A, B, G e H estão apresentados nas Figuras 16 a 19.



Figura 16. Isolador A: (a) esforço lateral e (b) arrancamento.



Figura 17. Isolador B: (a) esforço lateral e (b) arrancamento.



Figura 18. Isolador G: (a) esforço lateral e (b) arrancamento.



Figura 19. Isolador H: (a) esforço lateral e (b) arrancamento.

Os resultados dos testes de aderência para todos os isoladores avaliados estão apresentados na Tabela III, onde S= boa aderência, N= aderência inadequada. Os isoladores B, E e G apresentaram aderência inadequada da interface núcleo-revestimento, tanto no teste de esforço lateral quanto no teste de arrancamento.

TABELA III. Resultados dos testes de aderência

Isoladores	Esforço lateral	Arrancamento
A	S	S
B	N	N
C	S	S
D	S	S
E	N	N
F	S	S
G	N	N
H	S	S

Para verificar a reprodutibilidade dos resultados o teste de aderência foi repetido três vezes, sendo obtidos os mesmos resultados apresentados na Tabela III.

IV. CONCLUSÕES

Os objetivos principais do projeto foram alcançados, uma vez que foram desenvolvidas metodologias de teste para avaliação de três características importantes para assegurar o elevado desempenho de isoladores compostos tipo bastão em campo, a saber: hidrofobicidade e capacidade de recuperação, resistência ao trilhamento elétrico e aderência da interface núcleo-revestimento.

No ensaio de hidrofobicidade o isolador C foi classificado como HC3; os demais foram classificados como HC1 e/ou HC2.

Com relação à capacidade de recuperação de hidrofobicidade foi mostrado que os isoladores G e H tiveram menor perda inicial de hidrofobicidade e os isoladores C, E e F perderam completamente sua hidrofobicidade. O isolador H teve a maior capacidade de recuperação de hidrofobicidade (HC2 em 48 h). Após 156 h os isoladores B e E apresentaram boa recuperação da hidrofobicidade (HC2). Os isoladores A e G ficaram classificados como HC3, o isolador D como HC4 e os isoladores C e F não apresentaram sinal de recuperação de hidrofobicidade (HC5-HC6).

A metodologia proposta no ensaio de resistência ao trilhamento elétrico modificado mostrou-se eficiente para qualificação de compostos poliméricos utilizados em isoladores poliméricos tipo bastão. Foi mostrado que existe uma forte correlação linear entre a perda de massa e o tempo de ensaio, onde o coeficiente angular representa a perda de massa por hora no composto polimérico. Sugere-se a utilização do coeficiente angular como um indicador quantitativo para qualificação dos compostos poliméricos.

O ensaio de Aderência, independente do procedimento adotado (esforço lateral ou arrancamento), mostrou-se eficiente para avaliação da interface núcleo-revestimento de isoladores compostos tipo bastão. Os isoladores que tiveram desempenho inadequado no teste de esforço lateral também tiveram desempenho inadequado no teste de arrancamento, a saber, isoladores B, E e G.

Tanto a metodologia de Hidrofobicidade e Capacidade de Recuperação quanto a de Aderência tem a vantagem de serem procedimentos e avaliações de curto prazo, simples execução e baixo custo, podendo ser utilizado pelos técnicos da concessionária como um teste preliminar no recebimento de isoladores compostos tipo bastão.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o LACTEC pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Hackam. "Outdoor HV Composite Insulators". *IEEE TDEI*, v. 6, n. 5, p. 557-585, 1999.
- [2] R. Raja Prabu. "Electrical Insulation Characteristics of Silicone and EPDM Polymeric Blends – Part I". *IEEE TDEI*, v. 14, n. 5, p. 1207-1214, 2007.
- [3] R. S. Gorur, E. A. Cherney, J. T. Burnham. *Outdoor Insulators*. Ravi Gorur Inc., 1999.
- [4] T. Sorqvist, A. E. Vlastos. "Performance and Aging of Polymeric Insulators". *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 12, p. 1657-1665, 1997.
- [5] V. Rajini, K. Udayakumar. "Degradation of Silicone Rubber under AC or DC Voltages in Radiation Environment". *IEEE TDEI*, v. 16, n. 3, p. 834-841, 2009.
- [6] S. Kim, E. A. Cherney, R. Hackam. "Hydrophobic Behavior of Insulators coated with RTV Silicone Rubber". *IEEE TEI*, v. 27, p. 610-622, 1992.
- [7] H. Hilborg, U. W. Gedde. "Hydrophobicity recovery of polydimethylsiloxane after exposure to corona discharges". *Polymer*, v. 39, p. 1991-1998, 1998.
- [8] R. S. Gorur. "Aging in Silicone Rubber used for Outdoor Insulation". *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 7, p. 525-538, 1992.

- [9] N. Yoshimura, S. Kumagai, B. N. Du. "Research in Japan on the Tracking Phenomenon of Electrical Insulating Materials". *IEEE El. Ins. Magazine*, v. 13, n. 5, p.8-18, 1997.
- [10] R. Raja Prabu. "Theoretical Correlation amongst Electrical and Mechanical Characteristics os Polymeric Housing Materials for Outdoor Insulators". *IEEE TDEI*, v. 15, n. 3, p. 771-782, 2008.
- [11] A. M. Piah, A. Darus. "Modelling Leakage Current and Electric Field Behaviour of Wet Contaminated Insulators". *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 19, p. 432-433, 2004.
- [12] D. R. de Melo, A. C. Balestro. "Cuidados na seleção de isoladores poliméricos – o problema da aderência". *Congreso Latinoamericano de Distribucion Electrica - CLADE*, 2008.
- [13] *STRI Hydrophobicity Classification Guide 1*. STRI Guide 1, 92/1, 1992.
- [14] *IEC Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials*. IEC 112, 2003.