



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Guilherme Cunha da Silva	Marilda Munaro	Paulo Cesar Inone
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
cunha@lactec.org.br	marilda@lactec.org.br	inone@lactec.org.br

Sebastiao Ribeiro Junior	Juliana Pinheiro Lima	Kamile Fuchs
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Companhia Paranaense de Energia	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
ribeiro@lactec.org.br	juliana.lima@copel.com	kamile.fuchs@lactec.org.br

Desempenho de isoladores e espaçadores de redes aéreas compactas frente à contaminação proveniente de regiões industrial e rural.

Palavras-chave

Contaminação
Espaçadores poliméricos
Isoladores poliméricos
Redes aéreas compactas

Resumo

Foi realizada contaminação artificial de espaçadores e isoladores poliméricos utilizados em redes aéreas compactas. Tal procedimento foi realizado visando simular o ambiente encontrado em regiões industrial e rural e avaliar o efeito do depósito de diferentes contaminantes sobre o desempenho destes equipamentos e acessórios. Os contaminantes testados foram farelo de soja, óxido de ferro sintético, cal hidratada e argila. O farelo de soja é uma substância que faz parte da cadeia de fabricação do óleo de soja e constitui uma fonte potencial de contaminação. A cal é um contaminante proveniente de indústrias de cal e cimento. Já o óxido de ferro e a argila estão presentes na composição do solo. Para avaliação do desempenho dos espaçadores e isoladores poliméricos foram realizadas medidas de hidrofobicidade, corrente de fuga e teste de compatibilidade dielétrica. Os resultados indicam que contaminantes típicos de regiões industriais (farelo de soja e cal) suprimem parcial ou completamente a hidrofobicidade destes equipamentos e acessórios, elevam

a intensidade da corrente de fuga e podem, em alguns casos, levar a completa combustão do material.

1. Introdução

A rede aérea de distribuição de energia elétrica com cabos cobertos fixados em espaçadores é uma tecnologia utilizada no Brasil desde a década de 90 e tem se mostrado como uma boa solução para o convívio harmonioso entre os cabos de energia elétrica e a arborização de vias públicas, sendo uma solução técnica e economicamente viável para atender as diretrizes ecológicas vigentes. O fato dos cabos serem cobertos com uma camada de material isolante permite as fases fiquem mais próximas umas das outras e dos galhos de árvores com pouco risco de curto-circuito. Outras vantagens da utilização desta tecnologia são: baixo custo em relação às redes isoladas, redução das podas de árvores e melhoria da estética visual, diminuição das interrupções no fornecimento de energia elétrica, redução dos custos de manutenção e facilidade de operação e instalação [1-4].

Entre os equipamentos e acessórios das redes aéreas com cabos cobertos estão os espaçadores poliméricos e isoladores tipo pino e bastão poliméricos. Os espaçadores isoladores tipo são normalmente confeccionados em polietileno de alta densidade (HDPE), enquanto o isolador bastão polimérico é constituído por três componentes principais – núcleo de resina com fibra de vidro, terminais metálicos (aço forjado, ferro fundido ou alumínio) e revestimento em silicone [1, 2].

Duas importantes características que os materiais poliméricos utilizados em redes aéreas com cabos cobertos devem ter são: (a) capacidade em repelir água evitando que se forme um filme contínuo em sua superfície, denominada de hidrofobicidade e (b) resistência ao trilhamento elétrico e erosão. 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 condições 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 [5-8]. Sob a ação de intemperismo (radiação ultravioleta, calor e umidade), contaminação 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, recobrando a superfície danificada do isolador, ou recobrando a camada de poluição eventualmente depositada na superfície [7, 8]. O trilhamento elétrico é um mecanismo de degradação superficial que induz a formação de caminhos parcialmente condutivos devido à ação de descargas na superfície do material polimérico. A erosão consiste na degradação progressiva do material pela ação de descargas elétricas. Tanto o trilhamento elétrico quanto a erosão ocorrem principalmente em pontos de contato com objetos aterrados, tais como galhos de árvores, ou em pontos de amarração do cabo com espaçador ou isolador. Contaminantes da atmosfera e umidade são fatores que aceleram estes processos [1].

A rede aérea de distribuição de energia elétrica com cabos cobertos fixados em espaçadores foi originalmente concebida para utilização em regiões urbanas, em áreas com elevada densidade de árvores e em regiões onde alta confiabilidade do sistema é desejada [9]. Tendo em vista o excelente desempenho que esta tecnologia vem apresentando em cidades como Maringá e Curitiba, a COPEL realizou alguns estudos em regiões de maior agressividade ambiental para avaliar o desempenho da rede aéreas com cabos cobertos fixados em espaçadores, tais como regiões litorâneas e regiões localizadas próximas de complexos industriais. Foi observado que em redes instaladas em regiões próximas do litoral (a 100 m da orla) os equipamentos e acessórios poliméricos têm apresentado degradação acelerada em comparação com aqueles instalados em regiões urbanas. Já para regiões mais afastadas da orla (400 e 800 m) a degradação dos materiais foi bem menos intensa. Além disto, recentemente ocorreu um caso onde espaçadores poliméricos

de uma RAC instalada próxima a uma fábrica de beneficiamento de soja incineraram após 30 dias de operação, sendo desconhecidas as causas deste incidente.

Estes fatores levaram a proposição, no âmbito ANEEL, de um projeto de pesquisa para realizar uma investigação mais detalhada do efeito que diferentes contaminantes, presentes em regiões de média e elevada agressividade ambiental, tem sobre os materiais poliméricos utilizados em redes aéreas com cabos cobertos. Por um lado, este estudo contribuirá com as equipes de projeto e normalização para identificação de áreas de risco para uso de redes aéreas com cabos cobertos e melhoria das especificações de materiais; por outro, pode vir a estimular pesquisas para o desenvolvimento de materiais poliméricos mais resistentes que permitam ampliar a utilização destas redes em regiões de elevada agressividade ambiental.

Em uma das etapas deste projeto de pesquisa foi realizado em laboratório a contaminação artificial de espaçadores e isoladores visando simular o ambiente encontrado em região industrial e rural e avaliar o efeito dos contaminantes sobre o desempenho destes equipamentos e acessórios. Os contaminantes testados foram farelo de soja, óxido de ferro sintético, cal hidratada e argila. O farelo de soja é uma substância que faz parte da cadeia de fabricação do óleo de soja e constitui uma fonte potencial de contaminação. A cal é um contaminante proveniente de indústrias de cal e cimento. Já o óxido de ferro e a argila estão presentes na composição do solo. O Estado do Paraná possui várias regiões onde estas situações são encontradas.

2. Desenvolvimento

2. Experimental

2.1. Contaminação artificial de espaçadores e isoladores poliméricos

Espaçadores poliméricos e isoladores tipo bastão foram submetidos a processo de contaminação artificial para avaliação de desempenho em laboratório, dos materiais poliméricos polietileno e silicone, por meio de medidas de hidrofobicidade, corrente de fuga e teste de compatibilidade dielétrica. Estas duas últimas técnicas foram aplicadas somente em espaçadores.

Os contaminantes utilizados foram farelo de soja, óxido de ferro sintético e cal hidratada. O processo consiste em dispersar o material contaminante em água, na proporção de 100 g/litro de água. A suspensão obtida foi aspergida na superfície do espaçador ou isolador com auxílio de um borrifador manual, de forma a se obter uma camada homogênea.

2.2. Hidrofobicidade

A avaliação da hidrofobicidade, realizada em espaçadores e isoladores tipo bastão contaminados, foi efetuada com base na norma IEC 62073, método C [10]. Uma bomba de spray manual foi utilizada para nebulizar água deionizada sobre uma superfície vertical do espaçador e isolador bastão. O procedimento consistiu em acionar continuamente o spray, mantendo o bico nebulizador a uma distância de aproximadamente 20 cm do objeto em teste, até que o líquido depositado na superfície comesse a escorrer. Após este procedimento as superfícies foram fotografadas.

2.3. Corrente de fuga

Para avaliação do efeito da contaminação superficial no comportamento da corrente de fuga de espaçadores foi efetuada a montagem mostrada na Figura 1. Os espaçadores foram recobertos com farelo de soja, óxido

de ferro e cal hidratada instalados numa câmara de acrílico com volume de 10 m³. Foi aplicada uma tensão fase-terra igual a 13,8 kV nos berços de cima, sendo o aterramento efetuado pelo berço inferior, através do qual foi realizada a medição da corrente de fuga. As conexões elétricas foram feitas por meio de pedaços de cabos nus de alumínio, com 20 cm de comprimento, fixados aos berços por anéis de amarração elastoméricos. Os valores de corrente de fuga foram medidos por intermédio da leitura de tensão através de um resistor de 100 Ω , utilizando-se um sistema de aquisição de dados Agilent. Foi feita nebulização de solução de cloreto de sódio de condutividade 970 $\mu\text{S}/\text{cm}$, à vazão de 0,26 litros/h, durante cerca de 46 h ininterruptamente.



Figura 1. Espaçadores montados na câmara para medição de corrente de fuga.

2.4. Compatibilidade dielétrica

O ensaio de compatibilidade dielétrica foi realizado em espaçadores confeccionados em polietileno. Foram testados seis espaçadores (sendo três contaminados e três não contaminados) e três isoladores tipo pino. Os contaminantes utilizados foram farelo de soja, óxido de ferro e cal hidratada. Os parâmetros de teste utilizados foram: tensão aplicada de 16 kV (fase-terra), temperatura da superfície do cabo de 60 °C e aspersão contínua de névoa salina (condutividade de 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$). O teste durou 26 dias, tendo sido interrompido devido ao derretimento do espaçador contaminado com farelo de soja. No ponto de derretimento do espaçador a cobertura do cabo apresentou derretimento parcial. A Figura 2 apresenta a disposição dos espaçadores e isoladores tipo pino com diferentes contaminantes no arranjo experimental.



Figura 2. Arranjo experimental montado (à esquerda: materiais sem contaminação; à direita: materiais com contaminação).

3. Resultados

3.1. Hidrofobicidade

a. Contaminação por farelo de soja

Na Figura 3a é mostrada foto do isolador tipo pino contaminado com farelo de soja após nebulização com água deionizada. Observa-se que a camada de contaminação tornou a superfície completamente hidrofílica. De acordo com a norma IEC 62073 [1] esta superfície é classificada como HC7. Para efeito de comparação, uma superfície limpa do mesmo isolador é mostrada na Figura 3b, a qual é completamente hidrofóbica, sendo classificada como HC1. Os resultados aqui obtidos mostram que o farelo de soja é uma potencial fonte de contaminação, que produz a supressão total da hidrofobicidade do polietileno.



Figura 3. Isolador tipo pino contaminado com farelo de soja: (a) após nebulização com água deionizada, (b) após limpeza do contaminante.

Na Figura 4 são mostradas fotos do espaçador losangular contaminado com farelo de soja, após nebulização com água deionizada. Na Figura 4a o espaçador foi submetido à nebulização leve, a qual foi interrompida antes de ocorrer remoção da camada de farelo depositado. Observa-se que a superfície perde totalmente a hidrofobicidade, sendo completamente umectada. Esta situação, no caso de espaçadores instalados na rede elétrica, pode ser comparada à ocorrência de uma garoa leve, de neblina, ou da condensação de umidade na superfície do isolamento, ao anoitecer. Nestas circunstâncias, haveria a umectação da superfície do espaçador, reduzindo sua capacidade de isolamento elétrico. Isto mostra que a presença de material particulado em grande concentração no ar, ao se depositar sobre a superfície de materiais isolantes, pode provocar a perda temporária da sua hidrofobicidade, caso seja acompanhada de alta umidade relativa do ar.

Na Figura 4b é mostrada uma foto em que o corpo-de-prova foi submetido à nebulização por repetidas vezes até remoção quase completa do contaminante. Observa-se que, com a remoção completa do contaminante, ocorre a recuperação da hidrofobicidade, com a superfície nebulizada passando a apresentar um padrão de gotas dispersas. Esta situação, no caso de espaçadores instalados na rede elétrica, pode ser comparada à ocorrência de chuvas com intensidade suficiente para lavar a sua superfície, no caso da camada

de contaminação não ser aderente. No caso da camada de contaminação se tornar aderente devido à sinterização gradativa das partículas, após um período prolongado sem chuvas, a lavagem pela chuva pode se tornar menos efetiva, causando problemas mais graves de isolamento.

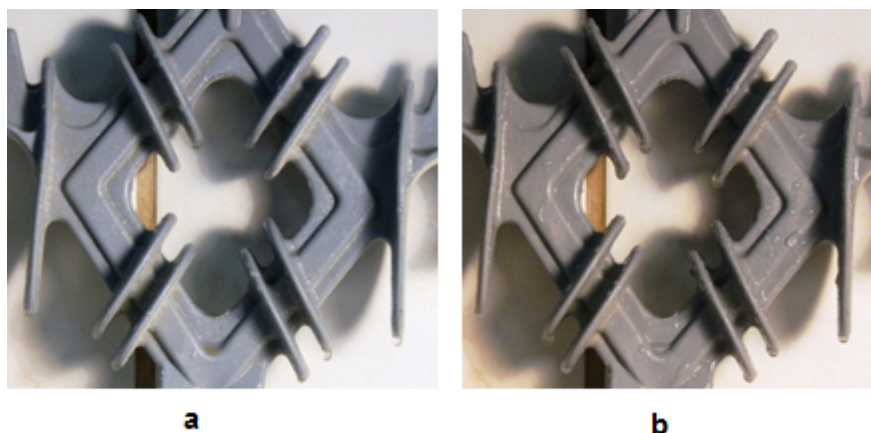


Figura 4. Superfície do espaçador losangular contaminado com farelo de soja: (a) nebulização leve, suficiente para umedecer a superfície; (b) nebulização efetuada repetidamente, até remoção do farelo.

O efeito descrito anteriormente foi também observado nos isoladores tipo bastão (Figura 6). Contudo, para os isoladores tipo bastão (revestimento em silicone) este efeito assume dimensões mais contundentes, visto que o material é tido como tendo excepcional hidrofobicidade. Isto mostra que, mesmo o silicone pode apresentar substancial perda de hidrofobicidade quando contaminado por material particulado. Da Figura 5 pode-se verificar que a hidrofobicidade do isolador de silicone, após nebulização leve, se reduz a HC7. Após a remoção do farelo, por nebulização prolongada, a hidrofobicidade é recuperada para HC2. No caso dos isoladores de silicone, a perda de isolamento superficial dependerá da velocidade de deposição do material particulado na sua superfície. Se a velocidade de deposição for baixa, haverá tempo para que ocorra recuperação da hidrofobicidade, a qual é uma característica notável apresentada pelo silicone. Contudo, se a taxa de deposição de material particulado for suficientemente elevada, a recuperação da hidrofobicidade poderá ser vencida, tendo como consequência a perda de isolamento.

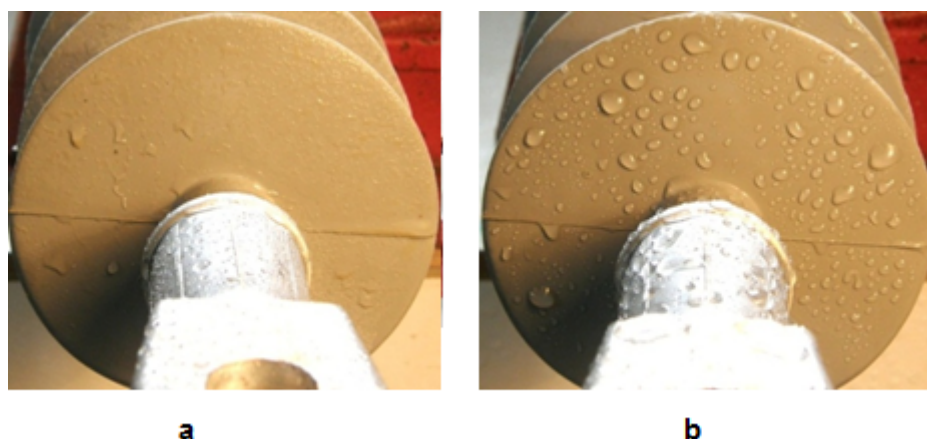


Figura 5. Superfície do isolador de silicone contaminado com farelo de soja: (a) nebulização leve, suficiente para umedecer a superfície; (b) nebulização efetuada repetidamente, até remoção do farelo.

b. Contaminação com óxido de ferro

Na Figura 6 são mostradas fotos de espaçadores cobertos com óxido de ferro. Nota-se que esta substância apresenta boa aderência ao polietileno, produzindo uma camada espessa e uniforme. A nebulização com água deionizada produz umectação completa da superfície e perda total da hidrofobicidade (Figura 6b).

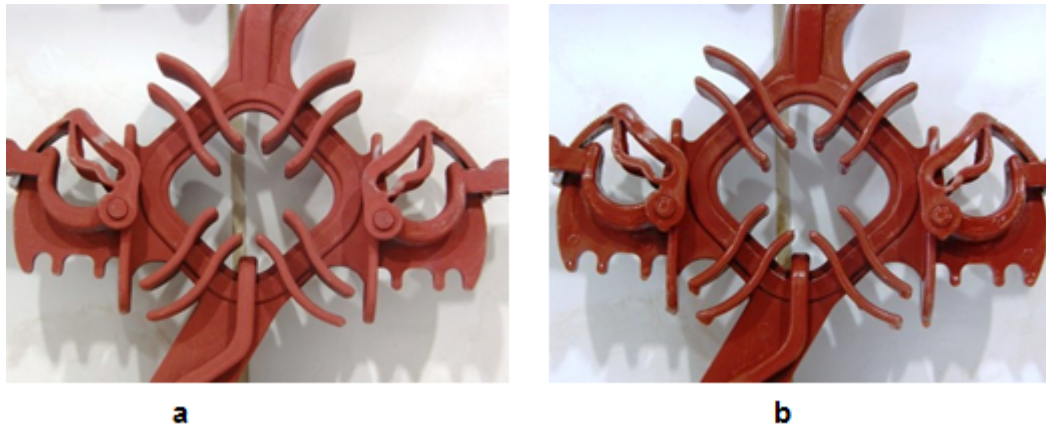


Figura 6. Suspensão de óxido de ferro aplicado em espaçador de polietileno: (a) superfície seca; (b) superfície borrifada com água deionizada.

Na Figura 7 são mostradas fotos de isoladores de silicone cobertos com o óxido de ferro. Nota-se que a adesão desta substância ao silicone é alta, produzindo uma camada uniforme e espessa. A nebulização com água deionizada produziu umectação completa da superfície (Figura 7b), indicando assim a perda da hidrofobicidade do material.

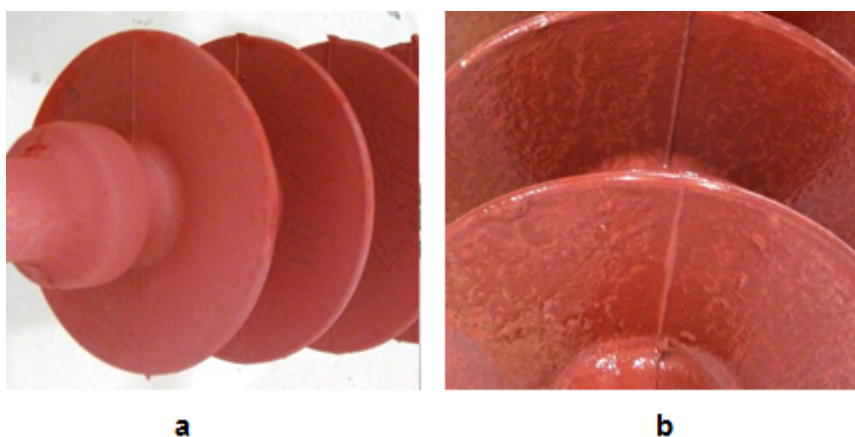


Figura 7. Óxido de ferro aplicado em isolador de silicone: (a) superfície seca; (b) superfície borrifada com água deionizada.

c. Contaminação com cal hidratada

Na Figura 8 são mostradas as fotos do espaçador coberto com a suspensão de cal hidratada. A adesão da cal ao polietileno foi razoável, mas não tão boa quanto à adesão do óxido de ferro. A hidrofobicidade foi completamente suprimida, sendo que a nebulização com água deionizada produziu umectação total da superfície (Figura 9b).



Figura 8. Suspensão de cal hidratada aplicada em espaçador de polietileno: (a) superfície seca; (b) superfície borrifada com água deionizada.

Na Figura 9 são mostradas fotos de isolador de silicone coberto com a cal hidratada. Da mesma forma que para o polietileno a adesão da cal ao silicone foi apenas razoável. A nebulização com água deionizada produziu umectação parcial da superfície (Figura 9b). Em algumas zonas houve umectação completa, ao passo que em outras a água se dividiu em gotas, ocorrendo perda parcial da hidrofobicidade.

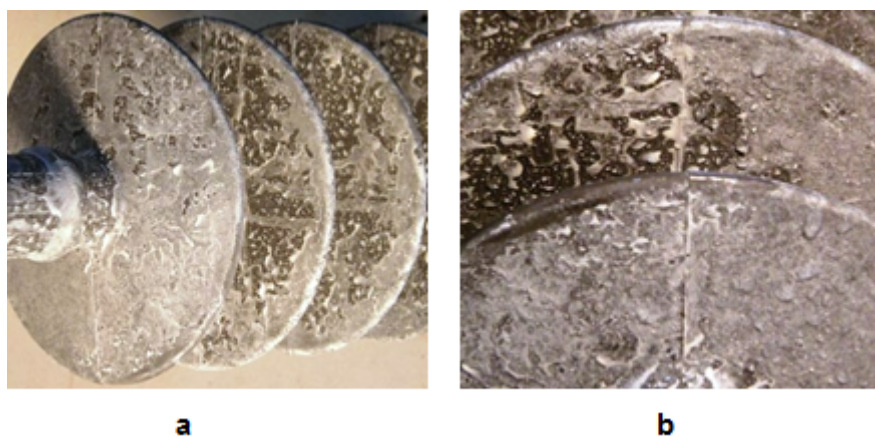


Figura 9. Cal hidratada aplicada em isolador de silicone: (a) superfície seca; (b) superfície borrifada com água deionizada.

3.2. Corrente de fuga

Nas Figuras 10 e 11 estão apresentados os resultados de corrente de fuga dos espaçadores contaminados com farelo de soja e óxido de ferro. Os espaçadores submetidos ao farelo de soja foram os que apresentaram

maior valor de corrente de fuga, atingindo em alguns períodos do teste correntes de até 8 mA. O óxido de ferro, embora seja bastante aderente à superfície dos espaçadores e produza uma camada compacta, não provoca tanto o aumento da corrente de fuga quanto o farelo de soja. O valor máximo de corrente de fuga observado para o espaçador com óxido de ferro é de 3 mA. O resultado obtido para a cal hidratada é similar ao obtido para o óxido de ferro.

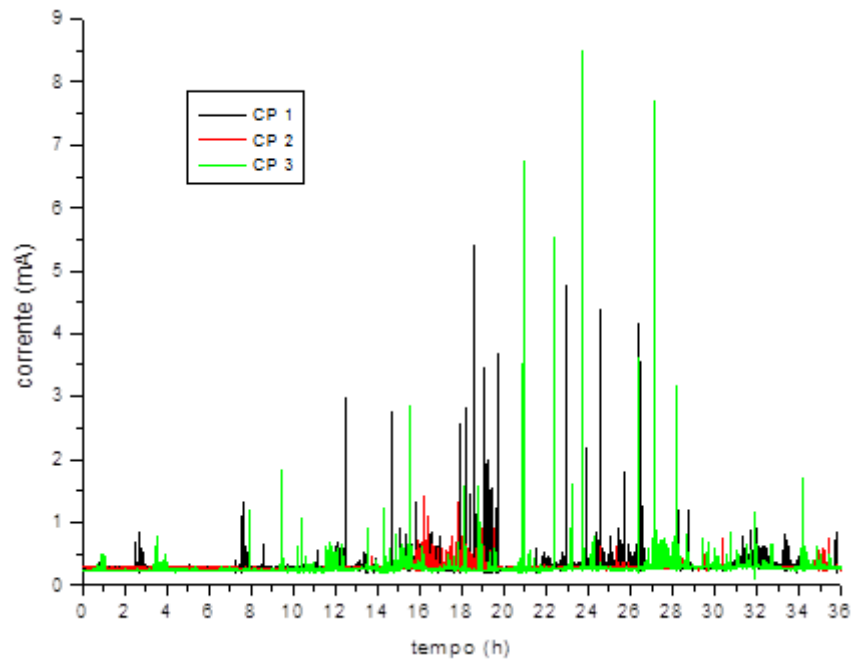


Figura 10. Corrente de fuga nos espaçadores submetidos à contaminação com farelo de soja.

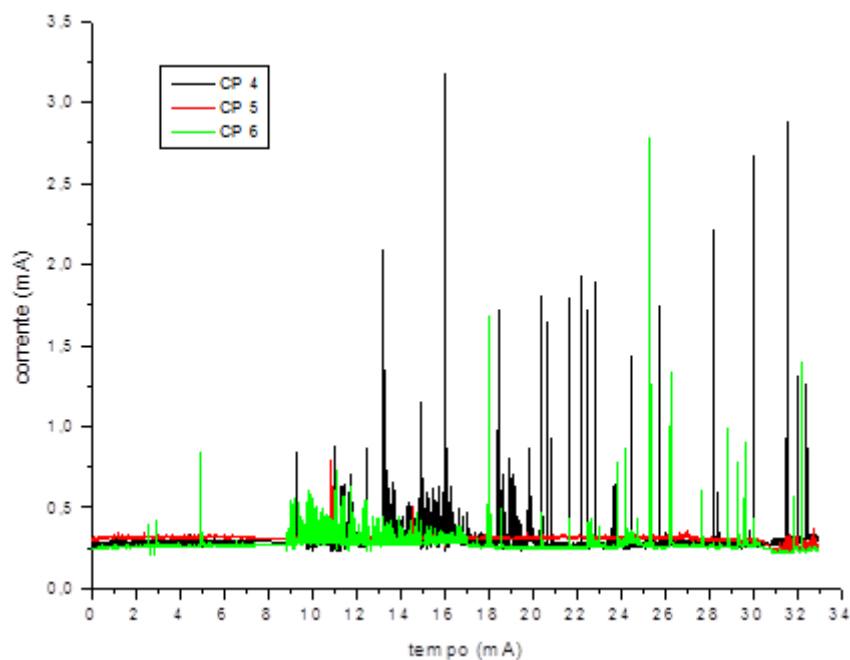


Figura 11. Corrente de fuga nos espaçadores submetidos à contaminação com óxido de ferro.

3.3. Compatibilidade dielétrica

O teste de compatibilidade dielétrica foi realizado com espaçadores contaminados artificialmente e não-contaminados. Os contaminantes utilizados neste teste foram o farelo de soja, o óxido de ferro e a cal hidratada. Na Figura 12 são apresentados detalhes dos espaçadores contaminados após o término do ensaio. Tanto a amostra com cal quanto a com óxido de ferro apresentaram traços de trilhamento no corpo do espaçador. O espaçador com farelo de soja ficou derretido.

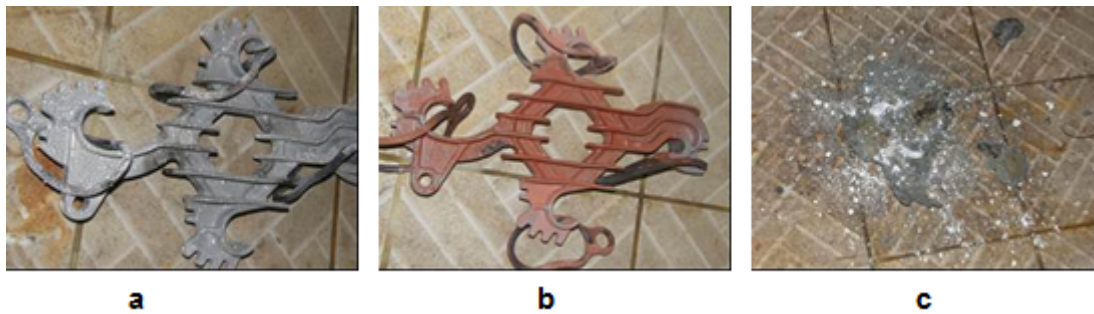


Figura 12. Espaçadores contaminados (após o ensaio): cal, óxido de ferro e farelo de soja.

Os espaçadores sem contaminação não apresentaram sinais significativos de degradação.

3. Conclusões

Foi mostrado que contaminantes oriundos de indústrias, como o farelo de soja, podem levar a supressão parcial ou total da hidrofobicidade de sistemas de isolamento confeccionados em polietileno e silicone. Tais resultados foram corroborados pelas medidas de corrente de fuga e pela inspeção visual realizada após o ensaio de compatibilidade. Já contaminantes presentes em regiões rurais, como o óxido de ferro, também tem o mesmo efeito, porém em intensidade bem menor.

Estes fatores levam a indicar que há de se ter precaução ao instalar uma rede aérea compacta em locais muito próximos à indústrias ligadas à produção de soja. Por outro lado, a fim de ampliar a utilização da rede aérea de distribuição de energia elétrica com cabos cobertos fixados em espaçadores para regiões de elevada agressividade ambiental sugere-se direcionar pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novos materiais.

Agradecimentos:

Os autores agradecem às instituições ANEEL, COPEL e CNPq pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

4. Referências bibliográficas

- [1] SILVA, G. C.; PIAZZA, F.; MUNARO, M. Field Behavior on Polymer-Covered Overhead Conductors Submitted to Natural Aging on Diverse Weather and Geographic Conditions in Brazil. IEEE Trans. on Power Delivery, v. 24, n. 3, 2009, p. 1651-1656.
- [2] ROCHA, R. C. C.; BERREDO, R. C.; BERNIS, R. A. O; GOMES, E. M; NISHIMURA, F. New Technologies, Standards and Maintenance Methods in Spacer Cables Systems. IEEE Trans. on Power Delivery, v. 17, n. 2, 2002, p. 562-568.
- [3] NISHIMURA, F. Rede aérea isolada e protegida de média tensão. Eletricidade Moderna, n. 241, 1994, p. 68-73.
- [4] SOARES, M. R. Rede Protegida: novo padrão da Cemig eleva níveis de confiabilidade, Eletricidade Moderna, n. 291, 1998, p. 50-63.
- [5] HACKAM, R. Outdoor HV Composite Insulators. IEEE TDEI, v. 6, n. 5, 1999, p. 557-585.
- [6] RAJA PRABU, R. Electrical Insulation Characteristics of Silicone and EPDM Polymeric Blends – Part I. IEEE TDEI, v. 14, n. 5, 2007, p. 1207-1214.
- [7] KIM, S; CHERNEY, E. A.; HACKAM, R. Hydrophobic Behavior of Insulators coated with RTV Silicone Rubber. IEEE TEI, v. 27, 1992, p. 610-622.
- [8] HILBORG, H.; GEDDE, U. W. Hydrophobicity recovery of polydimethylsiloxane after exposure to corona discharges. Polymer, v. 39, 1998, p. 1991-1998.
- [9] NORMA TÉCNICA COPEL. Projeto de Redes de Distribuição Compacta Protegida. NTC 841100, Dez 1997.
- [10] INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION. *Guidance on the measurement of wettability of insulators surface*. IEC TS 6203, 2003.
-