Inclined Plane Test for Erosion of Polymeric Insulators Under AC and DC Voltages

R. Pintarelli, and L. Meyer, Senior Member, IEEE

Abstract—In this paper a study on effects of AC and DC dry band arcing on silicone rubber insulators' surface is presented. The insulators tested are commercially available, having as their main material silicone rubber with alumina trihydrate as an additive. In addition to a literature analysis, experiments were performed following the inclined plane test method described in ASTM D2303. It was found that the voltage type (AC or DC) and polarity (positive or negative) influence not only the damage caused by the dry band arcing, but also the average value and the behavior of the leakage current. The voltage type that caused the most damage on the insulating material was DC with positive polarity, followed by DC with negative polarity, then AC. According to other studies, the difference in the results obtained with different voltage types are mainly caused by the ion release on the electrodes, behavior of the contaminant under the electric field and the length and duration of the dry band arcs. This shows that silicone rubber insulators should not be utilized in DC systems with the same voltage as the one they are designed to withstand under AC, unless modifications are made in the material properties or in the insulator's design.

Index Terms—Dry band arcing, Inclined plane test, Polymeric insulators.

I. INTRODUÇÃO

UMA das vantagens da utilização de materiais poliméricos como borracha de silicone e borracha EPDM (etilenopropileno-dieno) em isoladores de alta tensão é o fato de que estes dois materiais possuem superfícies hidrofóbicas, o que dificulta a formação de caminhos condutores em suas superfícies quando submetidos a ambientes de alta umidade ou chuva, reduzindo a corrente de fuga e a frequência de descargas de banda seca. Tanto a borracha de silicone quanto a borracha EPDM apresentam hidrofobicidade inicialmente, porém o envelhecimento e a exposição prolongada a condições como contaminação, radiação ultravioleta e umidade tendem a fazer com que essa propriedade diminua com o tempo.

A borracha de silicone possui a característica de manter sua hidrofobicidade por períodos mais longos que a borracha EPDM, e além disso tem a capacidade de regenerar sua hidrofobicidade caso sua superfície seja danificada (mecanicamente ou por descargas elétrica), levando para isso períodos que variam de algumas horas a alguns dias dependendo da composição, porém esse processo ocorre apenas um número limitado de vezes [1].

Os isoladores poliméricos foram inicialmente concebidos para aplicações em sistemas de corrente alternada e ainda são utilizados em tais aplicações na maioria dos casos, porém recentemente está surgindo uma preocupação quanto as implicações do emprego destes em sistemas de alta tensão em corrente contínua (CCAT), ou do inglês HVDC (*High Voltage Direct Current*). Na literatura é possível encontrar estudos sobre o comportamento de isoladores poliméricos quando submetidos a tensões contínuas e alternadas no ensaio de plano inclinado [2-6]. Porém, não foram encontrados estudos similares realizados no Brasil, utilizando materiais disponíveis comercialmente.

Em [2], os autores realizaram ensaios de plano inclinado em borracha de silicone com a aplicação de tensões contínuas e alternadas. Nesses ensaios, os autores modificaram o método de ensaio em plano inclinado originalmente descrito na norma ASTM D2303. Ao invés de prenderem as amostras em suportes inclinados em 45°, o ângulo utilizado foi de 90°, sendo que os autores justificam essa mudança afirmando que isso aumenta a intensidade das descargas que ocorrem na superfície dos materiais testados. Utilizando uma câmera infravermelha, os autores de [2] analisaram o comportamento das descargas durante os ensaios, e concluíram que as descargas causadas por tensões contínuas possuem menor comprimento, porém atingem maiores temperaturas e causam danos mais severos aos materiais. Ainda, em outro estudo, a resistência mecânica da borracha de silicone utilizada em isoladores poliméricos é gradualmente reduzida com o aumento da temperatura [7].

Em [3], os autores realizaram ensaios de plano inclinado em amostras de borracha de silicone com aditivo de sílica, nas concentrações de 0%, 10% e 30%, e com a aplicação de tensão alternada (CA), contínua com polaridade positiva (CC+), e contínua com polaridade negativa (CC-). Para quantificar seus resultados, os autores utilizaram a medida de tensão inicial de trilhamento, descrita na norma ASTM D2303. Após a realização dos ensaios, os autores concluíram que a aplicação de CC+ e CC- causa trilhamento no material em tensões mais baixas do que a aplicação de CA, sendo que a aplicação de CC+ foi a que apresentou valores mais baixos de tensão inicial de trilhamento, em todos os testes realizados. Os autores notaram também que a concentração de aditivo de sílica no material não altera este comportamento.

The authors would like to acknowledge Germer Insulators and the High Voltage Laboratory at University of Blumenau.

R. F. Pintarelli is an undergraduate student in Electrical Engineering at Universidade Regional de Blumenau. (FURB), in Blumenau, Santa Catarina, Brazil (e-mail: renzopintarelli@gmail.com).

L. H. Meyer is with the Department of Electrical Engineering at Universidade Regional de Blumenau (FURB), in Blumenau, Santa Catarina, Brazil (e-mail: meyer@furb.com).

Nos estudos dos autores de [4], a conclusão alcançada é que, no ensaio de plano inclinado, a tensão inicial de trilhamento com a aplicação de CC+ é, em média, 67% da tensão inicial de trilhamento CA. Enquanto isso, a tensão inicial de trilhamento com a aplicação de CC- é, em média, equivalente a 87% da tensão inicial de trilhamento CA. Isso mostra que, com a aplicação de tensões contínuas, a tendência é que o trilhamento ocorra em valores de tensão mais baixos.

De forma geral, a conclusão alcançada é de que os materiais poliméricos comumente utilizados como isolantes sofrem degradação acelerada quando a tensão aplicada é contínua (tanto de polaridade positiva quanto negativa). A diferença na degradação entre a aplicação de CC e CA depende do tipo de material e de possíveis aditivos presentes nele, além de outros parâmetros relacionados ao tipo de ensaio utilizado para avaliar o desempenho do material. Dessa forma, para que a utilização de isoladores poliméricos em sistemas de alta tensão contínua seja realizada de forma confiável e previsível, são necessários estudos do comportamento dos materiais sob os diferentes tipos de tensão e eventualmente modificações em suas composições ou perfil para mitigar os problemas encontrados.

Assim, o objetivo deste trabalho é o de avaliar a resistência ao trilhamento e à erosão de materiais poliméricos utilizados em isoladores comercialmente disponíveis. Para isto são relatados os resultados de ensaios de plano inclinado executados em amostras de borracha de silicone com aditivo de trihidrato de alumina. As amostras utilizadas foram retiradas de isoladores comerciais (novos e nunca utilizados em campo), diferentemente da maioria dos ensaios de plano inclinado relatados na literatura, que utilizam amostras de materiais isolantes que não passaram pelo processo de fabricação de isoladores, como em [2-6]. Além disso, o material testado se trata de um polímero fabricado em território brasileiro, sendo que são raros os relatos na literatura de ensaios de plano inclinado realizados com materiais feitos neste país.

Além dos relatos dos ensaios executados, são discutidas informações presentes na literatura que indicam as causas dos fenômenos observados.

II. MATERIAL E MÉTODOS

A. Equipamentos Utilizados

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Regional de Blumenau (FURB), em Blumenau, SC, sendo que os equipamentos utilizados são de propriedade da universidade.

Um diagrama esquemático da disposição dos equipamentos utilizados para realizar os ensaios é apresentado na Fig. 1. Como fonte de alta tensão foi utilizado um transformador elevador monofásico (relação 220/13.333 V) alimentado por um regulador de tensão manual (variac). A alta tensão é levada até o quadro onde estão localizados os resistores limitadores de corrente e os fusíveis, de onde é distribuída para as cinco amostras que serão testadas. Nos ensaios onde é empregada corrente contínua são utilizados um retificador de meia onda e um capacitor de filtragem de 1,5 μ F entre o transformador elevador e o quadro de resistores e fusíveis.

Para fornecer um fluxo constante de contaminante às amostras testadas foi utilizada uma bomba peristáltica. Foram

utilizados cinco suportes para acomodar as amostras de material isolante.



Fig. 1. Diagrama esquemático da disposição dos equipamentos do ensaio de plano inclinado.

O suporte é formado por uma base isolante (cerâmica) inclinada em 45° e dois eletrodos, que ficam em contato com a amostra de material isolante, conforme a norma ASTM D2303 [8]. Os cabos de alta tensão vindos do quadro de resistores limitadores são conectados nos eletrodos superiores dos suportes. Entre o eletrodo superior e a amostra de material isolante são colocadas oito camadas de papel filtro e entre elas foi inserida a mangueira que fornece o contaminante. O eletrodo inferior é conectado a um resistor *shunt* (protegido por um varistor), que permite a medição da corrente durante os ensaios.

Um sistema supervisório foi criado na plataforma *LabView*® para monitorar os experimentos em tempo real. Esse sistema foi utilizado para monitorar a corrente de quatro das cinco amostras do experimento, por limitações no número de canais do sistema de aquisição. Isto impossibilita a análise da correlação entre a corrente de fuga e grau de trilhamento/erosão para a quinta amostra. Ressalta-se, porém, que o resultado mais importante do ensaio é o volume erodido, e este pôde ser medido para todas as cinco amostras. A taxa de aquisição utilizada foi de 3.000 amostras por segundo. Valores eficazes de tensão e corrente foram calculados a cada um segundo e salvos em um arquivo, juntamente com valores instantâneos de corrente. Os valores salvos nos arquivos foram analisados posteriormente no software Microsoft Excel®.

A medição do volume erodido das amostras foi realizado seguindo o método proposto na norma ASTM D2303. Esse método consiste em preencher as fendas das amostras, causadas pela erosão durante o ensaio, com uma massa de densidade conhecida. Após isso, a massa que preencheu cada uma das fendas é pesada em uma balança de precisão, e dessa forma pode ser determinado o volume erodido de cada amostra.

B. Preparação das Amostras

O teste foi realizado com amostras de borracha de silicone com adição de trihidrato de alumina, material utilizado na fabricação de isoladores poliméricos de ancoragem comerciais. O isolador do qual foram extraídas as amostras (novo e nunca utilizado em campo) pode ser visto na Fig. 2. Na mesma figura é apresentada também uma amostra já preparada para o ensaio. As amostras foram extraídas das saias do isolador, sendo que cada saia foi dividida em duas amostras, e em cada ensaio foram utilizadas 5 amostras.



Fig. 2. Isolador do qual foram extraídas as amostras utilizadas nos ensaios (acima) e exemplo de amostra (abaixo).

Antes da realização dos ensaios todos os isoladores foram lavados com água corrente e em seguida limpos com um algodão e etanol, a fim de retirar qualquer contaminação de sua superfície. Pelo fato das amostras serem provenientes de um isolador comercial, existe uma pequena diferença de espessura entre as extremidades das mesmas. Por esse motivo, as amostras precisaram ser cuidadosamente ajustadas no suporte inclinado, de modo a fazer com que o fluxo de contaminante estabelecido em sua superfície formasse um caminho retilíneo entre os eletrodos (sem desviar para as laterais ou fazer curvas), mantendo assim o caminho líquido de 50 mm especificado pela norma ASTM D2303.

C. Composição do Contaminante

O contaminante utilizado nos testes é composto por água deionizada com adição de 0,1% (da massa) de cloreto de amônia (NH4Cl) e 0,02% (da massa) de agente umectante não iônico (condensado de óxido de etileno octifenol), conforme a norma ASTM D2303.

D. Execução dos Ensaios

O ensaio de plano inclinado foi executado três vezes, visando realizar a comparação entre os resultados obtidos com a aplicação de tensão alternada 60 Hz (CA), contínua com polaridade positiva (CC+) e contínua com polaridade negativa (CC-). Os ensaios realizados foram guiados pelo método de tensão variável apresentado na norma ASTM D2303 [8], porém o tempo de ensaio foi limitado a 14.000 s, ou seja, aproximadamente 3 horas e 52 minutos. Em cada ensaio foram testadas cinco amostras de material isolante. A tensão inicial foi estabelecida em 2 kV (valor médio de tensão nos ensaios com aplicação de CC, e valor eficaz de tensão em 60 Hz nos ensaios com aplicação de CA), conforme norma. Ainda seguindo a mesma norma, esta tensão foi elevada em 250 V após cada hora de ensaio, chegando ao valor de 2.750 V após 3 horas, sendo esse valor mantido até o fim do experimento. O fluxo de contaminante foi ajustado em 0,15 ml por minuto em todos os ensaios realizados, e a distância entre o eletrodo superior e inferior foi mantida em 50 mm (valores definidos pela norma).

E. Análise dos Dados Numéricos

É proposta na literatura o cálculo de um indicador que permite comparar a energia liberada pelas descargas de banda

seca em cada uma das amostras, de tal forma que quanto maior o valor desse indicador, maior a energia liberada pelas descargas durante o ensaio. Esse indicador é calculado pela razão entre o desvio padrão do valor eficaz da corrente (σ i) e o valor médio da mesma (i') [9].

As Equações (1), (2) e (3) apresentam como foram calculados, respectivamente, a média aritmética dos valores eficazes de corrente (i'), o desvio padrão do valor eficaz corrente (σi) e o indicador de energia das descargas (IED), onde i[n] representa o enésimo valor eficaz de corrente medido durante cada um dos ensaios e N representa o número total de valores de corrente eficaz medidos.

$$i' = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} i[n]$$
 (1)

$$\sigma i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} [i[n] - i']^2}$$
(2)

$$IED = \frac{\sigma i}{i'} \tag{3}$$

Esse indicador se baseia no fato de que corrente de fuga das amostras se comporta de duas formas diferentes, dependendo do estado dos filamentos de contaminante sobre suas superfícies. Quando o filamento de contaminante é contínuo desde o eletrodo superior até o eletrodo inferior, criando um caminho elétrico sem interrupção (sem ocorrência de descargas de banda seca), a corrente que se estabelece possui característica resistiva. Porém, quando surgem bandas secas a corrente passa a apresentar característica pulsante, causando oscilações no gráfico do valor eficaz da corrente, o que é reflexo do surgimento de descargas de banda seca e da interrupção momentânea na corrente que ocorre após a extinção das descargas. Logo, o desvio padrão do valor eficaz da corrente (que depende das oscilações no valor) pode ser relacionado com a ocorrência de descargas de banda seca.

Para calcular o indicador o desvio padrão é dividido pelo valor médio da corrente durante o ensaio, para normalizá-lo. Esse indicador não fornece informação absoluta da energia, porém pode ser utilizado para comparar o efeito do tipo de tensão aplicada (CA, CC+ ou CC-) na energia total das descargas de banda seca, levando em consideração a frequência com que elas ocorrem e o valor da corrente em cada uma delas. O resultado deve refletir a erosão causada nas amostras pelas descargas, pois o calor gerado por estas é a principal causa dos danos.

O cálculo do indicador de energia das descargas foi utilizado para relacionar o comportamento da corrente de fuga das amostras com o volume erodido de cada uma delas.

III. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A. Resultados Experimentais

Na Fig. 3 são apresentadas as amostras resultantes do ensaio de plano inclinado com aplicação de CA.



Fig. 3. Amostras após ensaio com aplicação de CA.

Na Fig. 4 é apresentado o gráfico do valor eficaz da corrente de uma das amostras (a corrente de fuga das demais amostras apresentaram comportamento similar) durante o ensaio com aplicação de CA. A curva de cor cinza representa o valor eficaz calculado a cada um segundo, enquanto a curva de cor preta representa a média móvel do valor eficaz da corrente [10]. A média móvel é calculada conforme a Equação (4), sendo que essa média é calculada para cada 81 segundos, equivalente a 81 amostras. O valor de 81 segundos foi escolhido de tal forma a ser grande o suficiente para filtrar as oscilações de alta frequência causadas pelas descargas de banda seca. Essa informação permite analisar a tendência do valor da corrente durante o ensaio.



Fig. 4. Comportamento do valor eficaz da corrente e média móvel da mesma durante o ensaio (CA).

$$y(n) = \frac{1}{k+1} \sum_{i=-k/2}^{k/2} x(n+i)$$
(4)

Em todas as amostras o valor eficaz da corrente se mantém (em média) em torno de 5 mA. Conforme o tempo avança e a tensão é aumentada, o valor eficaz da corrente não sofre variação perceptível (em média), porém é possível observar que seu valor passa a oscilar com maior frequência.

Na Fig. 5 são apresentadas as amostras resultantes do ensaio de plano inclinado com aplicação de CC+.

Visualmente é possível notar que o volume erodido no ensaio com aplicação de CC+ é consideravelmente maior do que no ensaio com CA, e confirmado pelos resultados apresentados na seção III.B, dos valores de volume erodido de cada amostra, que foram medidos após os ensaios. É importante notar que o formato da região erodida das amostras 0, 1, 2 e 3 é alongado em direção ao eletrodo superior, o que indica que ocorreu trilhamento. Na amostra 4 (última da esquerda para a direita) ocorreu desvio do fluxo de contaminante pela lateral da amostra, criando um caminho alternativo para a corrente de fuga e invalidando os resultados. A causa mais provável desse inconveniente é forma irregular das aletas do isolador comercial do qual as amostras foram retiradas.



Fig. 5. Amostras após ensaio com aplicação de CC+.

Na Fig. 6 é apresentado o comportamento do valor eficaz da corrente de uma das amostras do ensaio de plano inclinado com aplicação de CC+. A curva de cor cinza representa o valor eficaz (calculados a cada um segundo), já a curva de cor preta representa a média móvel dos valores eficazes, para facilitar a visualização. Nota-se que o valor eficaz da corrente se mantém entre 4 mA e 5 mA, porém a oscilação no seu valor instantâneo é consideravelmente maior do que no caso da aplicação de tensão alternada, com picos de corrente mais recorrentes, o que indica ocorrência mais frequente de descargas de banda seca [2].



Fig. 6. Comportamento do valor eficaz da corrente e média móvel da mesma durante o ensaio (CC+).

Após cada um desses picos o valor da corrente cai para valores próximos a zero, que é quando ocorre a extinção do arco gerado pela descarga de banda seca, porém a corrente rapidamente volta a se estabelecer quando o fluxo de contaminante fecha o circuito novamente.

Na Fig. 7 a são apresentadas as amostras resultantes do ensaio de plano inclinado com aplicação de CC-.



Fig. 7. Amostras após ensaio com aplicação de CC-.

Pode-se observar pela comparação das Fig. 3 e Fig. 7 que a erosão causada no ensaio com aplicação de CC- é levemente

superior a erosão gerada no ensaio com aplicação de CA. Essa percepção é confirmada pelos resultados apresentados na seção III.B. Na Fig. 8 é apresentado o comportamento do valor eficaz da corrente em uma das quatro amostras no ensaio de plano inclinado com aplicação de CC-. A curva de cor cinza representa o valor eficaz da corrente, enquanto a curva de cor preta representa a média móvel dos valores eficazes de corrente.



Fig. 8. Comportamento do valor eficaz da corrente e média móvel da mesma durante o ensaio (CC-).

Neste caso a média móvel dos valores eficazes das correntes nas quatro amostras ficaram em torno de 4 mA. Os valores eficazes oscilaram numa frequência maior do que no caso do ensaio com CA, porém menor do que no ensaio com aplicação de CC+. É possível notar que os picos de corrente, que ocorrem durante as descargas de banda seca, possuem valores menores em comparação aos valores de pico do ensaio com aplicação de CA e CC+.

B. Comparação dos Resultados

Na norma ASTM D2303 [7] é apresentado um método para determinar o volume erodido de cada amostra para ser possível realizar comparações quantitativas. Esse método consiste em remover quaisquer resíduos das cavidades formadas pela erosão durante os ensaios, preencher completamente os espaços com uma massa plástica moldável e, após isso, utilizar uma balança de precisão para medir o peso da massa que preencheu as cavidades de cada uma das amostras. Conhecendo a densidade da massa é possível então calcular o volume erodido de cada amostra. Esse processo foi realizado para as amostras testadas e os volumes erodidos são apresentados na Tabela I. São apresentados também o valor médio de cada ensaio e o desvio padrão (D.P.).

O valor do volume erodido da amostra 4 do ensaio CC+ corresponde a amostra na qual ocorreu desvio do contaminante pela lateral, sendo um resultado inválido e não computado na média e no desvio padrão. As amostras da linha "Amostra 0" são as amostras das quais não foi possível realizar a medição de corrente de fuga, conforme indicado anteriormente.

Em média o volume erodido no ensaio de plano inclinado com aplicação de CC+ é consideravelmente maior do que nos outros ensaios, como já podia ser observado nas Figuras 3, 5 e 7. O volume erodido no ensaio com aplicação de tensão contínua negativa é maior do que no ensaio com aplicação de tensão alternada. No entanto, no primeiro caso (CC-) os valores eficazes das correntes nas amostras são menores, em média, do que no segundo caso (CA).

Amostra	Ensaio CA	Ensaio CC+	Ensaio CC-
0	9,44 mm ³	251,86 mm ³	39,35 mm ³
1	17,31 mm ³	170,00 mm ³	18,02 mm ³
2	5,90 mm ³	177,09 mm ³	15,74 mm ³
3	30,69 mm ³	250,28 mm ³	45,65 mm ³
4	14,17 mm ³	41,71 mm ³	25,19 mm ³
Média	15,51 mm ³	212,31 mm ³	27,93 mm ³
D.P.	8,54 mm ³	38,85 mm ³	13,30 mm ³

Os ensaios em plano inclinado realizados, com aplicação de CA, CC+ e CC-, mostraram que o tipo de tensão aplicada afeta tanto o volume erodido quanto o comportamento da corrente de fuga que se estabelece pelas amostras. Na Tabela II são apresentadas as médias aritméticas dos valores eficazes das correntes de fuga (durante toda a duração dos ensaios) das quatro amostras cujas correntes foram monitoradas pelo sistema.

TABELA II Média dos valores eficazes das correntes durante os ensaios						
Amostra	Ensaio CA	Ensaio CC+	Ensaio CC-			
1	5,88 mA	4,01 mA	3,84 mA			
2	5,73 mA	3,58 mA	4,55 mA			
3	5,41 mA	4,46 mA	3,69 mA			
4	4,97 mA	4,16 mA	3,86 mA			
Maior	5,88 mA	4,46 mA	4,55 mA			
Menor	4.97 mA	3.58 mA	3.69 mA			

Como pode ser visto, o quão elevado é o valor da corrente de fuga não influencia diretamente a erosão, pois as amostras que apresentaram os maiores valores de corrente de fuga (ensaio CA) foram aquelas que menos sofreram erosão.

Outra diferença observável nas formas de onda das correntes é nas distorções/pulsações nos diferentes ensaios. O desvio padrão pode ser utilizado como uma forma de quantificar as oscilações dos valores de corrente. A Tabela III apresenta os desvios padrão dos valores eficazes das correntes durante os três ensaios realizados.

As pulsações no valor eficaz da corrente de uma amostra são causadas pela ocorrência de descargas de banda seca [2], e essas oscilações se mostraram consideravelmente mais frequentes no ensaio com aplicação de CC+ do que nos demais, conforme pode ser visto na Tabela III. No ensaio com aplicação de CC- as oscilações no valor da corrente foram menos frequentes do que no ensaio CC+, porém ainda foram mais recorrentes do que no ensaio com aplicação de CA.

Utilizando os valores de desvio padrão e média dos valores de corrente, é possível calcular o indicador de energia das descargas (IED) proposto na literatura [9].

Os autores do método afirmam que tal indicador pode ser utilizado para comparar a energia liberada pelas descargas de banda seca durante diferentes ensaios de plano inclinado, o que deve refletir nos volumes erodidos. Na Fig. 9 são apresentadas as quantidades de volume erodido das amostras 1, 2, 3 e 4 nos três ensaios (CC+, CC- e CA, nesta ordem). Na Fig. 10 são apresentados os indicadores calculados para as mesmas amostras.

TABELA III DESVIO PADRÃO DOS VALORES EFICAZES DAS CORRENTES DURANTE OS ENSAIOS

Amostra	Ensaio CA	Ensaio CC+	Ensaio CC-
1	1,85 mA	4,56 mA	2,59 mA
2	1,84 mA	4,73 mA	3,27 mA
3	2,72 mA	4,95 mA	3,14 mA
4	1,94 mA	5,03 mA	2,2 mA
Maior	2,72 mA	5,03 mA	3,27 mA
Menor	1,84 mA	4,56 mA	2,2 mA



Fig. 9. Volumes erodidos das amostras dos ensaios.



Fig. 10. Indicadores IED calculados para as amostras dos ensaios.

Pode ser observado que existe relação entre as erosões verificadas e os valores calculados para os indicadores de cada amostra, porém essa relação evidentemente não é linear. O coeficiente de correlação calculado entre o indicador IED e a erosão das amostras é de 0,85, indicando uma correlação forte. A não linearidade entre o IED e o volume erodido indica que existem outros fatores que influenciam a forma como o material é erodido além da energia total das descargas, como por exemplo a duração média e o comprimento das mesmas [2, 3, 9].

C. Discussão dos Resultados

Observou-se que as amostras testadas com CC+ foram as que mais sofreram erosão, seguidas pelas amostras testadas com CC- e por último as testadas com CA. Tais resultados condizem com o que foi observado por outros trabalhos da área [2-5], tanto em experimentos laboratoriais quanto medições em campo. As diferenças observadas entre os volumes erodidos das amostras de diferentes ensaios possuem mais de uma causa. Durante os ensaios ocorre liberação de íons metálicos no eletrodo positivo por reações eletroquímicas [2, 3], o que aumenta a condutividade do contaminante e dos arcos gerados pelas descargas de banda seca, fazendo com que estes tenham maiores durações e valores mais elevados de corrente. Esta liberação de íons durante os ensaios causou, inclusive, erosão perceptível dos eletrodos nos pontos de contato com o fluxo de contaminante. Porém, como não foram realizadas medidas de perda de massa dos eletrodos, não é possível apresentar dados numéricos a respeito da erosão dos mesmos. A liberação de íons metálicos afetará a condutividade do contaminante e dos arcos (durante o ensaio de plano inclinado) somente se ela ocorrer no eletrodo superior, pois o contaminante flui deste em direção ao eletrodo inferior. Dessa forma, esse fenômeno tende a aumentar a condutividade do contaminante nos ensaios com aplicação de CC+ e CA (no caso da aplicação de CA o eletrodo superior possui polaridade positiva durante metade de cada ciclo da tensão). Outro fenômeno que altera a resistência do canal de contaminante é a expulsão de gotículas de contaminante da sua trajetória principal, que é causada pelo fenômeno conhecido como instabilidade do contaminante [2, 3,4]. Esse fenômeno ocorre quando as forças geradas pelo campo elétrico sobre o contaminante líquido superam a força capilar que faz este aderir a superfície da amostra. O efeito ocorre com maior intensidade conforme a tensão é elevada. A expulsão de contaminante de sua trajetória principal aumenta a resistência elétrica do canal líquido formado entre os eletrodos, o que pode influenciar os resultados do experimento. O volume de contaminante expulso de sua trajetória por esse efeito é maior nos ensaios com aplicação de CC- do que nos ensaios com aplicação de CC+ e CA, enquanto que entre esses dois a aplicação de CA causa maior expulsão. Através de ensaios percebeu-se que com o aumento da vazão de contaminante a diferença de expulsão observada entre os três tipos de tensão diminui, consequentemente reduzindo o efeito desse fenômeno nos resultados dos ensaios [2]. Utilizando câmeras infravermelhas é possível analisar os comprimentos das descargas de banda seca no ensaio de plano inclinado, e dessa forma é possível notar que com a aplicação de tensão contínua as descargas possuem menor comprimento, liberando calor de forma mais concentrada que nos ensaios com aplicação de tensão alternada [2,9]. Dessa forma, por serem menores, as descargas causadas por tensão contínua atingem temperaturas mais elevadas. Foi observado também que as descargas de maior temperatura e maior duração são as causadas por aplicação de CC+.

Tanto os experimentos realizados quanto a literatura mostram que a aplicação de tensão contínua tende a acelerar o desgaste de isoladores poliméricos, dessa forma, para que seja possível aplicar estes em sistemas HVDC de forma confiável e segura, medidas devem ser tomadas para reduzir os efeitos das descargas elétricas na superfície dos isoladores, especialmente descargas de corrente contínua. Uma das soluções já propostas é a de aumentar o comprimento dos isoladores poliméricos quando estes forem empregados em sistemas de tensão contínua, seguindo critérios que envolvem as diferentes tensões iniciais de trilhamento para cada tipo de tensão, porém foi observado que erosões severas continuam ocorrendo quando CC é aplicada [9].

Outra maneira de abordar o problema é alterar o material utilizado ou sua composição. É comum o emprego de aditivos inorgânicos nos materiais poliméricos utilizados em isoladores, como exemplo o trihidrato de alumina e a sílica. Estes aumentam a condutividade térmica e a estabilidade térmica do material, diminuindo assim os danos causados por descargas elétricas. Além disso, algumas substâncias, como o trihidrato de alumina, sofrem reações químicas de desidratação quando atingem determinadas temperaturas (aproximadamente 220 °C no caso do trihidrato de alumina), liberando moléculas de água que absorvem e dissipam parte do calor gerado pelas descargas elétricas.

Apesar do emprego de borracha de silicone em isoladores ser muito comum, estudos mostram que outros materiais possuem características interessantes, como a borracha de etilenopropileno-dieno (EPDM), que possui maior resistência a descargas causadas por CC, o que pode torná-la uma alternativa viável para a fabricação de isoladores de alta tensão especiais para aplicações em sistemas HVDC [6].

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizados testes de trilhamento e erosão em amostras de materiais poliméricos retirados de isoladores comercialmente disponíveis. Neste sentido o trabalho é inédito e não existe similar no Brasil.

Os resultados mostram que a aplicação de tensão contínua, quando comparada à tensão alternada, em valor eficaz, produz danos superiores, em termos de trilhamento e erosão, nas amostras ensaiadas. Ainda, a tensão CC+ é notadamente mais prejudicial do que a tensão CC-, resultando em uma perda de material quase 8x vezes maior. Comparando a tensão CC+ com a tensão alternada, essa perda de material é em torno de 13x maior na tensão CC+.

Ressalta-se ainda que os resultados apresentados estão alinhados com resultados apresentados por outros pesquisadores, onde foram utilizados materiais poliméricos não-comerciais. De forma geral, os resultados deste trabalho indicam que cuidados especiais devem ser tomados quando se for utilizar isoladores poliméricos baseados em borracha de silicone, projetados para uso em tensão alternada, em sistemas HVDC.

Desta forma se mostram necessários estudos que demonstrem precisamente as diferenças que existem entre as descargas de banda seca geradas pela aplicação de CC e CA. O conhecimento de tais mecanismos de descarga elétrica poderia ser utilizado para desenvolver soluções mais eficientes para o problema do emprego de isoladores poliméricos em sistemas HVDC.

AGRADECIMIENTOS

Os autores agradecem o suporte do engenheiro Rafael Eduardo Werlich, responsável pelo Laboratório de Alta Tensão da FURB, e o apoio da empresa Porcelanas Industriais Germer S.A.

REFERÊNCIAS

- Danikas, M. G. Polymer Outdoor Insulators. Acta Electrotehnica Napocensis, Volume 40, Number 1, 1999.
- [2] Ghunem, R. A. et al. Dynamics of Dry-Band Arcing on Silicone Rubber in the Inclined Plane Test under AC, +DC and -DC Voltages. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 55-58, 2014.
- [3] Ghunem, R. A. et al. Erosion of Silicone Rubber Composites in the AC and DC Inclined Plane Tests. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, pp. 229-235, 2013.*
- [4] Cherney, E. A. et al. DC Inclined-Plane Tracking and Erosion Test of Insulating Materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.22, pp. 211-217, 2015.*
- [5] A. R. Verma, B. Subba Reddy and S. Bandyopadhyay, "Tracking and Erosion Resistance of Artificially Aged Silicone Rubber Samples," 2018 IEEE 13th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Rupnagar, India, 2018, pp. 375-380.
- [6] S. F. Kaaiye and C. Nyamupangedengu, "Comparative study of AC and DC inclined plane tests on silicone rubber (SiR) insulation," in *High Voltage*, vol. 2, no. 2, pp. 119-128, 6 2017.
- [7] E. Coser, C. Arthur Ferreira, J. M. Giacomini Angelini, B. Aragao and I. Perez Almirall, "Mechanical analysis of silicone rubber used on the cover of polymeric insulators," in IEEE Latin America Transactions, vol. 8, no. 6, pp. 653-657, Dec. 2010.
- [8] Standard Test Methods for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials, ASTM D2303, 1997.
- [9] Ghunem, R. A Study of the Erosion Mechanism of Silicone Rubber Housing Composites. *Thesis (Doctor of Philosophy in Electrical Engineering) - University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada,* 2014.
- [10] Smith, S.W. 1999. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Second Edition. San Diego, California. California Technical Publishing.



Renzo Franco Pintarelli is an undergraduate student in electrical engineering at the Regional University of Blumenau since 2014. He worked in the high voltage laboratory on research projects involving dry band arcing on polymeric insulators and sudden flashover on ceramic insulators.



Luiz Henrique Meyer received his B.Sc in Electrical Engineering and M.Sc. in Power Systems from the Federal University of Santa Catarina, Brazil, in 1990 and 1994 respectively. In 2003 he received his Ph.D. degree in Electrical Engineering from the University of Waterloo, Canada. He is focused on Dielectric Materials for Outdoor High Voltage Applications, Ceramic and

Polymeric Insulating Apparatus used in transmission and distribution networks. He is a Senior Member of IEEE since 2012. He is a full-time professor at the Regional University Blumenau (FURB) since 1994 where he teaches for the undergraduate and graduate programs in Electrical Engineering.