

Evaluation of the Supportability and Electrical Performance of RTV Coatings Filled with Carnauba Wax under Pollution Conditions

R. B. Nobrega, E. G. Costa, *Senior Member, IEEE*, A. D. Germano and I. O. Medeiros

Abstract—This paper is an experimental study to evaluate the performance of Room Temperature Vulcanizing Silicone Rubber (RTV-SIR) coatings filled with carnauba wax and Alumina Trihydrate (ATH). The coatings were applied to glass insulators and subjected to pollution tests. The insulators performance was evaluated through the application of disruptive discharges and applied voltage under fog while monitoring the leakage current. The experimental results showed a reduction in leakage current and improved insulator performance for RTV-SIR coatings filled with carnauba wax under pollution conditions. The best results were achieved for coatings added with ATH and carnauba wax, indicated by the sample with the percentage composition of 75% RTV, 20% ATH and 5% carnauba wax.

Index Terms—ATH, carnauba wax, coating, insulator, leakage current, pollution, silicone.

I. INTRODUÇÃO

A poluição superficial é um problema inerente a grande parte dos equipamentos que compõem o sistema elétrico e consiste em um dos principais fatores da ocorrência de falhas no isolamento externo [1], [2], [3], [4], [5] e [6]. Os poluentes são diversos (sal, poeira, fertilizantes, fuligem, fungos, entre outros) e dependem do tipo de ambiente em que o equipamento se encontra instalado. Em regiões costeiras é predominante a deposição de poluentes caracterizados por partículas solúveis na superfície do isolador, como cloreto de sódio (NaCl). Em regiões industriais e desérticas a poluição é constituída, principalmente, por sais e elevados níveis de partículas não solúveis [1] e [2].

A combinação da poluição com a umidade proveniente do orvalho ou névoa ocasiona a intensificação da corrente de fuga e a ocorrência de descargas elétricas superficiais, reduzindo a suportabilidade dielétrica e o desempenho elétrico do isolamento [3], [7], [8].

Os efeitos da poluição em isoladores cerâmicos podem ser mais críticos para a ocorrência de um *flashover* devido à elevada energia superficial que favorece a formação de películas de água em condições de alta umidade, resultando na

intensificação de correntes de fuga [3] e [9].

Os efeitos nocivos da poluição e umidade podem ser minimizados pela aplicação de revestimentos poliméricos ao isolamento externo. A aplicação dos revestimentos permite minimizar a ocorrência de falhas e proporciona uma redução de custos associados à manutenção e eventuais trocas por isoladores integralmente poliméricos [4], [10], [11] e [12].

Com o intuito de avaliar o desempenho dos revestimentos poliméricos sob condições de poluição, ensaios laboratoriais devem ser realizados. A realização dos ensaios auxilia na estimação do tempo de vida útil e permite evitar que materiais com propriedades inadequadas ou susceptíveis a falhas sejam utilizados na isolação de equipamentos elétricos [2], [4], [8], [11], [13], [14] e [15].

Neste contexto, em [8] os autores realizaram ensaios para avaliar o desempenho de isoladores de vidro em ensaio de névoa salina. Nos ensaios foram utilizados isoladores com três diferentes condições: um isolador limpo, um isolador poluído naturalmente em campo e um isolador limpo com aplicação de revestimento de silicone. Os resultados evidenciaram que o isolador com revestimento de silicone apresentou menores valores de corrente de fuga e maior duração até a falha. O isolador com poluição de campo apresentou o pior desempenho, sendo o primeiro a falhar.

Os autores em [13] investigaram os efeitos da umidade relativa e da severidade da poluição na ocorrência de *flashover* de amostras de borracha de silicone (SIR) e de borracha de etileno-propileno-dieno (EPDM). As amostras foram submetidas a ensaios laboratoriais por meio da aplicação de estresses elétricos sob névoa. Os autores evidenciaram uma diminuição na tensão de *flashover* e resistência da superfície com um aumento na severidade da poluição e umidade relativa. Além disso, eles verificaram que a borracha de silicone apresentou maior resistência superficial e maior resistência ao *flashover* do que os isoladores EPDM.

Em [16] os autores avaliaram, a partir de ensaios laboratoriais, o desempenho de diversos isoladores instalados em áreas com poluição costeira, industrial e biológica. O conjunto de isoladores investigados era constituído por isoladores cerâmicos com e sem revestimentos de borracha de silicone vulcanizável à temperatura ambiente (RTV-SIR) e por isoladores poliméricos de SIR e EPDM. Medições de corrente de fuga, tensão de *flashover*, hidrofobicidade, densidade de depósito de sal equivalente (DDSE) e condutividade superficial foram realizadas para avaliação do desempenho

R. B. Nobrega, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, raphael.nobrega@ee.ufcg.edu.br.

E. G. Costa, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, edson@dec.ufcg.edu.br.

A. D. Germano, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, andre@dec.ufcg.edu.br.

I. O. Medeiros, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, italo.medeiros@ee.ufcg.edu.br.

dos isoladores. Os autores evidenciaram intensificações da corrente de fuga devido à poluição e reduções nos valores da tensão de *flashover*. Além disso, os autores constataram que isoladores de silicone representam uma boa alternativa para utilização nas linhas de distribuição presentes nas áreas estudadas que foram submetidas à poluição costeira.

Os resultados dos trabalhos anteriores demonstram a efetiva contribuição dos revestimentos de RTV-SIR para os isoladores na mitigação dos efeitos da poluição e da umidade. A efetividade da RTV-SIR está associada, principalmente, a presença de propriedades hidrofóbicas e a sua capacidade de recuperá-la após intensas solicitações elétricas e ambientais [14] e [17].

Nesse sentido e buscando o aperfeiçoamento dos revestimentos, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com enfoque em cargas de reforço que podem ser adicionadas ao polímero com o objetivo de reduzir custos, minimizar os efeitos da degradação e aperfeiçoar propriedades específicas do revestimento. Dentre as cargas, as mais difundidas são a alumina tri-hidratada (ATH) e a sílica [9], [18], [19] e [20]. Outras cargas têm emergido para obtenção de revestimentos com propriedades específicas e redução de custos, como: ZnO [21], TiO₂ [22] e [23], *fly ash* [24], CaCO₃ [25] e [26], BN [27] e AlN [27] e [28].

O presente trabalho consiste em um estudo experimental com o objetivo de avaliar o desempenho de revestimentos poliméricos sob condições de poluição e umidade, como também, buscar o aperfeiçoamento dos revestimentos a partir da avaliação de uma nova carga e seus efeitos no isolamento. Para tanto, o trabalho propõe investigar a influência da aplicação de cera de carnaúba como carga na composição de revestimentos RTV-SIR. A análise do desempenho foi realizada a partir dos resultados de ensaios laboratoriais de rigidez dielétrica, tensão aplicada sob névoa e tensão disruptiva. O ensaio de rigidez dielétrica foi realizado em amostras de revestimentos com o intuito de avaliar a qualidade e a resistência à ruptura elétrica para diferentes composições. Os ensaios de tensão aplicada sob névoa e tensão disruptiva foram realizados em isoladores de vidro tipo disco recobertos com revestimentos a base de RTV-SIR com diferentes proporções da cera de carnaúba e ATH.

II. MATERIAL E MÉTODOS

A. Material

A matriz polimérica foi constituída pela borracha de silicone RTV 615 A com agente de cura B, fabricado pela *Momentive Performance Materials*.

As cargas utilizadas foram a alumina tri-hidratada (ATH) e a cera de carnaúba. A ATH foi do tipo Hydrogard-GP, produzida pela ALCOA WORLD ALUMINA LLC e constituída predominantemente por Al₂O₃ (≈65% da composição) [29]. A cera de carnaúba utilizada foi do tipo I em forma de pó e processada pela Foncepi. Em geral, a cera de carnaúba é constituída por 85% de ésteres de ácidos graxos e pequenas porcentagens de ácidos graxos livres, álcoois livres, resinas e hidrocarbonos [30].

Os isoladores utilizados na pesquisa foram de vidro temperado - ANSI classe 52-3, tipo suspensão e fabricados pela Sediver.

Para a preparação das amostras foram utilizados uma peneira granulométrica em malha ASTM 200 (abertura de 74 μm), uma balança analítica *Shimadzu* AUY220, um agitador mecânico com hélice centrífuga, uma câmara de vácuo, moldes circulares e pincel.

A camada de poluição aplicada na superfície dos isoladores com revestimento foi constituída por caulim, cloreto de sódio (NaCl) e água. Para a medição da condutividade foi utilizado um Condutímetro Instrutherm CD-850.

Para a realização do ensaio de rigidez dielétrica foi utilizado um equipamento para teste de rigidez dielétrica, modelo GDYJ-502, com tensão de saída de 0-100 kV e fabricado pela *Chongqing Gold Mechanical & Electrical Equipment Co., Ltd.*

Para a aplicação de tensão em condições de névoa foi utilizada uma câmara de névoa disponível no Laboratório de Alta Tensão da UFCG, construída em alvenaria e com dimensões 6,5 m x 2,0 m x 4,0 m. Concomitantemente a câmara de névoa foram utilizados: um transformador 220V/120kV, uma ponta de prova de alta tensão Tektronix P6015A, dois osciloscópio Tektronix TDS 2024b, isoladores poliméricos de suporte, resistores *shunt* de 1kΩ e um computador.

Para o ensaio de tensão disruptiva foi utilizado um transformador 220V/100kV, um divisor capacitivo, uma estrutura similar a uma mísula de uma torre de transmissão e um voltímetro.

B. Preparação das Amostras

Na preparação das amostras foram utilizadas a ATH, a cera de carnaúba e a borracha de silicone, nas proporções indicadas na Tabela I.

TABELA I
PERCENTUAL DE CONCENTRAÇÃO MÁSSICA DAS AMOSTRAS
COMPOSIÇÃO (%)

AMOSTRA	RTV-SIR	ATH	CARNAÚBA
S100	100	0	0
SA20	80	20	0
SC5	95	0	5
SAC5	75	20	5

O procedimento empregado para a preparação das amostras pode ser dividido em quatro etapas: peneiramento, pesagem, mistura e vácuo.

A primeira etapa consistiu no peneiramento da ATH e da cera de carnaúba por meio de uma peneira granulométrica.

Na etapa de pesagem as cargas e o silicone foram individualmente pesados nas proporções indicadas na Tabela I. Posteriormente, na etapa de mistura, as cargas foram adicionadas ao silicone e misturadas por meio de um agitador mecânico, com velocidade em torno de 1.000 rpm. A mistura foi realizada em três ciclos de 25 minutos, constituídos por 15 minutos de agitação mecânica e 10 minutos de repouso.

Após a homogeneização, o agente de cura foi adicionado à

composição na proporção 10:1 em relação à massa do silicone e a composição foi novamente conduzida ao agitador mecânico por mais 5 minutos para proporcionar uma dispersão uniforme do agente de cura.

Finalizada a etapa de mistura, as composições foram inseridas em uma câmara de vácuo por um período aproximado de 20 minutos para a eliminação de bolhas resultantes do processo de mistura.

Cada composição foi aplicada na superfície de dois isoladores de vidro por meio de pintura com o auxílio de um pincel. Além disso, cinco corpos de provas circulares (83 mm x 2 mm) foram produzidos para cada composição. As amostras foram colocadas em repouso à temperatura ambiente por um período mínimo de 7 dias até que a cura do revestimento fosse alcançada, conforme recomendado em [31].

C. Ensaio de Rigidez Dielétrica

A avaliação da rigidez dielétrica foi realizada para cinco amostras de cada composição indicada na Tabela I e baseada em recomendações descritas na ASTM. D149 [32].

As amostras foram colocadas entre dois eletrodos localizados no interior de um reservatório preenchido com óleo isolante. Os eletrodos possuíam formatos cilíndricos com 51 mm de diâmetro e 25 mm de espessura. Na Fig. 1 é possível visualizar uma fotografia do arranjo utilizado para determinar a rigidez dielétrica das amostras investigadas.

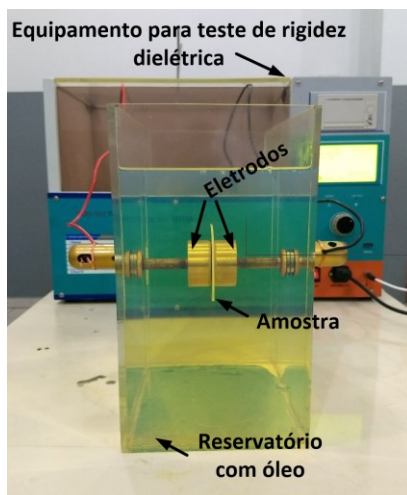


Fig. 1. Fotografia do arranjo utilizado para ensaio de rigidez dielétrica.

Para a realização do ensaio foi empregado o método de curta duração para aplicação da tensão, especificado em [32]. A tensão foi aplicada uniformemente nos eletrodos a uma taxa constante de 2 kV/s por meio de um equipamento para teste de rigidez dielétrica.

O valor da rigidez dielétrica (RD) para cada amostra foi determinado pela razão entre a tensão de ruptura ($V_{ruptura}$) e a espessura (d) do material isolante no ponto de falha, conforme (1).

$$RD = \frac{V_{ruptura}}{d} \quad (1)$$

D. Poluição Artificial dos Isoladores

A camada de poluição foi aplicada à superfície de um isolador revestido com cada uma das composições indicadas na Tabela I. A aplicação foi realizada conforme recomendações para isoladores poliméricos com recuperação da hidrofobicidade descritas na brochura técnica 555 do CIGRE [33]. As etapas consistem, basicamente, na: limpeza da superfície do isolador, pré-condicionamento, aplicação da camada de poluição e período de recuperação.

Inicialmente, a limpeza da superfície dos isoladores foi realizada utilizando-se água destilada. Para a etapa de pré-condicionamento foi empregado caulim na forma de pó. O caulim foi aplicado na superfície do isolador com auxílio de um pincel e de forma a proporcionar uma distribuição uniforme na superfície.

A camada de poluição foi aplicada por meio do borrifamento de uma suspensão contaminante (poluente) preparada conforme recomendações da IEC 60507 [34]: 40 g de caulim, 1000 g de água e quantidade adequada de NaCl, de forma a obter a condutividade necessária para o ensaio. A condutividade foi de 3 S/m e pode ser classificada como uma poluição média-pesada, conforme [1] e [34].

Após a aplicação da poluição, as amostras foram mantidas em repouso, à temperatura ambiente, durante um período de 48 horas.

E. Organização do Ensaio para Isoladores Revestidos

O esquema para a realização dos ensaios elétricos para isoladores com revestimentos pode ser visualizado no fluxograma ilustrado na Figura 2.

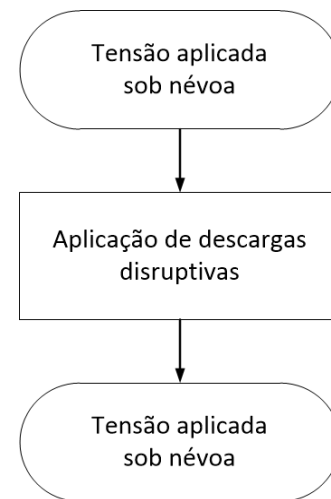


Fig. 2. Esquema dos ensaios realizado para isoladores.

Na Fig. 2, a primeira etapa do ensaio consistiu em submeter isoladores limpos e poluídos ao ensaio de tensão aplicada sob névoa para investigar o desempenho inicial da aplicação dos revestimentos. Para tanto, a corrente de fuga foi monitorada e utilizada como critério de análise. Na segunda etapa, os isoladores foram submetidos a uma série de descargas disruptivas com o objetivo de avaliar a suportabilidade dielétrica e promover um envelhecimento acelerado das

amostras. Na terceira etapa, os isoladores foram novamente submetidos ao ensaio de tensão aplicada sob névoa com monitoramento da corrente de fuga para avaliar o estado do isolamento e investigar indícios de degradação após as etapas anteriores.

F. Tensão Aplicada sob Névoa

Para a realização do ensaio, os isoladores foram inseridos em uma câmara de névoa e instalados em isoladores de suporte, permitindo o ensaio simultâneo de até quatro isoladores, conforme ilustrado na Fig. 3.

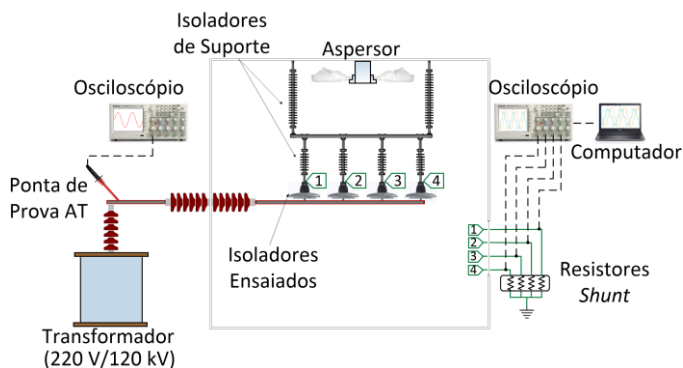


Fig. 3. Arranjo experimental para monitoramento da corrente de fuga.

O circuito da Fig. 3 é composto por um transformador elevador de tensão, uma ponta de prova de alta tensão para medição da tensão aplicada, os objetos de teste (isoladores ensaiados) em série com o resistor *shunt*, dois osciloscópios digitais e um computador. Na figura podem ser vistos os isoladores de suporte que proporcionam sustentação mecânica e permitem que a corrente de fuga seja direcionada para os resistores *shunt*. O sinal da corrente de fuga foi adquirido indiretamente a partir da queda de tensão sobre o resistor *shunt*, em consonância com a Lei de Ohm. Os sinais de tensão e corrente foram digitalizados por meio de um osciloscópio digital e armazenados em um computador.

No interior da câmara foi gerada uma névoa por meio de aspersores localizados na parte superior e dispostos de modo a evitar a incidência direta da névoa sobre os isoladores. A névoa foi aplicada com baixa intensidade com a finalidade de tornar a camada de poluição condutiva. Para a formação da névoa, a pressão do ar e nos reservatórios de água foram de 4 bar. A condutividade da água utilizada para gerar a névoa foi 0,0325 S/m.

Os isoladores foram submetidos a uma tensão alternada na frequência industrial com 16 kV_{pico}, aplicada ininterruptamente por um período de 60 minutos sob névoa.

G. Tensão Disruptiva à Frequência Industrial

Os isoladores foram retirados da câmara de névoa e suspensos em uma estrutura similar a uma mísula de uma torre de transmissão para a aplicação de descargas disruptivas, conforme ilustrado na Fig. 4.

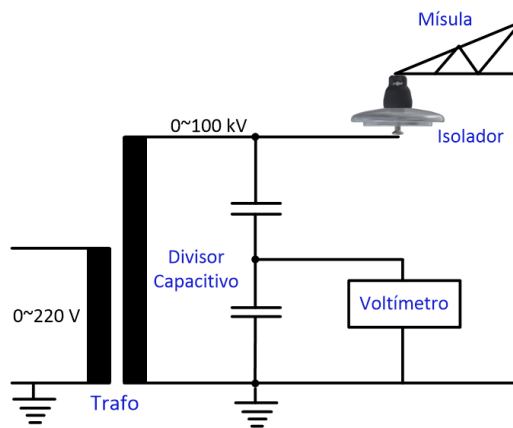


Fig. 4. Arranjo experimental para aplicação de tensão disruptiva à frequência industrial.

Inicialmente, a superfície do isolador foi umedecida por meio do borrifamento de água destilada e de modo que a umidade não escorresse pela superfície do isolador. Em seguida, cinco descargas disruptivas foram aplicadas ao isolador com uma taxa de elevação da tensão de 2 kV/s e intervalos de 1-2 minutos entre aplicação. O procedimento foi repetido cinco vezes com intervalos de repouso de 1-3 minutos entre repetições, formando cinco conjuntos de aplicação (C1, C2, C3, C4 e C5). Para cada conjunto foram registradas cinco medições de descargas disruptivas, totalizando a aplicação de 25 descargas disruptivas (*flashover*).

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Rigidez Dielétrica

O ensaio de rigidez dielétrica foi realizado para avaliar a qualidade e a resistência das amostras à ruptura elétrica. Na Fig. 5 é possível visualizar os valores da rigidez dielétrica obtidos para as amostras investigadas.

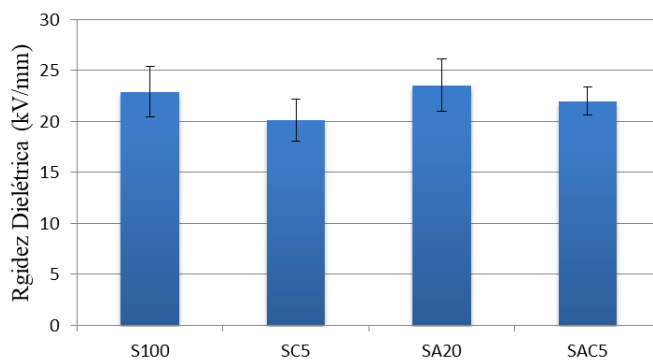


Fig. 5. Valores da rigidez dielétrica dos compósitos.

Quando se analisam as composições entre si na Fig. 5, verifica-se que o compósito de silicone S100 apresentou um valor médio em torno de 23 kV/mm. A adição da cera de carnaúba ocasionou uma pequena redução do valor médio para 20 kV/mm, aproximadamente.

A adição da ATH ao silicone em concentrações de 20%,

indicada pela amostra SA20, proporcionou valor médio de rigidez dielétrica em torno de 24 kV/mm e similar ao compósito S100. A adição da cera de carnaúba ocasionou uma ligeira redução para valores médios em torno de 22 kV/mm. As análises das barras de erro indicaram que não existem diferenças significativas entre as amostras para um intervalo de confiança de 95%.

B. Tensão Disruptiva

Nas Fig. 6 e Fig. 7 são mostrados os valores médios de tensão disruptiva para cada conjunto de aplicação (C1 a C5) em isoladores limpos e poluídos, respectivamente. Durante o ensaio, a temperatura foi aproximadamente 26°C e a umidade relativa entre 60% e 70%.

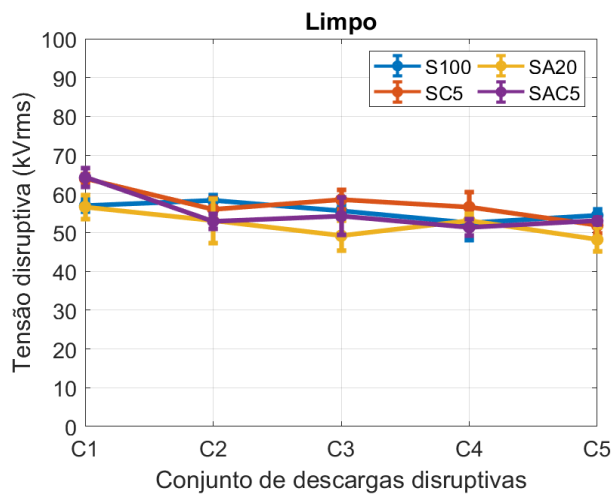


Fig. 6. Valores médios de descargas disruptivas sobre isoladores limpos para cada conjunto de aplicação.

Quando se analisam os valores de tensão disruptiva em isoladores para a condição limpo (Fig. 6) evidencia-se que a amostra S100 apresentou valores de tensão disruptiva similares ao longo dos conjuntos de aplicação, com valores em torno de 55 kV. A adição de ATH e da cera de carnaúba aos revestimentos não ocasionaram mudanças significativas no desempenho dos isoladores quando comparadas à amostra S100. Os valores de tensão disruptiva para as amostras SA20, SC5 e SAC5 foram próximos dos valores de tensão disruptiva para a amostra S100.

Na Fig. 7, a aplicação de poluição aos isoladores ocasionou uma redução significativa dos valores de tensão disruptiva quando comparados aos valores obtidos para isoladores limpos (Fig. 6). Os valores de tensão disruptiva foram inferiores a 50 kV, atingindo patamares de 13 kV no conjunto de aplicação C5 para as amostras S100 e SA20.

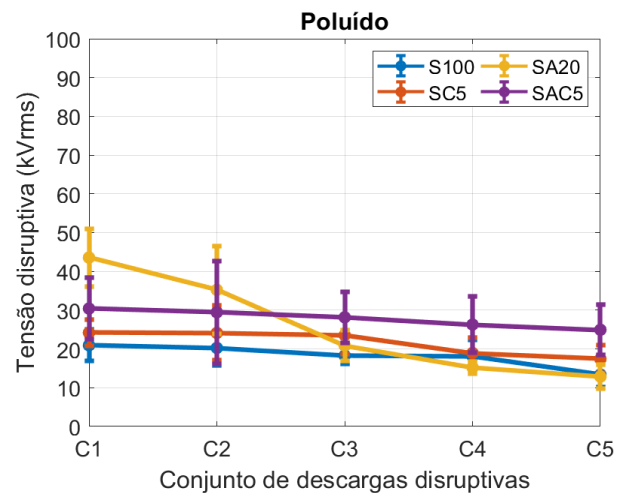


Fig. 7. Valores médios de descargas disruptivas sobre isoladores poluídos para cada conjunto de aplicação.

Quando se analisa a Fig. 7, verifica-se que a amostra de silicone puro (S100) apresentou valores médios de tensão disruptiva em torno de 20 kV para o primeiro conjunto de aplicação C1, reduzindo para valores próximos de 13 kV no conjunto de aplicação C5.

A adição da ATH ao silicone em concentrações de 20%, indicado pela amostra SA20, resultou nos maiores valores médios de tensão disruptiva quando comparado a amostra S100. Para o conjunto de medição C1 foram obtido valores médios de tensão disruptiva de 43 kV para a amostra SA20. No entanto, os valores de tensão disruptiva para a amostra SA20 tenderam a diminuir ao longo dos conjuntos de aplicação, atingindo desempenhos similares à amostra S100 a partir do conjunto C3, com valores médios de 21 kV, 15 kV e 13 kV para os conjuntos C3, C4 e C5, respectivamente.

A adição da cera de carnaúba ao silicone para concentrações de 5%, indicado pela amostra SC5, ocasionou um aumento dos valores médios da tensão disruptiva em relação à amostra S100. A amostra SC5 possuiu valores médios de tensão disruptiva próximos de 24 kV até o terceiro conjunto de aplicação (C3). Nos conjuntos C4 e C5 verificou-se pequenas reduções nos valores da tensão disruptiva para valores de 19 kV e 17,5 kV, respectivamente.

A adição da cera de carnaúba em concentrações de 5% à matriz do silicone juntamente com a ATH em concentrações de 20% (amostra SAC5) ocasionou a obtenção de valores médios de tensão disruptiva em torno de 30 kV para o conjunto de medição C1. O revestimento apresentou menor tendência de redução dos valores de tensão disruptiva quando comparado as demais amostras, atingindo valores médios de 25 kV no conjunto C5.

C. Tensão Aplicada sob Névoa

Na Fig. 8 é possível visualizar os valores da corrente de fuga medidos antes e após a aplicação de descargas disruptivas para a condição de limpo.

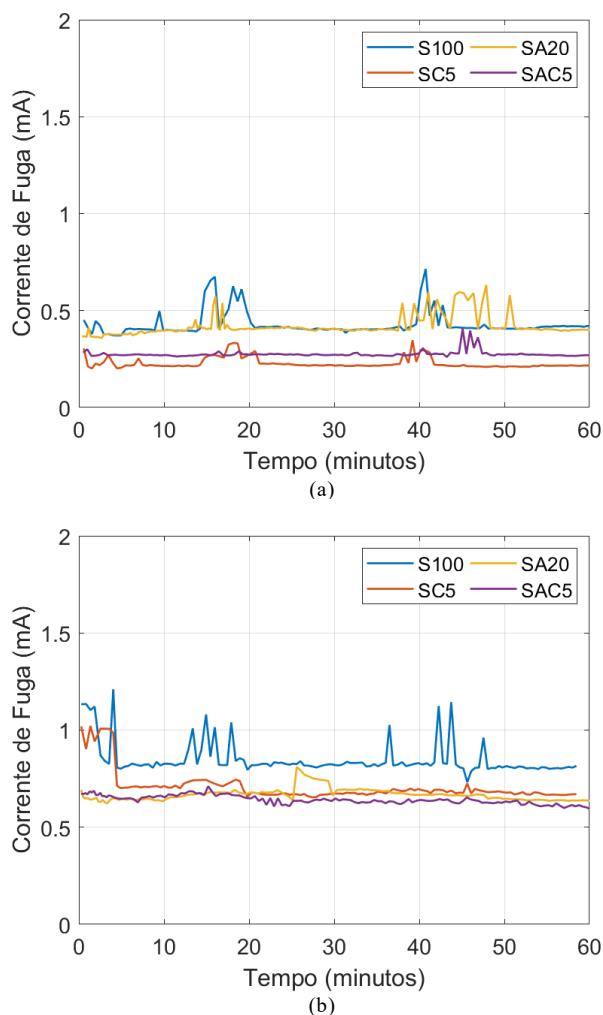


Fig. 8. Valores de pico das correntes de fuga medidos (a) antes e (b) após descargas disruptivas para isoladores com revestimento – Condição: isolador limpo.

Na Fig. 8a pode ser visto que, antes da aplicação das descargas disruptivas, todas as amostras apresentavam picos de corrente de fuga com valores inferiores a 0,6 mA. Quando se analisa os valores médios da corrente de fuga também pode ser visto que as amostras de silicone (S100) e silicone com ATH (SA20) apresentaram valores em torno de 0,4 mA. Constatou-se também que as amostras SC5 e SAC5 apresentaram valores médios em torno de 0,3 mA. As elevações repentinas nos valores medidos de corrente estão associadas à ocorrência de bandas secas na superfície do isolador.

Após a aplicação das descargas disruptivas para os isoladores limpos (Fig. 8b) constatou-se uma elevação nos valores da corrente de fuga para todas as amostras, com valores superiores a 0,6 mA. Quando se analisa individualmente os picos da corrente de fuga, constatou-se que a amostra S100 apresentou os maiores valores, com até 1,2 mA. A amostra de silicone adicionada da cera de carnaúba em concentração de 5% (SC5) apresentou uma intensificação dos valores de corrente de fuga nos instantes iniciais da medição.

Posteriormente, os valores de corrente de fuga reduziram e tenderam a estabilizar para valores em torno de 0,7 mA. As amostras SA20 e SAC5 apresentaram valores em torno de 0,7 mA durante todo o ensaio.

Na Fig. 9 é possível visualizar os valores da corrente de fuga medidos antes e após a aplicação de descargas disruptivas para a condição de poluição e por um período de uma hora.

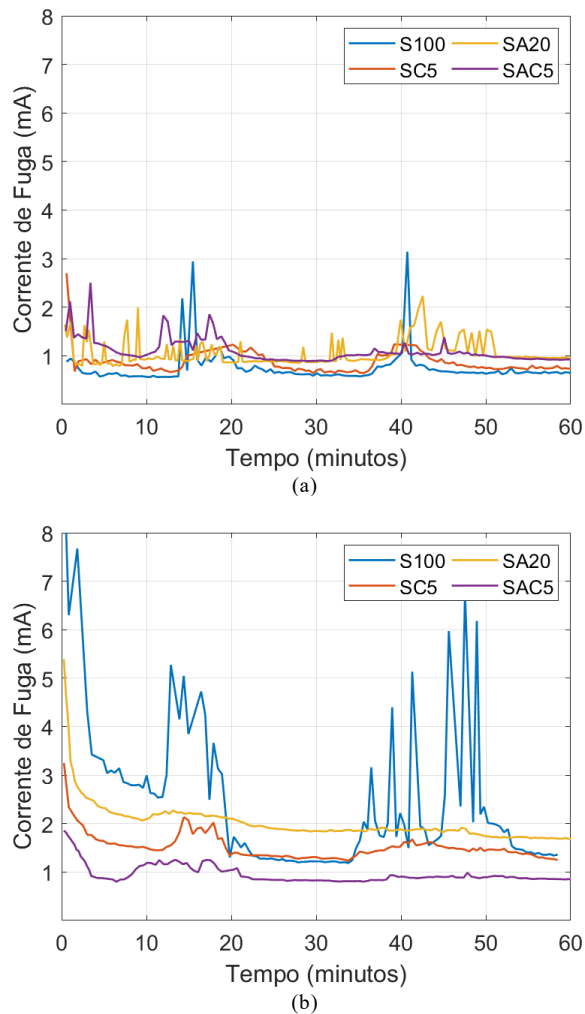


Fig. 9. Valores de pico das correntes de fuga medidos (a) antes e (b) após descargas disruptivas para isoladores com revestimento – Condição: isolador poluído.

Quando se analisa a Fig. 9a, constata-se que a adição de poluição aos isoladores resultou na medição de correntes de fuga com valores superiores aos indicados para isoladores limpos na Fig. 8, mesmo após a aplicação das descargas disruptivas (Fig. 8b). A amostra SC5 possuiu valores em torno de 1 mA durante toda a medição. As amostras SA20 e SAC5 possuíram valores de corrente de fuga variando de 1 mA até próximo de 2 mA. Para a amostra S100 foram observados valores de corrente de fuga de até 3 mA.

Após a aplicação das descargas disruptivas para os isoladores com poluição (Fig. 9b), constatou-se uma intensificação dos valores de corrente de fuga para todas as amostras, com valores variando de 1 mA a 8 mA,

aproximadamente. A amostra S100 apresentou o pior desempenho entre os revestimentos analisados, com elevados valores de corrente de fuga e atingindo picos de até 8 mA.

A adição de ATH ao silicone para concentração de 20% (SA20) proporcionou uma redução dos valores de corrente de fuga quando comparados à amostra S100. Para a amostra SA20, os valores de corrente de fuga variaram de 5,5 mA nos instantes iniciais do ensaio, reduzindo até valores em torno de 2 mA após 10 minutos de duração, permanecendo nesse patamar até o término do ensaio.

A adição da cera de carnaúba ao silicone em concentrações de 5% ocasionou uma redução nos valores da corrente de fuga quando comparadas as amostras S100 e SA20. Para a amostra SC5 foram verificados valores de corrente de fuga próximos de 3 mA nos instantes iniciais do ensaio, reduzindo para valores em torno de 1,5 mA ao longo do período de análise. A utilização conjunta da ATH e da cera de carnaúba com o silicone (amostra SAC5) resultou nos menores valores de corrente de fuga do conjunto de amostras analisado. Os valores de corrente variaram de 2 mA nos instantes iniciais do ensaio até estabilizar em valores próximos de 1 mA.

IV. CONCLUSÃO

A influência da aplicação de cera de carnaúba como carga na composição de revestimentos aplicados em isoladores de vidro sob condições de poluição foi investigada. Revestimentos constituídos por RTV-SIR com diferentes proporções da cera de carnaúba e ATH foram produzidos e isoladores de vidro com revestimento foram submetidos a ensaios de névoa com monitoramento da corrente de fuga e aplicação de descargas disruptivas para avaliar o desempenho das composições.

A análise dos valores da rigidez dielétrica indicou que os revestimentos contendo cera de carnaúba apresentaram elevados valores de rigidez dielétrica com valores médios entre 20 kV/mm e 25 kV/mm, similares aos revestimentos de silicone sem carga e adicionados de ATH, evidenciando que a cera de carnaúba não compromete a rigidez dielétrica.

A análise dos valores de tensão disruptiva permitiu evidenciar que a presença de poluição ocasiona uma redução significativa da suportabilidade dielétrica dos isoladores com revestimento. Além disso, a incorporação de cargas ao revestimento polimérico proporcionou melhores desempenhos ao isolamento elétrico sob condições de poluição. Os melhores desempenhos foram observados para a amostra SAC5 que possuíram valores em torno de 30 kV em condições de poluição, considerando todos os conjuntos de medição C1 a C5.

A avaliação dos valores de corrente de fuga evidenciou que a adição da cera de carnaúba aos revestimentos de RTV-SIR proporcionou uma redução nos níveis da corrente para condições de poluição, principalmente após o envelhecimento das amostras com a aplicação das descargas disruptivas.

Os resultados do ensaio de tensão disruptiva e o monitoramento da corrente de fuga sob névoa evidenciaram a potencialidade da aplicação da cera de carnaúba como carga em revestimento de RTV no aperfeiçoamento do isolamento

elétrico em condições de poluição.

Diante do exposto, a utilização da cera de carnaúba em revestimentos RTV representou uma alternativa para aplicações no isolamento elétrico. Contudo, durante a pesquisa foram encontradas algumas dificuldades associadas, principalmente, ao método ideal para proporcionar melhor dispersão e interação das cargas na matriz polimérica.

Como etapas futuras da pesquisa, pretende-se aprimorar as técnicas de processamento associados à obtenção dos revestimentos visando a otimização do desempenho elétrico e da durabilidade do material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de bolsas de estudo e de produtividade e pesquisa, à Capes, aos pesquisadores do Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG, ao professor Luiz H. Meyer e à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Copele) - UFCG.

REFERÊNCIAS

- [1] IEC 60815-1: "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - - Parte 1 Definitions, information and general principles", Genebra: IEC, 2008.
- [2] S. Braini, "Coatings for outdoor high voltage insulators", Tese de Doutorado. Cardiff University, 2013.
- [3] R. S. Gorur, E. A. Cherney and J. T. Burnham, "Outdoor Insulators", Phoenix, Ariz, USA: Ravi S. Gorur, 1999.
- [4] Suwarno and F. Pratomo, "Application of RTV Silicone Rubber Coating for Improving Performance of Ceramic Outdoor Insulator under Polluted Condition", In: 2009 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, IEEE, pp. 581-587, 2009.
- [5] P. B. Vilar, D. B. Araújo, M. A. O. Rodrigues, F. L. M. Andrade, T. V. Ferreira, E. G. Costa, F. S. Moreira and J. N. Caminha Filho. Caracterização térmica e elétrica de poluição salina em isoladores de vidro. IV Simpósio Brasileiro De Sistemas Elétricos-SBSE, 2012.
- [6] P.H.V. Rocha, E.G. Costa, A.R. Serres, G.V.R. Xavier, J.E.B. Peixoto and R.L. Lins. Inspection in overhead insulators through the analysis of the irradiated RF spectrum. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 113, pp. 355-361, 2019.
- [7] M. Farzaneh and W. A. Chisholm, "Insulators for icing and polluted environments", John Wiley & Sons, 2009.
- [8] L. H. Meyer, W. W. Beyer and F. H. Molina, "Salt fog testing of glass insulators with different surface conditions", In: 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. *IEEE*, pp. 1-4, 2013.
- [9] S. H. Kim, E. A. Cherney and R. Hackam, "Effects of filler level in RTV silicone rubber coatings used in HV insulators", *Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, vol. 27, no. 6, pp. 1065-1072, 1992.
- [10] J. Hall and T. Orbeck, "Evaluation of a new protective coating for porcelain insulators", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 12, pp. 4689-4696, 1982.
- [11] S. Ilhan and E. A. Cherney, "Comparative tests on RTV silicone rubber coated porcelain suspension insulators in a salt-fog chamber", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 3, pp. 947-953, 2018.
- [12] A. Natarajan, "Combating of Severe Pollution Problems on Transmission Lines without The Need for Composite Insulators", In: 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), IEEE, pp. 1-3, 2019.
- [13] A. Nekahi, S. G. McMeekin and M. Farzaneh. "Performance comparison of silicone rubber and EPDM insulators in humid and contaminated environments", In: 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD). IEEE, pp. 712-715, 2016.
- [14] S. H. Kim, E. A. Cherney and R. Hackam, "The loss and recovery of hydrophobicity of RTV silicone rubber insulator coatings", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1491-1500, 1990.

- [15] T. V. Ferreira, F. L. M. Andrade, G. R. S. Lira, E. G. Costa, G. S. Bolacell, M. A. Rosa, J. Pissolato Filho, C. M. B. Cordeiro, E. T. Wanderley Neto, M. J. Cinelli and E. L. Carvalho Junior. Laboratory Tests of a Composite Insulator Instrumented with Optical Fiber Sensors. In: The International Symposium on High Voltage Engineering. Springer, Cham, pp. 483-491, 2019.
- [16] S. Kumara and M. FERNANDO. Performance of outdoor insulators in tropical conditions of Sri Lanka. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 36, no. 4, pp. 26-35, 2020.
- [17] J. Kim and M. K. Chaudhury, "Corona-discharge-induced hydrophobicity loss and recovery of silicones", In: 1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, *IEEE*, p. 703-706, 1999.
- [18] L. H. Meyer, S. Jayaram and E. A. Cherney, "Thermal conductivity of filled silicone rubber and its relationship to erosion resistance in the inclined plane test", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, no. 4, pp. 620-630, 2004.
- [19] I. P. Almirall, "Empleo Conjunto de Cargas Micrométricas y Nanométricas para Mejorar el Desempeño de la Silicona Vulcanizada a Temperatura Ambiente Empleada para Recubrir el Aislamiento Externo", Tese de Doutorado. Instituto Superior Politécnico José Antónío Echeverría, La Habana, Cuba, 2013.
- [20] Y. Jeon, S. K. Hong and M. Kim, "Effect of Filler Concentration on Tracking Resistance of ATH-Filled Silicone Rubber Nanocomposites", *Energies*, vol. 12, no. 12, p. 2401, 2019.
- [21] G. Momen and M. Farzaneh, "Study of ice accumulation on nanocomposite semiconducting coatings", In: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), *IEEE*, pp. 1-4, 2010.
- [22] F. Madidi, G. Momen and M. Farzaneh, "Development of a Stable TiO₂ Nanocomposite Self-Cleaning Coating for Outdoor Applications", *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2016, 2016.
- [23] U. Asad, S. Amin, M. H. Aziz, M. Awais, T. Rahman, and H. A. Awan. The tracking and erosion performance of silicone rubber incorporated with novel TiO₂@ SiO₂ core-shell nano fillers under the IEC 60587 standard. *Materials Research Express*, vol. 7, no. 2, p. 025006, 2020.
- [24] S. Manjang, R. P. Putera, Y. S. Akil and I. Kitta, "Electrical and Mechanical Properties of Fly Ash Filled Silicone Rubber for High Voltage Insulator", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 17, pp. 7320-7327, 2015.
- [25] S. Tepsila and A. Suksri, "Silicone rubber insulator using organic filler from golden apple snail shells", *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 10, no. 3S, pp. 785-792, 2018.
- [26] P. Khaigunha, T. Wongwuttanasatian, and A. Suksri. "Effects of Micro-Eggshells Filler on Tracking and Erosion Resistance of Silicone Rubber Composites." *Key Engineering Materials*. vol. 846. Trans Tech Publications Ltd, 2020.
- [27] M. T. Nazir, B. T. Phung, S. Yu and S. Li, "Effects of thermal properties on tracking and erosion resistance of micro-ATH/AIN/BN filled silicone rubber composites", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 6, pp. 2076-2085, 2018.
- [28] J. Zheng, S. He, J. Wang, W. Fang, Y. Xue, L. Xie, and J. Lin. Performance of Silicone Rubber Composites Filled with Aluminum Nitride and Alumina Tri-Hydrate. *Materials*, v. 13, n. 11, p. 2489, 2020.
- [29] ALCOA. Catálogo de Produtos - Hydrogard GP. [Online]. Disponível em: <https://dtsheet.com/doc/1548665/hydrogard-gp>, acessado em: 25 Set. 2020.
- [30] J. A. M. Júnior and L. G. A. Marques. Cera de Carnaúba. *Cadernos de Prospecção*, vol. 2, no. 1, pp. 36, 2009.
- [31] Momentive Performance Materials. Technical Data Sheet RTV615 and RTV655. USA, 2007.
- [32] ASTM. D149: "Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies". West Conshohocken: ASTM, 2013.
- [33] CIGRE WG C4.303: "Artificial Pollution Test for Polymer Insulators", CIGRE Technical Brochure, no. 555, 2013.
- [34] IEC 60507: "Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on ac systems". Geneva: IEC, 2013.



Raphael B. Nóbrega possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (2014), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (2016), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pelas Faculdades Integradas de Patos (2017) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (2019). Suas áreas de interesse são: equipamentos de alta tensão, sistemas de isolamento, nanotecnologia, sistemas de monitoramento e diagnóstico.



Edson G. Costa é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande e membro do IEEE, SBA e CIGRÉ. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1978), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1981) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1999). Suas áreas de interesse são: alta tensão, campos elétricos, descargas parciais, para-raios, isoladores, transformadores, disjuntores e sistemas de aterramento.



André D. Germano é professor adjunto da Universidade Federal de Campina Grande. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (2009), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (2010) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Technische Universität München (2015). Suas áreas de interesse são: equipamentos de alta tensão, sistemas de isolamento, nanotecnologia, engenharia de materiais, diagnóstico de isolamento, redes neurais artificiais e outros métodos de aprendizado de máquina e reconhecimento de padrões.



Ítalo O. Medeiros é aluno de graduação do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. Suas áreas de interesse são: isolamento elétrico, sistemas de potência, monitoramento de equipamentos de potência, sistemas de aterramento e controle e automação.