

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA**

**GABRIEL LIPPMANN**



**AVALIAÇÃO DO FATOR DE PERDAS DIELÉTRICAS EM RESVESTIMENTO DE  
BORRACHA DE SILICONE (RTV) APLICADAS EM ISOLADORES CERÂMICOS DE LINHAS  
DE TRANSMISSÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**GABRIEL LIPPMANN**

**AVALIAÇÃO DO FATOR DE PERDAS DIELÉTRICAS EM RESVESTIMENTO DE  
BORRACHA DE SILICONE (RTV) APLICADAS EM ISOLADORES CERÂMICOS DE LINHAS  
DE TRANSMISSÃO**

**Trabalho apresentado ao colegiado do Curso de  
Engenharia elétrica, da Universidade Federal do  
Paraná, como requisito da disciplina TE105, para  
obtenção do grau de engenheiro eletricista,  
orientado pelo Professor Dr. Edemir Luiz Kowalski.**

**CURITIBA**

**2019**

## RESUMO

As linhas de transmissão de energia elétrica representam o elemento de ligação entre os grandes centros geradores de energia elétrica e os centros consumidores. Falhas nestas linhas podem ocasionar grandes transtornos à sociedade e prejuízos à economia de um país. Entre os diversos tipos de falha que podem ocorrer em uma linha de transmissão, encontra-se a falha de isolamento das cadeias de isolador em função da abertura de arcos entre as fases e a estrutura das torres ou postes aterrados. Um dos motivos destas falhas refere-se à poluição ambiental ou industrial, a qual reduz a hidrofobicidade dos isoladores cerâmicos ocasionando assim a abertura de arcos elétricos. Dentre as tecnologias emergentes para se buscar reduzir os efeitos da poluição, encontra-se a aplicação sobre a superfície dos isoladores cerâmicos de revestimentos a base de silicone vulcanizado a temperatura ambiente (RTV). Estas tecnologias têm sido aplicadas, porém as concessionárias transmissoras não possuem padrões para selecionar e adquirir os melhores produtos entre os vários disponíveis comercialmente. Num estudo que vem sendo realizado para a COPEL Transmissão realizado em conjunto com o LACTEC, já forma padronizados ensaios físico químicos para caracterizar diversas propriedades necessárias a estes revestimentos, porém a avaliação do fator de perdas dielétricas se demonstrou de difícil caracterização. A contribuição deste estudo encontra-se justamente neste aspecto. Neste trabalho desenvolveu-se uma metodologia de fabricação de filmes dos revestimentos de RTV que possibilitaram por meio da técnica de espectroscopia dielétrica convencional se determinar o fator de perdas dielétrica das amostras de três fabricantes diferentes em situação sem envelhecimento e com envelhecimento de 200 e 500 horas em radiação ultravioleta. Os resultados demonstraram que com o avanço do envelhecimento ocorre uma redução da componente de polarização dos materiais estudados elevando o fator de perdas dielétricas. Assim em conjunto com as demais técnicas de avaliação destes materiais já desenvolvidas, o fator de perdas dielétricas poderá auxiliar na padronização de um conjunto de ensaios necessários para se identificar os melhores materiais disponíveis comercialmente.

Palavras Chave: Isoladores cerâmicos; RTV; Espectroscopia dielétrica; Fator de perdas dielétrico.

## ABSTRACT

Power transmission lines are the connection between the large electricity generating plants and the consumption centers. Failures in these lines can cause serious disruptions to society and economic losses for a Country. There are several types of failure that can occur in a transmission line, including the isolation fault of the insulator chains due to the arcing between the phases and towers structure or grounded poles. One of the reasons for these failures is related to environmental or industrial pollution, which reduces the hydrophobicity of ceramic insulators, opening electric arcs. The emerging technologies to reduce the effects of pollution including the Application of vulcanized based silicone at room temperature on the ceramic insulators surface (RTV). These technologies have been applied, but the transmission companies do not have standards to select and purchase the best products among the many commercially available. In a study that has been performed for *COPEL Transmission* conducted in partnership with LACTEC, physical chemical tests have been already standardized to characterize several properties required for these coatings, but the evaluation of the dielectric loss factor proved difficult to characterize. The contribution of this study lies precisely in this aspect. In this work it was developed a RTV coating film manufacturing methodology that made it possible to use the dielectric spectroscopy technique to determine the dielectric loss factor of samples from three different manufacturers in not aging and 200 and 500 hours aging situation in ultraviolet radiation. The results demonstrate that the aging advance increases the polarization component of the studied materials increasing the dielectric loss factor. This way, together with the other techniques of evaluation of these materials already developed, the dielectric loss factor may help standardize a set of tests necessary to identify the best commercially available materials.

Keywords: Ceramic insulators; RTV; Dielectric spectroscopy; Dielectric loss factor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagem de isoladores de porcelana aplicados em linhas de transmissão.....	16
Figura 2: Imagem de isoladores de vidro aplicados em linhas de transmissão ..	16
Figura 3: Imagem de isoladores de materiais poliméricos aplicados em linhas de transmissão.....	17
Figura 4 – Estrutura química do silicone. ....	21
Figura 5: Circuito equivalente paralelo para modelagem de dielétricos.....	24
Figura 6: Circuito equivalente série para modelagem de dielétricos. ....	25
Figura 7: Método de 2 eletrodos para análise de resistividade superficial. Chave a na posição aberta, chave b fechada e chave c aberta. Para a medida da resistividade volumétrica, chave a na posição 2, chave b na posição aberta e chave c na posição fechada .....	27
Figura 8: Acima a interface dielétrica e abaixo o analisador de impedância.....	29
Figura 9: Célula para ensaios dielétricos em materiais sólidos. ....	30
Figura 10: À esquerda a célula para medida da resistividade de materiais sólidos. Ao centro a chave seletor e à direita o medidor de resistividade. ....	30
Figura 11: Gaiola de Faraday confeccionada em tela de cobre. ....	30
Figura 12: Câmara de Envelhecimento QUV.....	31
Figura 13: Amostras depositadas sobre o filme de transparência e deixadas para o processo de cura à temperatura ambiente.....	32
Figura 14: À esquerda a amostra retirada do filme de transparência e à direita a amostra retirada recortada com as medidas necessárias para a realização dos ensaios.	32
Figura 15: Equipamento Agilent 4329 B ( <i>High resistance meter</i> ) dotado de chave seletora e célula de resistividade. ....	33
Figura 16: Conjunto utilizado para realização da espectroscopia dielétrica, para obtenção da tangente de perdas.....	34
Figura 17: Equipamento QUV utilizado no processo de envelhecimento das amostras.....	35

**Figura 18: Resultado da tangente de perdas dielétrica média das três medidas realizadas sobre 5 amostras do fabricante A, para a situação sem envelhecimento, com envelhecimento em QUV de 200 h e 500 h. .... 36**

**Figura 19: Resultado da tangente de perdas dielétrica média das três medidas realizadas sobre 5 amostras do fabricante B, para a situação sem envelhecimento, com envelhecimento em QUV de 200 h e 500 h. .... 37**

**Figura 20: Resultado da tangente de perdas dielétrica média das três medidas realizadas sobre 5 amostras do fabricante C, para a situação sem envelhecimento, com envelhecimento em QUV de 200 h e 500 h. .... 38**

**Figura 21: Média da resistividade volumétrica para as amostras A,B,C sem envelhecimento e com envelhecimento de 200 h e 500 h em QUV. .... 39**

## **LISTA DE ABREVIações, E SIGLAS.**

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

SEPT – Sistema Elétrico de Potência;

LTs – Linhas de Transmissão;

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais S.A.;

CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica;

COELBA - Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia;

RTV - Room Temperature Vulcanized;

COPEL – Companhia Paranaense de Energia;

PDMS - poli-dimetilsiloxano;

ATH - trihidrato de alumina;

DDDG – Directional Dust Deposit Gauges;

ESDD – Equivalent Salt Deposit Density;

NSDD – Non-Soluble Deposit Density;

SIR - Siliconelinsulator Rubber;

UV – Ultravioleta;

ASTM - American Society for Testing and Materials;

## LISTA DE SIMBOLOS

- $I_F$  – Corrente de fuga;
- G – Condutância;
- V – Tensão;
- $I_c$  - Corrente no capacitor;
- $\omega$  - Frequência angular;
- C – Capacitância;
- I – Corrente total;
- $\delta$  - Ângulo de perdas;
- $\tan \delta$  - Fator de perdas;
- $C_0$  – Capacitância geométrica;
- R – Resistência;
- $\epsilon'$  - Permissividade real;
- $\epsilon''$  - Permissividade imaginaria;
- J - Vetor densidade de corrente;
- E – Gradiente do campo elétrico;
- $\sigma$  – Condutividade
- Y – Admitância;
- $\rho_s$  - Resistividade superficial;
- $\rho_v$  – Resistividade volumétrica;
- $Z^*$  - Impedância complexa;
- $\epsilon_0$  - Permissividade no vácuo;

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE ABREVIÇÕES, E SIGLAS.....</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>11</b>
<b>3. OBJETIVOS DO PROJETO .....</b>	<b>13</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>14</b>
4.1. Isoladores .....	15
4.2. Poluição em isoladores.....	17
4.3. Coberturas de borracha de silicone vulcanizadas a temperatura ambiente (SIR-RTV).....	18
4.4. Silicone .....	20
4.5 Mecanismos de Degradação e Envelhecimento em polimeros.....	21
4.6. Dielétricos .....	22
4.7. Modelagem do circuito equivalente de dielétricos.....	23
4.7.1 Circuito equivalente paralelo .....	23
4.7.2. Circuito equivalente serie .....	25
4.8. Resistividade superficial e volumétrica .....	26
4.9. Espectroscopia dielétrica .....	27
<b>5 PARTE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>29</b>
5.1 Materiais e equipamentos.....	29
5.2 Métodos .....	31
5.2.1 Confeccção das amostras.....	31
5.2.2 Medida de resistividade volumétrica.....	33

5.2.4 Envelhecimento em QUV .....	35
5.3. Resultados e discussões .....	35
5.3.2. Medidas de resistividade volumétrica .....	39
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>41</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>42</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>43</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma das formas mais utilizadas de energia no mundo. No Brasil a geração de energia elétrica, segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), é aproximadamente 60% advinda de hidrelétricas, entretanto esse potencial hídrico, normalmente encontra-se distante de centros consumidores, necessitando de uma forma eficiente e segura de transmitir a energia aos centros consumidores.

O sistema elétrico de potência (SEPT), consiste em três principais áreas sendo estas a geração, transmissão e distribuição, que são encarregadas de suprir com qualidade e segurança as necessidades energéticas do consumidor final.

Para a transmissão, da central geradora até as subestações de distribuição, tem-se uma rede complexa de linhas de transmissão (LTs). As LTs mais comuns no Brasil, são as linhas aéreas, que podem ser de corrente contínua ou alternada, com diferentes níveis de tensão, todas interligadas, formando uma grande rede de transmissão ao longo de todo o Brasil. Os cabos das LTs são suspensos por torres ou postes. As torres ou postes de transmissão devem ser construídos de tal forma que os cabos energizados mantenham uma distância segura de pessoas, vegetação, e inclusive da própria torre ou poste de sustentação, para evitar acidentes, e formação de arcos elétricos. Os cabos são sustentados por isoladores, que podem ser constituídos de vidro, porcelana, ou em alguns casos de polímeros.

Mostra-se de grande importância um projeto adequado de isoladores, levando em conta níveis de tensão, características ambientais e climáticas, poluição do ambiente, entre outros, pois falhas na isolação destes equipamentos podem acarretar a interrupção na transmissão de energia, gerando prejuízos econômicos, e sociais.

Uma das principais causas de falhas em isoladores, principalmente em cerâmicos (vidro e porcelana), é a descarga disruptiva, que consiste na passagem abrupta de corrente elétrica através de um meio isolante, quando esse perde localmente suas propriedades de isolação. Essa falha pode ser causada por diversos motivos, como envelhecimento, presença de defeitos no material, ou poluição na superfície dos isoladores.

Para se reduzir o problema de isoladores poluídos, pode-se trabalhar na forma construtiva do isolador, para que ocorra um menor acúmulo de poluição, porém mesmo com todo cuidado no projeto para diminuir o acúmulo de poluição, ainda podem ocorrer problemas com descargas disruptivas, tendo em vista a dificuldade de assegurar que o isolador

permanecerá limpo. Outro método utilizado é a lavagem dos isoladores poluídos, porém essa técnica tem o problema do cálculo do intervalo de tempo em que as lavagens devem ser executadas, e, se feitas cedo demais a taxa de deposição dos poluentes pode aumentar, e o problema persistir. Por outro lado, se o intervalo de tempo for muito longo, a chances de uma falha aumentam. Outro aspecto importante com relação a lavagem dos isoladores refere-se ao risco de acidentes com os eletricitas, bem como o alto custo desta atividade de manutenção.

Uma técnica que vem sendo utilizada, para evitar a formação de um eletrólito na superfície do isolador e suprimir problemas com corrente de fuga, e diminuir problemas com descargas disruptivas advindas da deposição de poluição, consiste em utilizar revestimentos a base de silicone na superfície do isolador. Dois tipos de matérias a base de silicone são usualmente utilizados, sendo estas a graxa, e o revestimento tipo RTV (*room temperature vulcanized*), que apresenta boas características de autolimpeza e resistência a longo prazo as intempéries ambientais, e principalmente excelentes características de hidrofobicidade.

## 2. JUSTIFICATIVA

Esse estudo se justifica, tendo em vista que isoladores de linhas de transmissão (classe 69 kV ou superior), tem como principais causas de falha a ocorrência de descarga disruptiva (*flashover*), principalmente em áreas com média e elevada agressividade ambiental. Nestas áreas tem-se uma grande proporção de falhas pelo fenômeno conhecido como descarga disruptiva por poluição (*pollution flashover*). Um estudo dos materiais para aplicação em isoladores de alta tensão mostra-se importante para um melhor desempenho em campo pelo aumento da hidrofobicidade da superfície, supressão de corrente de fuga e prevenção da ocorrência de descarga disruptivas.

Devido à dificuldade de se realizar a manutenção com a utilização das graxas de silicone as transmissoras de energia no mundo, estão utilizando os revestimentos RTV, disponibilizados comercialmente. Em função dos resultados promissores obtidos com esta aplicação diversos fornecedores do produto surgiram no mercado e as especificações destes referem-se às propriedades físico químicas constantes nos manuais dos produtos, não havendo uma normalização que informe quais são as condições mínimas de ensaios e testes pelas quais os produtos devem ser submetidos para se avaliar a qualidade dos mesmos.

No projeto que vem sendo realizado pelo LACTEC e COPEL Transmissão, o objetivo principal é se estabelecer um conjunto de ensaios ou testes que possibilitem avaliar a qualidade dos revestimentos RTV disponibilizados comercialmente. Um grupo de pesquisadores do LACTEC e COPEL já realizou a padronização de ensaios mecânicos, de hidrofobicidade, trilhamento elétrico, perda de massa em condições de envelhecimento, porém em função da dificuldade da confecção de filmes a propriedade fator de perdas dielétricas não vinha sendo estudada. O fator de perdas dielétricas trata-se de uma das propriedades físicas mais importante quando se fala de dielétricos, pois revela a quantidade de energia absorvida pelo material a cada ciclo, ou seja, a energia que pode ser convertida em calor, pois o fator de perdas do dielétrico quando devidamente caracterizado é aplicado de forma eficiente como grandeza física para se especificar a compra de outros materiais poliméricos como por exemplo cabos de energia, isoladores de pino entre outros.

Os revestimentos (pintura) que tem sido aplicado aos isoladores de linha de transmissão estão sendo utilizados em fase de teste, sem que existam especificações ou normas para tal, pois inicialmente estes materiais foram desenvolvidos comercialmente com outros objetivos. Assim, espera-se que o fator de perdas dielétricas a exemplo de outros materiais poliméricos aplicados ao setor elétrico possa ser uma grandeza física básica para especificação dos diferentes tipos de

revestimentos disponíveis de forma a obter-se um melhor desempenho quando aplicado para reduzir os efeitos da poluição ambiental no nível de isolamento dos isoladores. Três diferentes revestimentos comerciais serão utilizados na confecção de um conjunto de amostras que terão o fator de perdas medido em condições sem uso e com envelhecimento acelerado em laboratório em radiação ultravioleta (QUV).

### **3. OBJETIVOS DO PROJETO**

Este trabalho tem como objetivo principal utilizar a técnica da espectroscopia dielétrica na faixa de frequência entre 10 Hz e 100 kHz para se avaliar o fator de perdas dielétricas de amostras confeccionadas com três diferentes revestimentos comerciais que tem sido aplicado em isoladores de linha de transmissão, para se reduzir os efeitos da poluição que afetam o nível de isolamentos destes. As amostras em forma de placas com 10 cm por 10 cm e espessura aproximada de 0,5 mm serão avaliadas em condição nova e com envelhecimento em câmara de ultravioleta (QUV). Se espera com este trabalho poder concluir sobre a utilização do fator de perdas dielétricas como uma grandeza dielétrica possível de ser aplicada na especificação dos revestimentos para sua aquisição por parte dos usuários do produto, complementando as demais técnicas que estão sendo sugeridas no projeto de pesquisa executado pelo LACTEC e COPEL Transmissão.

#### 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

Estudo sobre melhorias em termos de desempenho de isoladores focando buscar reduzir os efeitos da poluição vem sendo realizados a décadas, visando melhorar o projeto do formato, tamanho e o espaçamento dos discos e dos materiais construtivos deles. Dentre estes diversos estudos destacam-se pesquisas sobre graxas de hidrocarboneto e silicone, e revestimentos de RTV, assim como métodos de limpeza para diminuir os efeitos da poluição e falhas por descargas disruptivas.

Técnicas de projeto de isoladores para condições de poluição envolvem a modificação do tamanho, espaçamento, forma do disco e seções de isoladores a fim de obter uma distância de fuga protegida por unidade de comprimento melhoradas. Muitos projetos de isoladores foram desenvolvidos ao longo dos anos, entretanto, nenhum padrão cobre o *design* ou desempenho de isoladores cerâmicos para ambientes contaminados. A experiência com vários projetos, variou bastante, dependendo da condição de aplicação. De modo geral, isoladores ainda exigem limpeza para evitar descargas disruptivas, embora com frequência reduzida. O princípio norteador ainda parece ser a instalação de cadeias mais longas em torres e postes mais altos em locais sujeitos a poluição [1].

A limpeza de isoladores mostrou-se uma maneira eficaz de remover contaminações na superfície do isolador. A lavagem com água mostrou-se uma eficaz, embora atualmente a limpeza com água, envolve grandes custos principalmente em locais secos, além de envolver alto risco de acidentes com os eletricitistas que realizam esta atividade de manutenção. Outro fato a ser considerado é o problema associado à frequência da limpeza, pois se a frequência da limpeza for muito alta a taxa de depósito de partículas pode aumentar, ou com pouca frequência, corre-se o risco de uma descarga disruptiva vir a ocorrer. A limpeza com limpadores abrasivos secos, mostra-se muito eficaz para remoção de depósitos como cimento, no entanto o frequente uso de limpador abrasivo seco removerá o esmalte do isolador de porcelana, e, é uma prática que não deve ser usada em isoladores de vidro pois reduz a hidrofobicidade da superfície do isolador [1].

Um método também utilizado é o uso de graxas de silicone ou coberturas de silicone tipo RTV. As graxas de silicone permitem a absorção de poluentes e previnem a ocorrência de descargas disruptivas. Elas reduzem a formação de películas de água pelo encapsulamento das partículas dos poluentes. Porém mesmo após a aplicação, requer manutenção regular para

a remoção da graxa e aplicação de nova camada, sendo que a frequência de limpeza pode variar de alguns meses a alguns anos, dependendo do grau de poluição e das condições climáticas. O maior problema da graxa de silicone é seu tempo de vida, que varia de 6 meses a 2 anos, com um alto custo na remoção da graxa utilizada [1,2]

Já os revestimentos de RTV (*room temperature vulcanized*), ganharam popularidade desde o primeiro teste em 1973 como produto comercial aplicado para impermeabilizar tecidos, e com utilização em larga escala em 1987 como produto comercial. Apesar de poucos problemas encontrados nessa tecnologia, certas melhorias foram necessárias para assegurar uma vida útil maior. Essas melhorias incluíram: melhorias na adesão a porcelana, capacidade de resistir por mais tempo ao desenvolvimento de correntes de fuga e correntes disruptivas, sendo que estes desenvolvimentos já foram realizados buscando se atender necessidades do setor elétrico.

A composição do silicone RTV consiste em um poli-dimetilsiloxano (PDMS), um material de reforço como sílica pirogenada, uma carga de trihidrato de alumina (ATH), um corante de pigmento e agente de reticulação. O revestimento também pode conter cargas adicionais, um catalisador de condensação e um promotor de aderência para melhor adesão a superfícies cerâmicas [1].

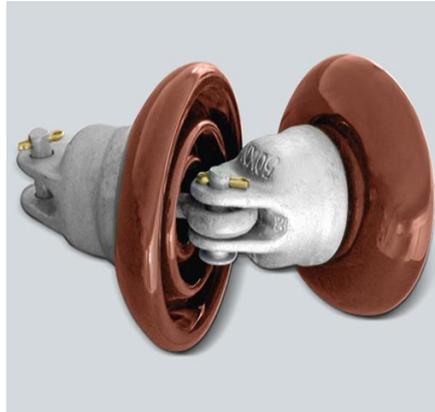
A utilização de nano partículas nos revestimentos em de silicone vem sendo estudada, com vernizes nano métricos, nano partículas, tais como nano sílica pirogênica, sílica natural e nano alumina, que são utilizadas para reforçar a borracha de silicone para aplicação em isoladores, mostrando que as nano partículas melhoram a resistência ao calor à erosão de compósitos de silicone [3].

#### **4.1 Isoladores**

Isoladores são elementos do sistema elétrico de potência, feitos para suportar a carga mecânica exercida pelos cabos energizados, e a diferença de potencial elétrico que será aplicada entre os cabos energizados e as torres aterradas. Podem ser construídos de dois materiais dielétricos diferentes que são cerâmicas (vidro e porcelana) ou polímeros.

Isoladores de porcelana se caracterizam por propriedades elétricas que dependem de inúmeros parâmetros, entre os quais se destacam: composição, espessura, condições superficiais e temperatura. A espessura do isolador se destaca por ter uma grande influência na rigidez dielétrica, que diminui exponencialmente com a espessura do isolador, por causa de

um aumento na probabilidade de defeitos microestruturais na área estressada eletricamente. A Figura 1 mostra a imagem de isolador confeccionado em porcelana.



**Figura 1: Imagem de isoladores de porcelana aplicados em linhas de transmissão [4].**

Os isoladores de vidro são muito utilizados em linhas de alta tensão por sua confiabilidade, porém estresses mecânicos podem causar fraturas a partir de fendas na superfície do isolador. A figura 2 mostra a imagem de um isolador confeccionado em vidro.



**Figura 2: Imagem de isoladores de vidro aplicados em linhas de transmissão [5]**

Os isoladores de materiais poliméricos, apresentam a vantagem de possuir uma característica hidrofóbica ideal para aplicações em áreas com agressividade ambiental, reduzindo o acúmulo de poluição e o fenômeno de descargas disruptivas. Porém as distribuidoras de energia ainda hesitam em sua utilização, por possíveis problemas em suas estruturas de silicone, e em seu corpo feito geralmente de fibra de vidro. A Figura 3 mostra isoladores confeccionados em materiais poliméricos.



**Figura 3: Imagem de isoladores de materiais poliméricos aplicados em linhas de transmissão [6].**

#### **4.2 Poluição em isoladores**

Para seleção e projeto dos isoladores, um importante parâmetro de estudo é o monitoramento do nível de poluição, tendo em vista de que condições ambientais e poluição tem grande influência em seu desempenho, sendo a principal causa de defeitos em isoladores. Estudos vem sendo realizados em respeito a esse tema [7-8]. A ABNT IEC/TR 60815 [5] recomenda um método, que consiste em se obter a medida da condutividade volumétrica de poluentes coletados por meio de dispositivos direcionais coletores de poluentes (denominados DDDG – *Directional Dust Deposit Gauges*) e as medidas de densidade de depósito de sal equivalente e densidade de depósito de poluentes não-solúveis (denominados ESDD – *Equivalent Salt Deposit Density* e NSDD – *Non-Soluble Deposit Density*, respectivamente).

Um programa de monitoramento de isoladores vem sendo realizado por Vosloo et al [9] na Namíbia. Esse país foi escolhido por sua grande diversidade de condições ambientais, com regiões áridas, e regiões com clima subtropical, sendo assim, os isoladores têm que ser certificados para operar em diversas condições climáticas e de poluição. Além do monitoramento e avaliação dos locais onde linhas já operam, o programa pretende traçar um mapa para a escolha de isoladores para novas linhas e subestações. Utiliza-se a metodologia

de uso de coletores direcionais de poeira (DDDGs) e de um monitor de condutividade superficial da poluição depositada sobre um isolador de referência. Com essas medidas torna-se possível avaliar teoricamente a tensão de descarga disruptiva e avaliar o risco de uma ocorrência desta natureza para um determinado tipo de isolador.

No Irã também se desenvolve uma metodologia para o mapeamento de poluição, em locais com histórico de ocorrência de descargas disruptivas por poluição. Este estudo vem sendo desenvolvido por Shariati et al [10] e tem como base a utilização medidas de DDDG e de ESDD/NSDD. Esse estudo resultou na substituição de vários tipos de isoladores em alimentadores de distribuição classe 33 kV, diminuindo os desligamentos relacionados a descargas disruptivas.

#### **4.3 Coberturas de borracha de silicone vulcanizadas a temperatura ambiente (SIR-RTV)**

Desde a década de 70 estudos sobre aplicabilidade de borracha de silicone (*silicone insulator rubber*, SIR) vulcanizadas a temperatura ambiente (*room temperature vulcanized*, RTV), vem sendo realizados e a partir dos anos 80 vem sendo utilizado em larga escala. Inicialmente foi aplicado em subestações onde o uso de graxas ou lavagem vinham sendo utilizadas para evitar descargas disruptivas ocasionadas por poluição [11,12]. As coberturas SIR-RTV tem se mostrado uma excelente solução para reduzir os efeitos de descargas disruptivas ocasionadas por poluição. Em ambientes marítimos e industriais tem-se mostrado uma solução efetiva com poucos problemas reportados. Dos poucos problemas reportados, os ocasionados por aplicação em campo, estão a dificuldade na limpeza antes da aplicação, e a dificuldade da aplicação com as linhas energizadas, e um baixo desempenho em regiões onde a umidade é constante, possivelmente por uma perda rápida das características de hidrofobicidade.

No Catar, em uma linha de transmissão de 132 kV, localizada em um ambiente de deserto com salinização da costa, os isoladores necessitavam de uma limpeza semestral ou um engraxamento em um período de 2 em 2 anos. Assim foi realizado um teste com a utilização de isoladores de vidro pré cobertos nesta LT e, após a utilização desta nova tecnologia, em um período de 5 anos, os isoladores não apresentaram problemas, nem precisaram de lavagem.

Outra linha de transmissão com condições climáticas severas, a utilizar esta tecnologia, foi a de Doha a Dukhan (85 km, 132 kV), utilizando cerca de 55.000 isoladores pré cobertos. Devido a severas condições climáticas com tempestades de areia, salinidade e poluição industrial (carvão), linhas parecidas com está, necessitavam mais de 2 duas lavagens anuais, porém com a utilização dessa tecnologia, após 15 anos não houve a necessidade de limpeza, nem a ocorrência de descargas disruptivas. Com resultados positivos com a utilização de isoladores pré cobertos com SIR-RTV em linhas de 132 kV, essa tecnologia foi utilizada na expansão de linhas de 132 kV, 220 kV e 400 kV [9].

Na China, um comparativo feito em 1986 com linhas de transmissão (35 kV) de isoladores com cobertura e sem cobertura foi realizado, durante um ano, em um período de nevoa muito pesado. Foi observado uma grande ocorrência de descargas disruptivas na linha sem cobertura, e nenhuma ocorrência nas linhas com coberturas. Esta linha está em operação a 22 anos sem a necessidade de manutenção, devido a esse bom desempenho, a cobertura de RTV tem sido amplamente utilizada na China [9].

As primeiras utilizações de isoladores com coberturas SIR-RTV nos EUA, ocorreram por volta dos anos 2000, chegando a 25.000 isoladores instalados em 2011, aplicados para regiões costeiras, até o ano de 2013, não consta a necessidade de manutenção dos mesmos [9].

No Brasil, empresa CEMIG no ano de 2001 aplicou o RTV em subestações localizadas em áreas de produção de cimento, bem como em linhas de distribuição. A equipe de manutenção realizou um acompanhamento que demonstrou não haver um acúmulo significativo de poluentes, nem comprometimento da camada isolante. Uma limpeza tradicional foi prevista inicialmente para 2007. Ao verificar o estado de conservação dos isoladores a limpeza prevista foi postergada, por apresentar excelente estado de conservação. No trabalho se conclui que os benefícios são maiores, quando se considera a eliminação ou redução da corrente de fuga, riscos de interrupção elétrica e o aumento dos períodos entre as intervenções em isoladores localizados em áreas de poluição intensa que, sobem de períodos entre 3 e 5 anos para média de 15 anos entre as intervenções. Depois de 7 anos, verificou-se através de inspeções visuais, que não ocorreram falhas originadas nas cadeias de isoladores de LDs que receberam a cobertura RTV. Pelos resultados obtidos, a Engenharia de Manutenção da Cemig Distribuição considerou a cobertura avaliada satisfatória para a utilização proposta [13].

Em 2008 a COELBA apresentou um estudo realizado em 8 isoladores com diferentes tecnologias que foram instalados em uma subestação de Paripe, em Salvador, cidade cujo

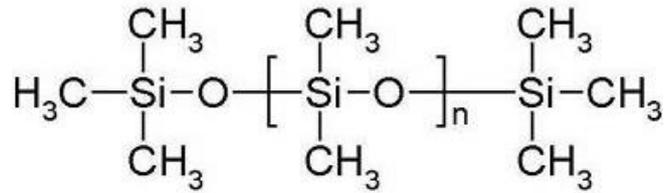
clima tropical, quente e úmido, com cerca de 2.466h anuais de sol propicia a presença de poluição em isoladores e um desgaste natural ocasionado pelo envelhecimento por raios UV. Apesar de um curto período de análise, (3 meses), o emprego da tecnologia de revestimento RTV à base de silicone, demonstrou ser eficaz com na redução de eventos elétricos registrados. Essa melhora no desempenho se atribui pela característica hidrofóbica do RTV, pois pouco material particulado ficou aderido à superfície do isolador. Outro resultado importante foi o da resistência de isolamento, com correntes de fuga chegando a 2 ordens de grandeza inferiores, se comparados aos isoladores sem o revestimento de RTV [14].

Mais recentemente, no Brasil, resultados publicados pela empresa CEEE do Rio Grande do Sul, com a experiência de utilização de isoladores cobertos com RTV, em uma linha historicamente problemática de 230 kV entre o ano de 2013 e 2015. De acordo com Mustafa et al. em trabalho publicado em 2018 [15], a utilização de cadeias de isoladores com cobertura RTV em 10 torres resultou em uma significativa diminuição no número de desarmes de proteção não planejados desta LT. O autor conclui que a umidade relativa do ar é parâmetro principal a ser correlacionado com os desarmes de proteção.

#### **4.4 Silicone**

Somente aplicado quando polímeros orgânicos não conseguem atingir certas características de desempenho, devido ao seu alto custo, o silicone costuma ser utilizado devido a sua grande resistência térmica, flexibilidade a baixa temperatura, além de apresentar boa resistência ao ozônio. Com uma boa resistência a ambientes com alta agressividade ambiental, demonstra ter uma boa resistência a radiação UV e grande capacidade de isolamento elétrico. Apresenta, diferentemente de outros polímeros, o silicone apresente hidrocarbonetos em sua estrutura principal.

Um exemplo das borrachas de silicone, é poli-dimetilsiloxano (PDMS), sua estrutura é vista na Figura 4.



**Figura 4: Estrutura química do silicone [16].**

O que fornece a característica de hidrofobicidade ao silicone, são os grupamentos metila, que devido ao seu posicionamento, e sob condições normais, apontam para “fora” formando uma camada hidrofóbica e resultando em uma baixa energia superficial da cadeia polimérica [17].

#### **4.5 Mecanismos de Degradação e Envelhecimento em polimeros**

Pode-se descrever a degradação de um material polimérico como sendo qualquer reação química que altere a qualidade de interesse deste material ou composto, essa qualidade de interesse é a característica para qual determinado material polimérico foi criado. Essas características, como a flexibilidade, resistência elétrica, características visuais, resistência mecânica e dureza são representantes da qualidade de interesse [18].

O envelhecimento consiste de um processo de mudança irreversível das características do polímero, que ocorre com o passar do tempo de uso, com um agente que permite ou é causa destas mudanças.

A degradação e o envelhecimento se dá por fatores internos ou externos, que podem ser em conjunto ou se dar separadamente. Materiais poliméricos utilizados em sistemas de isolamento de sistemas elétricos, ficam sujeitos a estresses elétricos, térmicos, mecânicos, químicos e ambientais. A ação destes pode levar ao envelhecimento e degradação de suas propriedades [19, 20].

Exemplos de fenômenos de degradação e envelhecimento que ocorrem em polímeros, são, degradação térmica, que causa ruptura das ligações químicas pelo efeito da temperatura sem a presença de oxigênio [21]. Degradação foto-oxidativa e fotoquímica, causada por

radiação ultravioleta, que corresponde a 5% da radiação solar. Degradação oxidativa, causadas devido a presença de oxigênio, muito comum em temperaturas mais elevadas[22].

#### 4.6 Dielétricos

Segundo Taréiv, B.M [23] o material dielétrico é definido como sendo aquele que tem a propriedade física de ser polarizado sob a ação de um campo elétrico estático e um material isolante é aquele que sob as mesmas condições de campo elétrico tem a propriedade física de não possibilitar o movimento de portadores de carga elétrica.

Na realidade os materiais sejam eles denominados de dielétricos ou isolantes, eles possuem os dois fenômenos ocorrendo de forma simultânea, ou seja, sofrem polarização e possuem movimento de portadores de carga elétrica sob a ação de um campo elétrico.

Considerando os materiais dielétricos eles poderão estar sujeitos a ação de campos elétricos estáticos e variáveis no tempo, apresentando respostas diferentes a estes diferentes estímulos. No caso de campos estáticos os dipolos elétricos existentes no material serão alinhados preferencialmente na direção do campo elétrico e simultaneamente irá ocorrer o deslocamento dos portadores de carga disponíveis em função da ação deste campo, podendo gerar um aquecimento no dielétrico devido ao movimento destes portadores, ou seja, uma perda por efeito Joule. No caso de campos variáveis no tempo, a cada ciclo os dipolos irão se movimentar acompanhando o campo elétrico e os portadores de carga disponíveis terão seu movimento de deriva, que é o movimento preferencial no sentido do campo elétrico, dando origem à corrente elétrica, denominada de corrente elétrica de fuga. Segundo Jonscher, A.K. [24] este fenômeno sob campos variáveis no tempo gera uma quantidade de energia dissipada a cada ciclo devido ao movimento dos portadores e simultaneamente uma energia armazenada a cada pico de polarização. Assim tem-se por meio da razão entre a energia dissipada e armazenada o denominado fator de perdas dielétricas ou fator de dissipação.

Nos processos de degradação ou envelhecimento dos materiais poliméricos ocorrem quebras nas ligações químicas e reações químicas as quais normalmente geram portadores de carga. Este aumento de portadores de carga implica que sob a ação do campo elétrico haverá um aumento da energia dissipada por ciclo, aumentando assim o fator de perdas dielétricas.

Para se apresentar a forma de se determinar o fator de perdas dielétricas será utilizada uma abordagem por meio de circuitos elétricos.

#### 4.7 Modelagem do circuito equivalente de dielétricos

Em algumas aplicações, é de interesse lidar com dielétricos na forma de circuitos equivalentes, um elemento resistivo é selecionado para representar a componente de dissipação do dielétrico, e um elemento capacitivo puro é usado para representar a componente de armazenamento do dielétrico, várias combinações de resistência e capacitância podem ser utilizadas para representar corretamente o comportamento de um material dielétrico em uma ampla faixa de frequências. Mais comumente a representação R-C série ou o circuito equivalente paralelo é empregada.

##### 4.7.1 Circuito equivalente paralelo

Na representação do circuito paralelo, considera-se o dielétrico com uma condutância  $G$ , paralela uma capacitância,  $C$ . para uma tensão  $V$  aplicada no dielétrico. Assim a corrente de fuga no dielétrico será dada pela equação (1):

$$I_F = GV \quad (1)$$

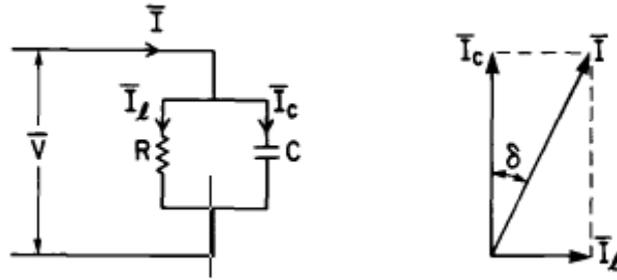
e a corrente capacitiva pela equação (2):

$$I_c = j\omega CV \quad (2)$$

A corrente total será a soma das correntes de fuga e capacitiva, equação (3):

$$I = (G + j\omega C)V \quad (3)$$

A Figura 9 apresenta o circuito equivalente paralelo e seu diagrama vetorial, uma vez que no caso de bons materiais isolantes a magnitude do vetor de corrente de fuga é muito menor que o da corrente de capacitiva, o ângulo de perda,  $\delta$ , em termos do diagrama vetorial.



**Figura 5: Circuito equivalente paralelo para modelagem de dielétricos [25].**

O valor do fator de dissipação é igual a razão  $\frac{I_f}{I_c}$  ou seja como a equação (4) demonstra:

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega RC} \quad (4)$$

Onde R é a resistência e C a capacitância do dielétrico. na equação (4). Na prática, deve-se ter em mente que R não é simplesmente igual a resistência de isolamento medida sob campos estáticos. Aqui R é à resistência elétrica em campo elétrico variável, ou seja, a componente real da resistência de isolamento na frequência  $\omega$ , ou  $2\pi f$ , e é normalmente obtida com a medida da  $\tan \delta$ , e C na frequência  $\omega$ .

Se  $C_0$  representa a capacitância geométrica do capacitor de placas paralelas, então como alternativa, pode-se expressar a equação (2) como mostrado na equação (5):

$$I_c = j\omega\epsilon' C_0 V \quad (5)$$

Da mesma forma, a condutância, G pode ser escrita alternativamente como  $\omega\epsilon'' C_0$  então a Eq (1) pode ser escrita como na equação (6):

$$I_f = \omega\epsilon'' C_0 V \quad (6)$$

O que leva à expressão da  $\tan \delta$  como a razão  $\epsilon''/\epsilon'$ , da mesma forma, a partir da equação (6), nota-se que o vetor densidade de corrente de fuga é dado pela equação (7):

$$J = \omega\epsilon'' E \quad (7)$$

Onde E é o gradiente do campo elétrico. Como, por definição a condutividade,  $\sigma$ , é igual a razão J/E, como visto na equação (8):

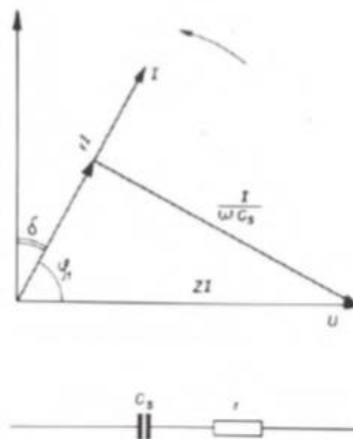
$$\sigma = \omega\epsilon'' \quad (8)$$

E mais uma vez  $\tan \delta$  é igual a razão:

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'} \quad (9)$$

#### 4.7.2 Circuito equivalente série

O circuito equivalente série consiste em uma resistência,  $R_1$ , em série com uma capacitância  $C$ , como visto na Figura 6.



**Figura 6: Circuito equivalente série para modelagem de dielétricos [25].**

Deve-se enfatizar que aqui a resistência  $R_1$  representa a energia dissipada para uma tensão,  $V$ , aplicada na combinação série R-C. A admitância  $Y$  do circuito é simplesmente a relação tensão-corrente  $I/V$  e é dada pela equação (10):

$$Y = \frac{1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} \quad (10)$$

e considerando as equivalências da seção 4.7.1 tem-se:

$$Y = \frac{1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} = (\epsilon'' + j\epsilon')\omega C_0 \quad (11)$$

a partir do qual, obtêm-se a equação (12) e (13):

$$\epsilon'' = \left[ \frac{\omega R_1 C^2}{C_0(1 + \omega^2 R_1^2 C^2)} \right] \quad (12)$$

e:

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0(1+\omega^2 R_1^2 C^2)} \quad (13)$$

Assim, o fator de dissipação para o circuito equivalente em série, definido pela razão  $\frac{\epsilon''}{\epsilon'}$  é igual a equação (14):

$$\tan \delta = \omega R_1 C \quad (14)$$

Na prática, a aproximação por circuito série é raramente usada, preferencialmente é utilizado o circuito paralelo, já que a maioria dos circuitos de medição tentem a visualizar o dielétrico em termos da equivalência paralela.

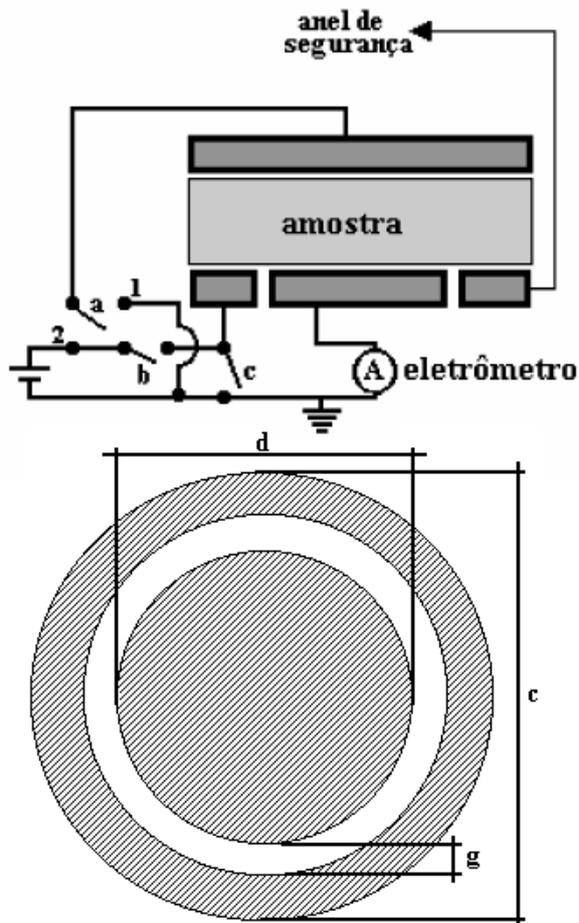
#### 4.8 Resistividade superficial e volumétrica

A resistividade superficial é definida como sendo a resistência oferecida pela passagem de corrente elétrica pela superfície, entre dois eletrodos, de um material em condições determinadas de ensaio. Um arranjo como mostrado na Figura 7, é feito para a análise da resistividade superficial.

A resistividade superficial se dá a partir da equação (15) a seguir:

$$\rho_s = \frac{(d+g)\pi V}{gi} \quad (15)$$

A resistividade volumétrica se define sendo a resistência à corrente elétrica na sua passagem de uma superfície a outra, entre eletrodos opostos. A montagem da análise de resistividade volumétrica se dá análoga à da Figura 7.



**Figura 7: Método de 2 eletrodos para análise de resistividade superficial. Chave a na posição aberta, chave b fechada e chave c aberta. Para a medida da resistividade volumétrica, chave a na posição 2, chave b na posição aberta e chave c na posição fechada [25].**

#### 4.9 Espectroscopia dielétrica

A espectroscopia dielétrica é uma técnica utilizada para medir propriedades dielétricas dos materiais, variando dentro de um intervalo de frequência que vai depender das propriedades físicas do material. De uma maneira geral, essa técnica consiste em utilizar uma amostra do material sob dois eletrodos aplicar um estímulo elétrico e observar a resposta resultante. Vários estímulos podem ser considerados, porém o mais comum é utilizar uma tensão alternada senoidal, e medir a parte real e imaginária da permissividade elétrica em função da frequência.

Os resultados decorrem de medições elétricas relativamente simples, cujo resultados são relacionados com variáveis físicas complexas, como permissividade elétrica, transporte de massa, taxas de reações químicas, entre outros. Ao aplicar uma tensão alternada, proporcionando uma corrente alternada através da amostra, com esses dados se avalia a resposta elétrica devido a tensão aplicada em função da frequência. Obtêm-se assim a impedância complexa a partir da equação (16).

$$Z^*(\omega) = \frac{V^*(t)}{I^*(t)} \quad (16)$$

A impedância complexa ( $Z^*$ ) permite obter diversas informações das propriedades físicas e químicas do material a partir de sua parte real e imaginária. De tal forma, as medidas elétricas podem ser estudadas em uma ampla faixa de frequência que dependerá de cada material e objetivo do estudo.

Em materiais dielétricos, a resposta não ocorre de maneira instantânea devido à defasagem entre estímulo e a resposta do sistema. Ao aplicar um campo elétrico, em cerâmicas, por exemplo, um processo de dispersão dos íons no material e uma redistribuição da carga espacial difusa em sua estrutura requer uma defasagem de tempo, para se estabelecer uma nova configuração dos íons após a aplicação do campo. Chama-se esse tempo de tempo de relaxação ( $\tau$ ).

Depois de realizada a medida da impedância complexa em função da frequência, pode-se obter o valor da capacitância e determinar a permissividade complexa do material em análise. Além disso, por meio do gráfico da parte real e imaginária da permissividade, e através de equações empíricas é possível identificar qual modelo se adequa de melhor forma para descrever as características dielétricas. Sendo assim, outros formalismos complexos podem ser relacionados com a impedância em função da frequência angular. Sendo elas:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (17)$$

$$M^* = M' + jM'' = \frac{1}{\varepsilon^*} \quad (18)$$

$$Y^* = Y' + jY'' = j\omega\varepsilon_0\varepsilon^* = \frac{1}{Z^*} \quad (19)$$

Onde  $\varepsilon^*$  é a permissividade complexa,  $M^*$  é o módulo complexo,  $Y^*$  é a admitância complexa, e  $\varepsilon_0$  é a permissividade no vácuo.

## 5 PARTE EXPERIMENTAL

### 5.1 Materiais e equipamentos

Os materiais aplicados no estudo foram os seguintes:

- 1 – Tinta de silicone de três fabricantes distintos denominados A, B e C;
- 2 – Filmes de transparência para impressora jato de tinta;
- 3 – Espátula em aço inox;
- 4 – Álcool isopropílico;
- 5 – Papel toalha Wypall;
- 6 – Estiletes cirúrgicos.

Os equipamentos aplicados no estudo foram:

- 1 – Analisador de impedância marca Solartron SI 1260 e interface dielétrica Solartron 1296, como pode ser observado na Figura 8.



**Figura 9**

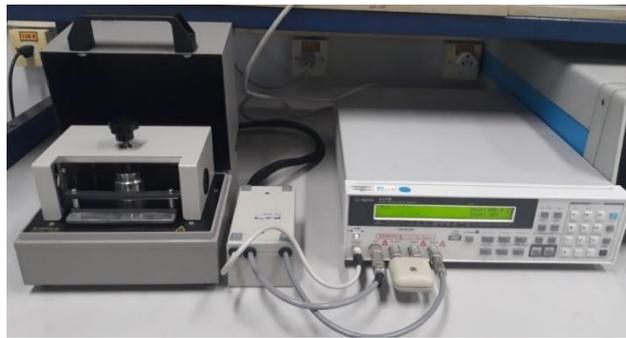
**Figura 8: Acima a interface dielétrica e abaixo o analisador de impedância.**

- 2 – Célula para ensaio em dielétricos sólidos marca Solartron modelo 12962, como mostra a Figura 9.



**Figura 9: Célula para ensaios dielétricos em materiais sólidos.**

3 - Medidor de resistividade superficial e volumétrica marca *Agilent 4329 B (High resistance meter)* dotado de chave seletora e célula para medida de resistividade, como pode ser observado na Figura 10.



**Figura 10: À esquerda a célula para medida da resistividade de materiais sólidos. Ao centro a chave seletora e à direita o medidor de resistividade.**

4 – Notebook;

5 – Gaiola de Faraday, confeccionada no LACTEC como mostrado na Figura 11.



**Figura 11: Gaiola de Faraday confeccionada em tela de cobre.**

6 – Câmara de Envelhecimento QUV *WeatheringTester* modelo QUV *Spray UV40*, segundo norma ASTM G154/16 [26] (Figura 12).



**Figura 12: Câmara de Envelhecimento QUV.**

## **5.2 Métodos**

Nos próximos itens serão apresentados os métodos aplicados para a confecção das amostras e realização das medidas elétricas. Somente para situar o leitor sobre a metodologia geral aplicada para realização das medidas e envelhecimento, inicialmente se realizou as medidas elétricas em todas as amostras na condição sem envelhecimento. Na sequência as amostras foram envelhecidas e as medidas foram novamente realizadas sobre as mesmas amostras.

### **5.2.1 Confecção das amostras**

Para se confeccionar as amostras aplicadas no estudo, os três materiais (A, B, C) em forma líquida (tinta) foram depositados sobre película de transparência na qual foi colocada 3 camadas de fita adesiva nas laterais para reter o produto sobre a transparência e servir de nível para a régua que será usada para distribuir o material. Na sequência com uma régua de aço inox apoiada nas bordas de fita o material foi distribuído uniformemente sobre a superfície da transparência. Os filmes foram deixados pelo período de 96 horas para cura a temperatura

ambiente conforme recomendado pelos fabricantes. Na Figura 13 pode-se observar o material de um fornecedor aplicado sobre o filme de transparência.



**Figura 13: Amostras depositadas sobre o filme de transparência e deixadas para o processo de cura à temperatura ambiente.**

Após a cura, os filmes foram cuidadosamente removidos da superfície das transparências e foram recortados com medidas de 7 cm por 7 cm. Para cada fabricante foram preparadas cinco amostras. As amostras dos fabricantes A, B e C foram enumeradas de 1 a 5, para a sua identificação na realização dos experimentos. Na Figura 14 podem ser observados a amostra retirada da transparência e a amostra recortada.

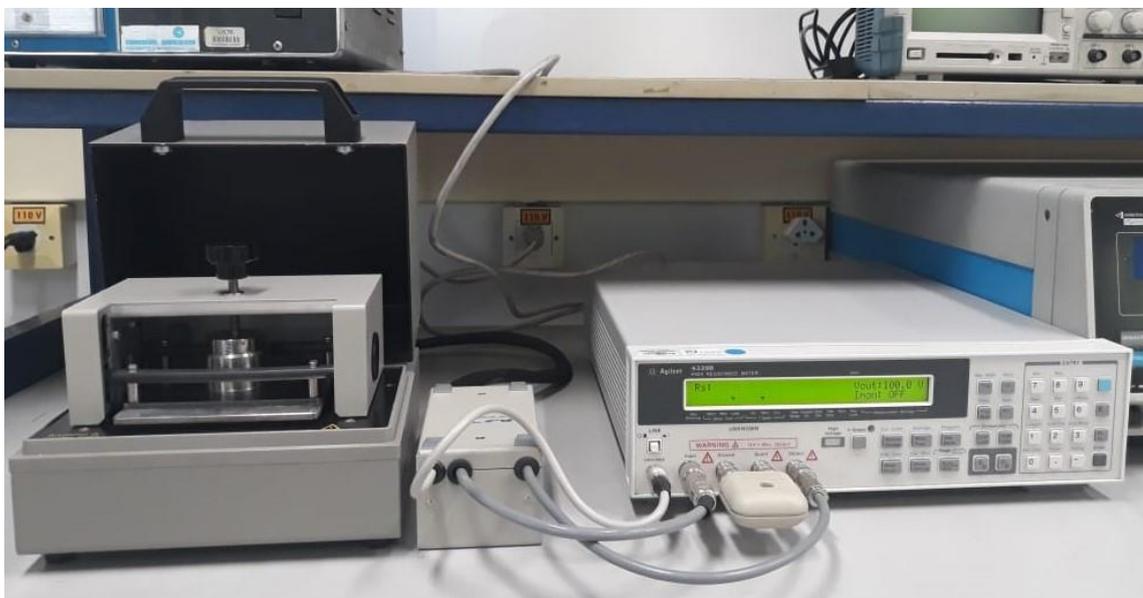


**Figura 14: À esquerda a amostra retirada do filme de transparência e à direita a amostra retirada recortada com as medidas necessárias para a realização dos ensaios.**

Após as amostras terem sido recortadas, realizou-se a limpeza das duas superfícies com álcool isopropílico e papel Wypall.

### 5.2.2 Medida de resistividade volumétrica

Para o estudo, foi utilizado o método recomendado pela norma ASTM D 257 [27] próprio para materiais de características isolantes. Para avaliação da resistividade volumétrica, foi utilizado o equipamento *Agilent 4329 B (High resistance meter)* dotado de chave seletora e célula para medida de resistividade como determinado da norma ASTM D257 [27]. Este equipamento pode ser visualizado na Figura 15.



**Figura 15: Equipamento Agilent 4329 B (*High resistance meter*) dotado de chave seletora e célula de resistividade.**

Para esta medida aplicou-se durante o tempo de um minuto um degrau de tensão contínua de 1000 V. Após este degrau de tensão foram coletadas de forma automática 128 medidas e realizada uma média pelo próprio equipamento, sendo a média considerada como uma medida realizada. Então, foram realizadas 5 medidas para cada amostra e calculado o resultado médio bem como desvio padrão associado. Este procedimento foi realizado com as amostras em situação sem envelhecimento e na sequência repetido para as amostras envelhecidas.

### 5.2.3 Medida da tangente de perdas dielétricas

Para se realizar esta medida a amostra é colocada na célula de ensaios dielétricos. Esta célula possui um micrômetro, com o qual se realiza a medida da espessura da amostra. A célula é colocada dentro da gaiola de Faraday e ligada a interface dielétrica e ao analisador.

No analisador são inseridas as informações referentes ao diâmetro dos eletrodos da célula de ensaio dielétricos, espessura da amostra, tensão de ensaio 3 V e as frequências inicial (10 Hz) e final (100 kHz) do ensaio. Também são programadas as medidas que serão retornadas pelo equipamento, neste caso a tangente de perdas. Para cada amostra foram realizadas 3 medidas e tomada como medida final a média aritmética e calculado o desvio padrão. O procedimento foi realizado nas amostras sem envelhecimento e na sequência aplicou-se a mesma metodologia para as mesmas amostras envelhecidas 200 h e 500 h em QUV. Na Figura 16 pode-se observar o conjunto de equipamentos utilizado para a realização da medida da tangente de perdas.



**Figura 16: Conjunto utilizado para realização da espectroscopia dielétrica, para obtenção da tangente de perdas.**

### 5.2.4 Envelhecimento em QUV

O ensaio de envelhecimento em QUV segue o estabelecido na norma ASTM G154/16, com lâmpada fluorescente UVB, irradiância de 0,71 W/m<sup>2</sup> (a 310 nm), ciclos de 4 horas com radiação UV a 60 °C e 4 horas de spray de água deionizada a 50 °C, incidência de 90°.

As cinco amostras de cada fabricante tiveram o processo de envelhecimento realizado em câmara de QUV pelos tempos de 200 horas e 500 horas. Ao término das 200 h, as amostras foram retiradas e realizadas as medidas de espectroscopia dielétrica, resistividade superficial e volumétrica e na sequência foram novamente colocadas na câmara para o processo de envelhecimento pelas 300 horas restantes. Na Figura 17 pode-se observar a câmara de QUV.



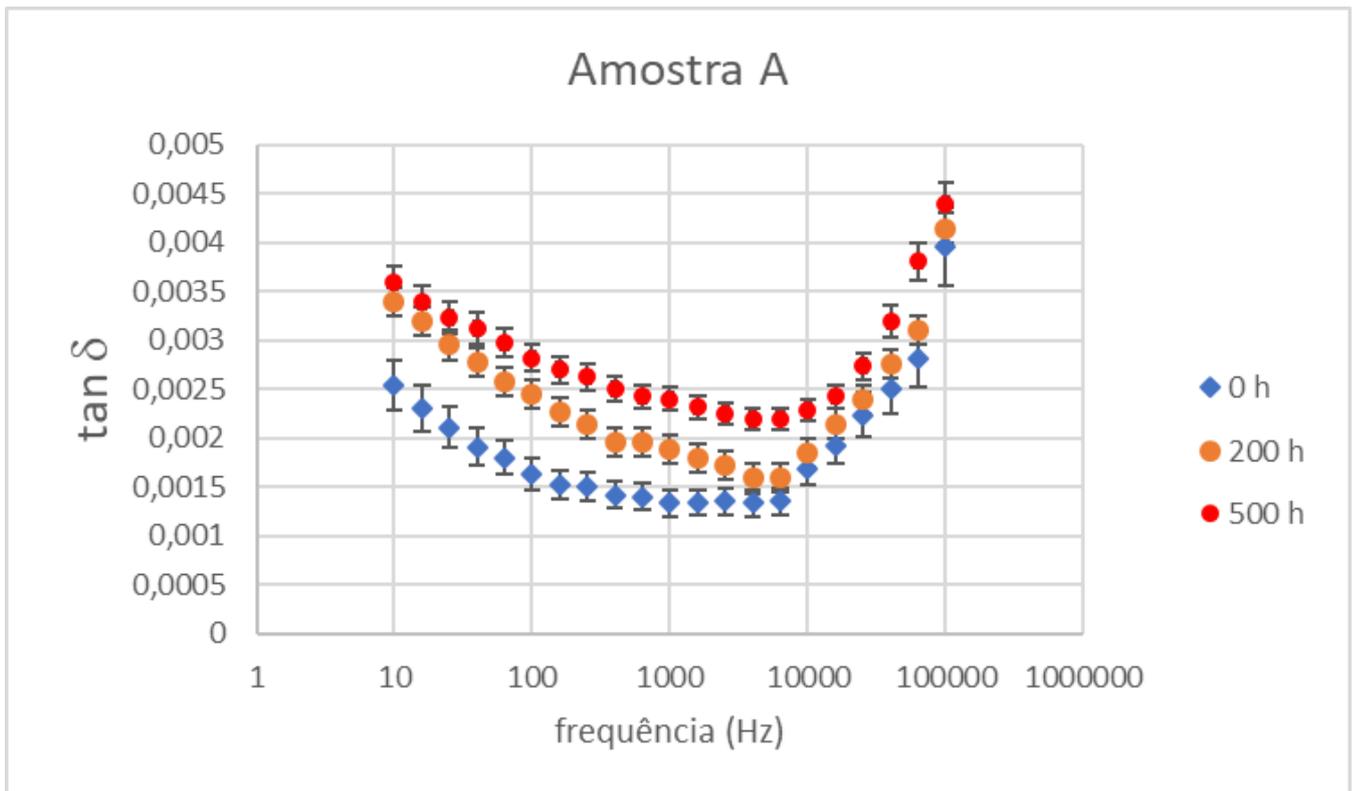
**Figura 17: Equipamento QUV utilizado no processo de envelhecimento das amostras.**

### 5.3 Resultados e discussões

Na sequência serão apresentados os resultados obtidos por meio da técnica de espectroscopia dielétrica onde se avaliou a tangente de perdas dielétricas, e as medidas de resistividade superficial e volumétrica.

### 5.3.1 Resultados da tangente $\delta$

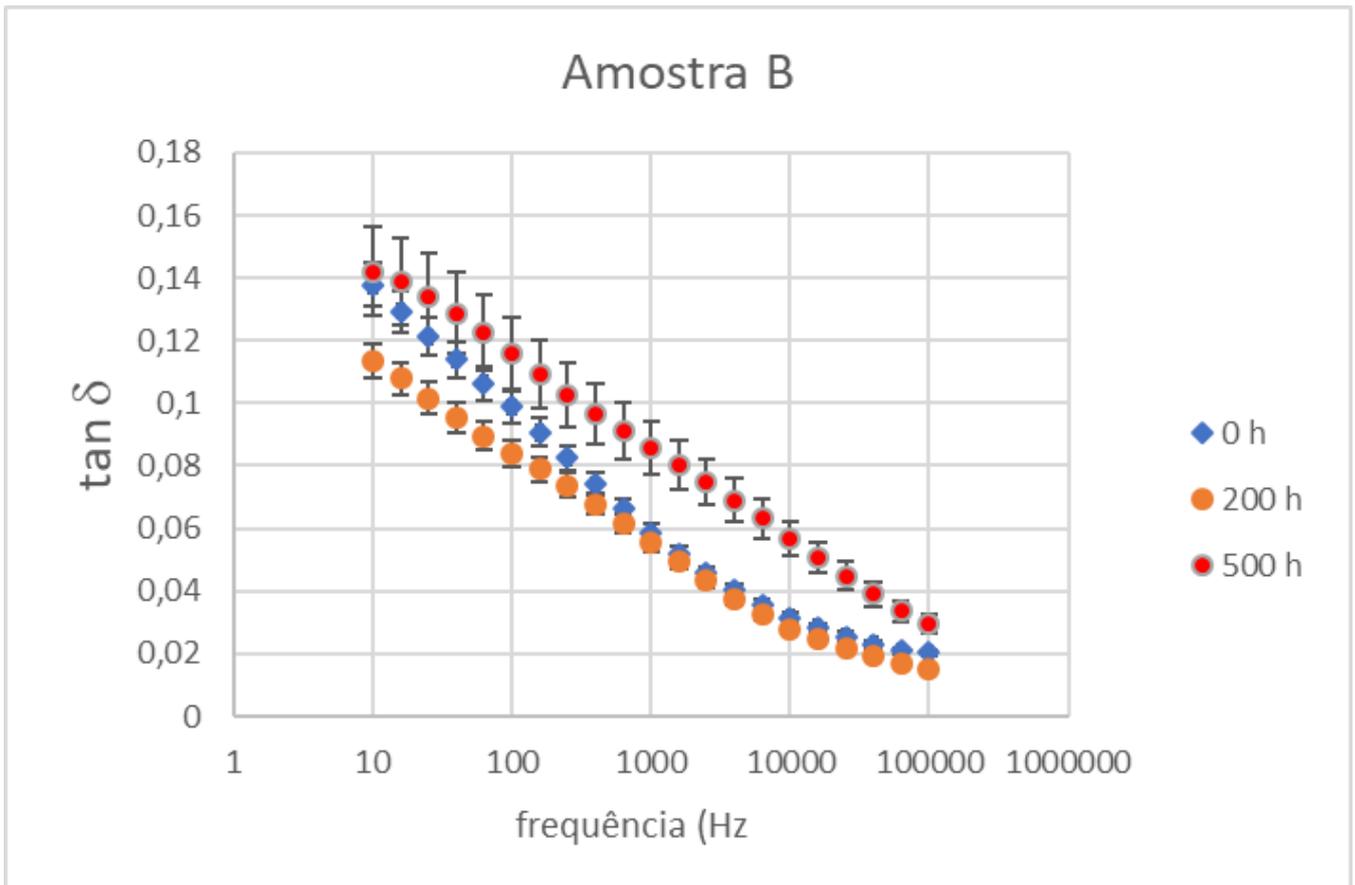
Após realizadas as medições da tangente  $\delta$  nas três amostras A, B e C, em três etapas de envelhecimento, sem envelhecimento (0 h), 200 h e 500 h de envelhecimento em QUV, e realizadas as médias aritméticas e os desvios padrões correspondentes obtiveram-se os resultados apresentados nos gráficos da Figura 18 à Figura 20, onde as barras de erros estão representando o desvio padrão.



**Figura 18: Resultado da tangente de perdas dielétrica média das três medidas realizadas sobre 5 amostras do fabricante A, para a situação sem envelhecimento, com envelhecimento em QUV de 200 h e 500 h.**

Observando os resultados apresentados para as amostras do fabricante A, como mostra o gráfico da Figura 18, inicialmente observa-se que o valor do fator de perdas dielétrica para a situação sem envelhecimento (0 h) para a frequência de 1 kHz, encontra-se na ordem de grandeza informada no manual do produto (0,001). Observa-se que para este conjunto de amostras ocorre uma tendência de elevação do fator de perdas dielétricas à medida que o tempo de envelhecimento aumenta, aumentando aproximadamente 0,0005 para 200 h e o mesmo valor para 500 h. O aumento do fator de perdas com o tempo de envelhecimento como pode ser observado na equação (9) pode ser atribuída a duas situações, sendo a primeira um

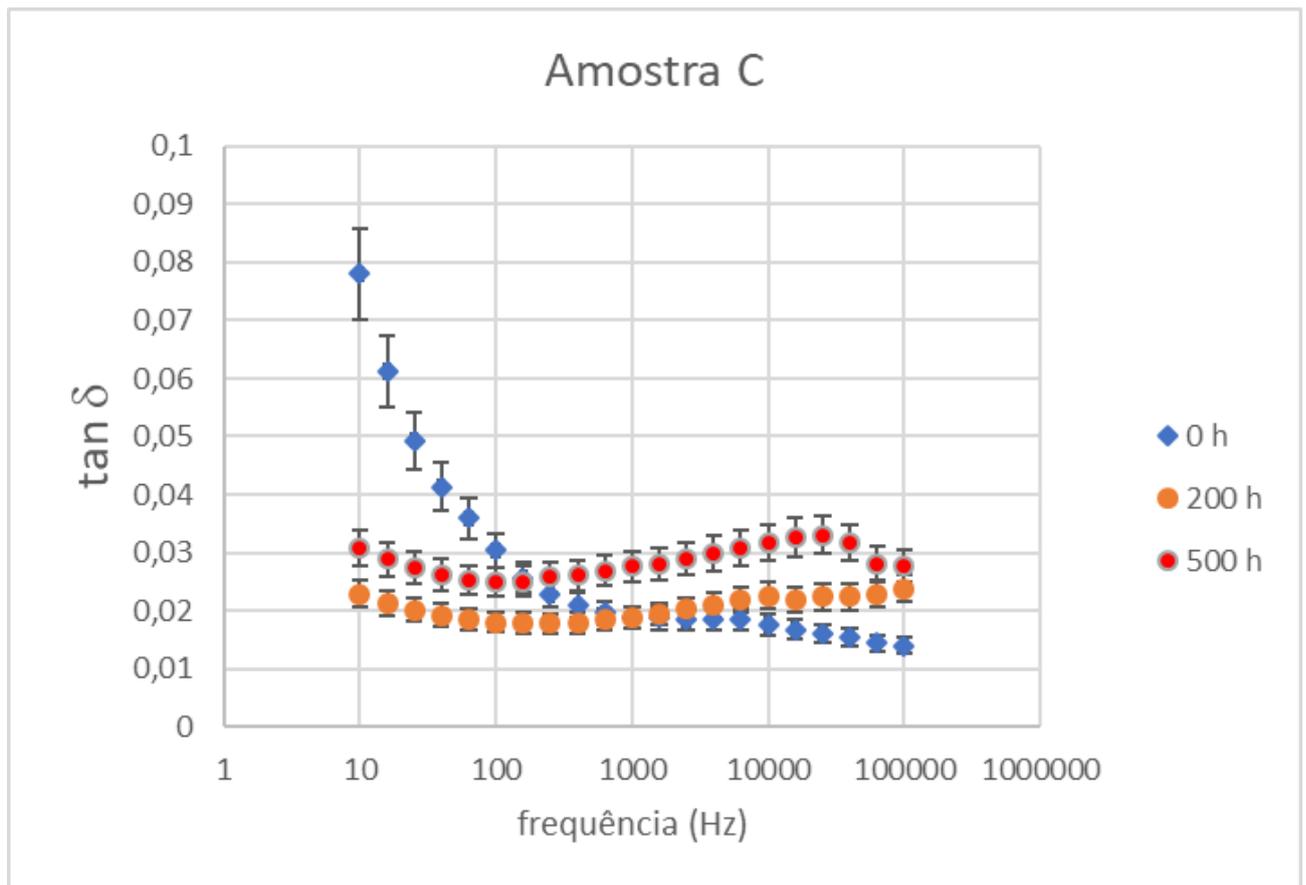
aumento da condutividade da amostra ou uma redução de sua permissividade dielétrica (capacitância). Um aumento na condutividade, implica no aumento de portadores de carga elétrica em movimento no material, sendo possível no processo de envelhecimento em função de quebras de cadeias ou reações químicas que liberem portadores de carga. No caso da redução da permissividade dielétrica esta seria possível em função da redução de grupos laterais que se apresentam como dipolos elétricos, que ocorreria com processos de entrecruzamentos ou pelo fenômeno da pós cura.



**Figura 19: Resultado da tangente de perdas dielétrica média das três medidas realizadas sobre 5 amostras do fabricante B, para a situação sem envelhecimento, com envelhecimento em QUV de 200 h e 500 h.**

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 19, para as amostras do fabricante B, apresentam um fator de perdas dielétricas elevado quando comparado ao valor esperado para materiais dielétricos (na ordem de milésimos), porém se encontra na frequência de 1 kHz na ordem de grandeza informada no manual do produto do fabricante (0,05). O diferencial destas amostras de fabricante encontra-se no fato dele apresentar um percentual em sua composição de alumina, um material utilizado para evitar o trilhamento elétrico. Este material eleva a

componente de condutiva justificando assim o alto fator de perdas dielétricas. Outro aspecto refere-se ao comportamento sobre envelhecimento, onde se observa que nas primeiras 200 h de envelhecimento o fator de perdas dielétricas tende a diminuir e volta a aumentar para 500 h de envelhecimento. Uma explicação possível para este fenômeno se refere ao fato de estar ocorrendo o processo de pós cura das amostras durante o processo de envelhecimento, como possível redução do número de dipolos elétricos, reduzindo assim o valor da permissividade dielétrica. Este fenômeno é observado em outros materiais poliméricos.



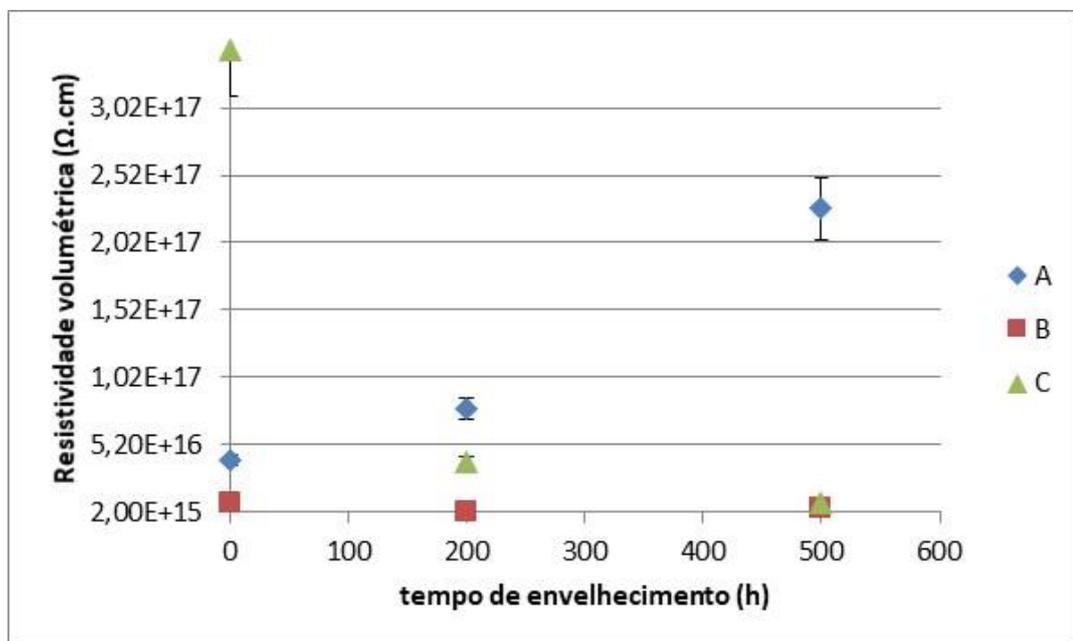
**Figura 20: Resultado da tangente de perdas dielétrica média das três medidas realizadas sobre 5 amostras do fabricante C, para a situação sem envelhecimento, com envelhecimento em QUV de 200 h e 500 h.**

Observando os resultados para o conjunto de amostras C, apresentado no gráfico da Figura 20, verifica-se situação similar à observado para a amostra B onde tem-se um fator de perdas dielétricas elevado quando comparado ao valor esperado para materiais dielétricos (na ordem de milésimos), porém se encontra na frequência de 1 kHz na ordem de grandeza informada no manual do produto do fabricante (0,01). A exemplo das amostras de fabricante B, as amostras do fabricante C apresentam em sua composição um percentual de alumina. Outro

aspecto refere-se ao comportamento sobre envelhecimento, onde se observa que nas primeiras 200 h de envelhecimento o fator de perdas dielétricas tende a diminuir e volta a aumentar para 500 h de envelhecimento. A explicação para este fenómeno pode ser fundamentada na mesma utilizada para a amostra B.

### 5.3.2. Medidas de resistividade volumétrica

Os resultados obtidos para as médias das resistividades volumétrica e respectivo desvio padrão representado pelas barras de erros podem ser observados no gráfico da Figura 21.



**Figura 21: Média da resistividade volumétrica para as amostras A, B, C sem envelhecimento e com envelhecimento de 200 h e 500 h em QUV.**

Observando o gráfico da Figura 21, verifica-se as amostras do fabricante A apresentam os maiores valores de resistividade volumétrica, quando comparados às amostras dos fabricantes B e C. As amostras do fabricante A, com o envelhecimento tiveram um aumento da resistividade volumétrica, com conseqüente redução da condutividade elétrica. Para as amostras dos fabricantes B e C observa-se que a resistividade volumétrica se encontra uma ordem de grandeza abaixo das amostras do fabricante A. Observa-se para as amostras do fabricante B e C que ocorre uma elevação da resistividade volumétrica nas primeiras 200 h de envelhecimento seguida de uma queda para 500 h de envelhecimento. Pode-se supor que as

amostras B e C possuem menor valor de resistividade volumétrica quando comparadas à amostra A em função da presença da alumina em suas composições como discutido antes.

Mesmo as amostras apresentando estes comportamentos, os valores de resistividade volumétrica obtidos encontram-se na ordem de grandeza esperada para materiais poliméricos isolantes.

Ao se observar os resultados obtidos para a tangente de perdas dielétrica e os resultados obtidos para as medidas de resistividade volumétrica, observa-se o comportamento da tangente de perdas dielétricas para as amostras A, B e C, deve ser explicado pela variação da permissividade do material, ou seja de sua capacitância, pois as medidas de resistividade volumétrica demonstram um comportamento inverso ao observado pelo fator de perdas, onde um aumento na resistividade volumétrica deveria implicar em uma redução da condutividade e consequente redução do fator de perdas como pode ser observado na equação  $\tan\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon'}$ .

Para as amostras do fabricante A verificou-se que com o tempo de envelhecimento o fator de perdas dielétricas aumentou, podendo ser explicado pelo fato da permissividade das amostras diminuir. Para as amostras dos fabricantes B e C verificou-se um valor de fator de perdas mais elevado se comparado as amostras do fabricante A, como uma queda do fator de perdas dielétricas para as primeiras 200 h de envelhecimento, seguido de um aumento, mesmo fato observado nas medidas de resistividade volumétrica, implicando portanto para as primeiras 200 h de envelhecimento num aumento da permissividade seguido de sua queda para 500 h de envelhecimento.

Os resultados obtidos para o fator de perdas dielétricas indicaram que com o tempo de envelhecimento pode-se observar alterações no fator de perdas dielétricas. Dentro daqueles valores estabelecidos pelos fabricantes, observa-se que o fator de perdas dielétricas poderá, associado às outras propriedades físico-químicas estabelecidas no projeto P&D auxiliar na especificação de RTVs a serem adquiridos pelas concessionárias transmissoras ou distribuidoras de energia que venham a adotar esta nova tecnologia emergente no Brasil.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma técnica de fabricação de amostras de revestimentos de RTV na forma de filmes, que possibilitaram com técnicas convencionais de espectroscopia dielétrica e medidas de resistividade volumétrica se acompanhar a alteração destas propriedades físicas com o processo de envelhecimento. É importante ressaltar que inicialmente devido à dificuldade de se fazer as amostras destes materiais eram confeccionadas placas com espessura aproximada de 2 mm, inviabilizando assim o acompanhamento destas propriedades com técnicas convencionais.

Os resultados obtidos com a espectroscopia dielétrica na faixa de frequência entre 10 Hz e 100 kHz, focado na medida do fator de perdas dielétricas em 1 kHz em três tipos de revestimentos de RTV de fabricantes diferentes puderam demonstrar que o fator de perdas dielétricas pode ser usado como uma grandeza física para auxiliar na especificação de revestimentos a base de silicone, quando combinado com outras propriedades físico-químicas destes materiais.

Outro resultado relevante obtido refere-se à medida da resistividade volumétrica das mesmas amostras nas quais se realizou a espectroscopia dielétrica, demonstrando que a principal componente que sofre alteração é a componente de polarização do material em função de uma possível alteração de sua permissividade dielétrica.

## 7. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros são apresentadas as seguintes linhas de pesquisa:

Sugere-se o acompanhamento do fator de perdas dielétrica e medida de resistividade volumétrica, para tempos de envelhecimento mais elevados, bem como avaliando as amostras com outros tipos de envelhecimento, como por exemplo, temperatura, campo elétrico e trilhamento elétrico.

Realizar estudos de espectroscopia dielétrica na mesma faixa de frequências realizando as medidas da permissividade real e imaginária, como o objetivo de se estudar os possíveis mecanismos que sofrem alterações com os processos de envelhecimento, que implicam nas alterações do fator de perdas dielétricas, demonstrando assim a suposição que a alteração do fator de perdas dielétricas está associado a alteração da permissividade dielétrica (capacitância das amostras).

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E.A. CHERNEY. RTV silicone: A high tech solution for a dirty insulator problem. IEEE Electrical Insulation Magazine, V. 11, N. 6 Nov./Dez. 1995
- [2] JIA. Z.; FANG. S.; GAO. H. et al. Development of RTV Silicone Coatings in China: Overview and Bibliography. IEEE electrical insulation Magazine, v. 28, n.2, p.28-41, 2008
- [3] A.O. MARIA RODRIGUES. et al. Avaliação do Desempenho Elétrico de Isoladores de Vidro Revestidos por Verniz Nanométrico. Trabalho desenvolvido no âmbito do programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico do setor de energia elétrica regulada pela ANEEL. Disponível em: < [www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2017/09/Avalia%C3%A7%C3%A3o-do-Desempenho-El%C3%A9trico-de-Isoladores-de-Vidro-Revestidos-por-Verniz-Nanom%C3%A9trico.pdf](http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2017/09/Avalia%C3%A7%C3%A3o-do-Desempenho-El%C3%A9trico-de-Isoladores-de-Vidro-Revestidos-por-Verniz-Nanom%C3%A9trico.pdf) > Acesso em: 08 de outubro de 2019.
- [4] Imagem copiada do site: <https://embramata.tatensao.com.br/loja/isolador-disco-suspensao-de-porcelana/>. Data de acesso dia 06/11/2019.
- [5] Imagem copiada do site: <https://www.manutencaoesuprimentos.com.br/isolantes-eletricos/>. Data de acesso dia 13/11/2019.
- [6] Imagem copiada do site: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/eletricidade-e-eletronica/adetech/produtos/elementos-de-transmissao/isolador-polimerico>. data de acesso dia 13/11/2019
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Guia para seleção de isoladores sob condições de poluição. IEC/TR 60815: 2005.
- [8] G. M. Tena, R. H. Corona, I. R. Vazquez Experiences on pollution level measurement in Mexico. Electric Power Systems Research, v. 76, p. 58-66, 2005.
- [9] W. L. Vosloo, F. Engelbrecht, J. P. Holtzhausen et al. Insulator Pollution Monitoring Program for Namibia. IEEE Africon, p. 1-6, 2007
- [10] M. R. Shariati, A. R. Moradian, M. Rezaei et al. Providing the pollution map in South West provinces of Iran based on DDG Method. IEEE/PES Transmission and Distribution, p. 1-5, 2005.
- [11] E. A. Cherney, A. El-Hag, S. Li, R.S. Gorur, L. Meyer, I. Ramirez, M. Marzinotto, J-M. George. RTV Silicone Rubber Pre-Coated Ceramic Insulators for Transmission Lines. IEEE Trans. on Dielect. and El. Insulation, v. 20, n. 1, p. 237-244, 2013.
- [12] M. Amin, M. Akbar, S. Amin. Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation (na overview). Rev. Adv. Mater. Sci., v. 16, p. 10-26, 2007
- [13] Nilton dos Santos Filho, et al. Redução de Custos de Manutenção e Melhoria de Desempenho com a Utilização de Cobertura RTV em Isoladores de SEs e LDs. XVIII SENDI 2008, Olinda, Pernambuco, Brasil.
- [14] Fernando Piazza et al. Monitoramento da Corrente de Fuga, Descargas Parciais e Resistência de Isolamento de Isoladores sob Poluição Industrial e Litorânea. XVIII SENDI 2008, Olinda, Pernambuco, Brasil

---

[15] MUSTAFA, T. I. A. H.; MEYER, L. H.; CABRAL, S. H. L.; ALMAGUER, H. A. D.; PUCHALE, L. H. B. The Experience with the Use of RTV to Mitigate Line Outages in Southern Brazil. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2018.

[16] FONTE:<https://www.wacker.com/cms/en/products/product/product.jsp?product=13343> acessado em 11/09/2019.

[17] OM-THONG, S. et. al. Comparison of Ageing Deterioration of Silicone Rubber Housing Material for Outdoor Polymer Insulators. International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, v. 5, n. 12, p. 1137-1144, 2011.

[18] Paoli, M. A. D. Degradação e Estabilização de Polímeros. 2ª versão on-line (revisada). ed. [S.I.]: Chemkeys, 2008.

[19] DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J. C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. London: Peter Peregrinus Ltd., 1992.

[20] GJAERDE, A. C. Multifactor Aging Models – Origin and Similarities. IEEE EIM, V. 13, n. 1, p. 6-13, Jan./Feb. 1997.

[21] Rabello, M. S. Aditivização de Polímeros. 2ª. ed. São Paulo: Artliber, 2000.

[22] MUNARO, M. et al. Fatores de Influência na Compatibilidade de Cabos Protegidos, Isoladores e Acessórios Utilizados em Redes Aéreas Compactas de Distribuição de Energia Elétrica, sob Condições de Multi-estressamento. Anais do II Citenel, 2003. 555-560.

[23] Taréiev, B. M. Física de lós materiales dieléctricos. 1ª. Ed. URSS, 1978.

[24] R. Bartinickas and R.M. Eichhorn. Engineering Dielectrics, Vol. II A e B. ASTM Publication. Philadelphia, 1983

[25] Imagem copiada do site: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422002000400019](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422002000400019) data de acesso: dia 16/11/2019.

[26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS .ASTM G154 – 16: Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials. West Conshohocken, PA (USA), 2016

[27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 257-14: Standard test methods for DC resistance or conductance of insulating materials, West Conshohocken, PA (USA), 2014.