

Estudo de cabos e acessórios das redes protegidas 25 kV da CELESC

Fernando Hidalgo Molina, José Eduardo Volponi, Joceli M. G. Angelini, José Antonio D. Rossi

Resumo – O objetivo deste trabalho é mostrar os resultados obtidos no estudo de cabos e acessórios das redes protegidas da CELESC. Tal estudo foi motivado pela necessidade do setor elétrico em estabelecer requisitos de desempenho para os materiais poliméricos utilizados nas redes de energia. Neste trabalho foram estudados alguns produtos poliméricos da rede protegida da CELESC – espaçadores, isoladores de ancoragem, isoladores tipo pino e cobertura de cabos – com objetivo de levantar requisitos de desempenho para aplicação na região litorânea de Santa Catarina, para especificações internas, bem como para complemento de alguns requisitos já sugeridos à ABNT. O objetivo foi alcançado através da realização de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório e de análise de algumas propriedades físico-químicas mais relevantes nas amostras, antes e após os envelhecimentos, bem como nas amostras retiradas de campo.

Palavras-chave – acessórios, cabos, desempenho, polímeros, requisitos.

I. INTRODUÇÃO

O estudo da degradação e estabilização de materiais poliméricos é relevante, desde que há uma demanda crescente na utilização desses materiais em produtos, equipamentos e acessórios de rede de distribuição de energia elétrica, o que gera a necessidade de conhecimento do desempenho destes componentes em condições normais de utilização, em diferentes situações de campo, para aumento de vida útil de isoladores e de outros produtos. A continuidade da integridade da rede de distribuição de energia elétrica deve ser assegurada com a introdução dos materiais poliméricos na fabricação de produtos, equipamentos e acessórios, em substituição aos materiais tradicionalmente utilizados. A aplicação específica de produtos poliméricos na região de concessão da

CELESC, com climas bem peculiares, requer estudos de adequação a estas condições. Mesmo para os produtos já largamente utilizados em outras regiões e em outros países, faz-se necessária uma definição de características ou requisitos de desempenho para os materiais poliméricos.

Diferentes produtos, como os isoladores, são importantes na distribuição de energia elétrica e na coordenação do isolamento, dos quais são requeridas características inerentes ao próprio isolamento. Há concordância com a tendência mundial na utilização crescente de equipamentos, produtos e componentes poliméricos em substituição aos demais, pelas propriedades intrínsecas destes polímeros e seus compósitos, desde que bem formulados e aditivados. Assim, o estudo da degradação e estabilização dos polímeros afeta, positivamente, a obtenção e manutenção das propriedades elétricas, mecânicas e químicas finais, requeridas dos produtos.

Portanto, há a necessidade do estudo das causas da degradação dos materiais poliméricos, com propostas de soluções alternativas e de levantamento de requisitos para a otimização de desempenho dos produtos. É bem conhecida a necessidade de adequação de materiais e condições de processamento às propriedades finais requeridas de produtos poliméricos, para a aplicação específica, e dentro daquele microclima específico. Dentro da ciência e tecnologia de materiais poliméricos, definem-se causas de início de degradação e de catalisadores de mecanismos de degradação de formas diferenciadas, dependendo do nível da radiação solar, dos poluentes atmosféricos ou não, do grau de salinidade, da temperatura e umidade relativa, entre outros, característicos de cada região deste país de extensão continental. É preocupante também a importação de produtos e tecnologias do exterior, aplicáveis ao clima tropical, diferenciado regionalmente. Assim, estes diferentes estudos se fazem necessários.

Os produtos poliméricos, como os isoladores e espaçadores, são de aplicação relativamente recente no setor elétrico e, portanto, é importante que sejam monitorados quanto a possíveis falhas, pois suas funcionalidades são imprescindíveis no isolamento, proteção e coordenação de isolamento das redes de energia elétrica. É de conhecimento que as propriedades desejáveis a estes produtos poliméricos não são bem conhecidas e ainda não foram bem estudadas, sob o ponto de vista de adequabilidade a micro-climas brasileiros ou mesmo em nível mundial. Assim, nota-se que até mesmo as especificações técnicas de órgãos normativos internacionais, como o CIGRÉ, ainda não têm definidas as características desejáveis para estes produtos poliméricos, o mesmo ocorre com a ABNT.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL

Agradecimentos à ANEEL e à CELESC, pelo apoio financeiro. “Este trabalho foi desenvolvido no programa de P&D ANEEL sob o número 0395-009/2006.”

Fernando Hidalgo Molina (fernandohm@celesc.com.br) trabalha na Companhia de Eletricidade do Estado de Santa Catarina;

José Eduardo Volponi (volponi@cpqd.com.br), Joceli M. G. Angelini e José A. D. Rossi (jrossi@cpqd.com.br) trabalham na Fundação CPQD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações.

Para a definição de requisitos de desempenho para os produtos poliméricos empregados nas redes da CELESC, e que fizeram parte do escopo deste projeto, foram realizados ensaios de envelhecimento acelerados por ultravioleta e temperatura, entre outros, com análise das variações em propriedades físico-químicas, mecânicas e elétricas, além da caracterização do estado de degradação de produtos poliméricos envelhecidos em campo. Como consequência, os requisitos propostos servem de base para a atualização técnica dos procedimentos operacionais, de especificações e de aceitação de produtos existentes na empresa para desempenho otimizado do produto.

Então, também através da normalização consegue-se uma internalização de resultados de P&D e do estado da arte em produtos poliméricos à concessionária. Através da promoção da otimização de desempenho de produtos, contribui-se para a integridade da rede de distribuição de energia elétrica, para consequente melhoria de índices de qualidade (DEC, FEC, DIC e FIC). Em suma, buscou-se o aumento de conhecimento para adequabilidade de produtos às condições climáticas locais; para definição de procedimentos operacionais como apoio à instalação e manutenção; para as definições das causas de degradações específicas; para a definição de requisitos de desempenho para especificações de produtos (aquisição e aceitação).

Os benefícios trazidos pela implantação dos resultados do projeto pela concessionária podem ser considerados de duas ordens:

a) redução de custos da energia interrompida, em função da melhoria da qualidade de isolamento das Linhas de Distribuição, que, de algum modo podem ser associados ao DEC;

b) redução de custos de manutenção corretiva quando há intervenções na rede por conta de defeitos na isolamento e componentes, que se espera, sejam reduzidos e de algum modo podem ser associados ao FEC.

Comparando-se o DEC - Duração Equivalente por Consumidor - em horas por ano, da Celesc com a média do Brasil, dos últimos anos, por exemplo, e o mesmo em relação ao FEC - Frequência Equivalente por Consumidor - em números de interrupção por ano, ou seja, estes dados em relação aos do Brasil e outras empresas que operam em condições semelhantes à Celesc, pode-se verificar que há margem para uma redução adicional nestes índices. Para tal, é necessária a implantação de medidas que visem evitar a interrupção de fornecimento assim como a diminuição do tempo de reparo; uma das medidas que pode contribuir para isso é aumentar a confiabilidade de cabos, isoladores e espaçadores da distribuição, evitando-se falhas por fim de vida antecipada ou por falhas de produto. Com a introdução dos produtos poliméricos, é importante que se estabeleçam padrões de qualidade para esses produtos, posto serem uma tecnologia inovadora, e pelos micro-climas diferentes a serem aplicados.

O aumento da confiabilidade do sistema de distribuição obtido através da implantação dos resultados deste projeto de pesquisa possibilitará uma redução, principalmente no FEC, mas terá reflexos também no DEC, já que a substituição de produtos poliméricos por falha no componente requer um consumo de tempo considerável. Se considerada uma

diminuição de 5% no índice DEC (diminuição de 1 hora/ano), motivados pela utilização de produtos poliméricos com alta confiabilidade, ter-se-á uma economia /ano da ordem de R\$ 3,5 milhões de reais (considerando-se como US\$ 1,2 o custo médio de cada kW.h interrompido). Portanto, o custo de desenvolvimento das soluções (da ordem de R\$ 400.000,00 reais) teriam um retorno de investimento em menos de um ano.

O projeto de P&D, “Estudo de cabos e acessórios das redes protegidas 25 kV da CELESC”, pertenceu ao Projeto ANEEL, P&D 0395-009/2006 do ciclo 2006-2007, teve duração de dois anos e quatro meses e foi concluído em março/2011. Esta pesquisa e desenvolvimento foi realizada por uma parceria entre as entidades CELESC e Fundação CPqD.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A. Caracterização do problema

Inicialmente foi realizado um levantamento de problemas e do histórico de ocorrência de falhas em campo. Foram escolhidos os produtos poliméricos a serem estudados (cabos, espaçadores e isoladores 25 kV) e os campos de teste de onde estes produtos foram retirados, conforme facilidade operacional da concessionária.

As figuras 1 a 3 ilustram alguns dos problemas encontrados nas visitas a campo realizadas na região de concessão da CELESC, para os diferentes produtos escolhidos para fazerem parte do escopo do projeto.

Foram selecionadas amostras novas e retiradas de campo para as caracterizações físico-químicas, mecânicas e elétricas, para posterior comparação com amostras após envelhecimentos acelerados em laboratório (em “weather-ometer”, estufa e água), a fim de levantar os requisitos funcionais e de desempenho.



Figura 1: Isolador de ancoragem de silicone



Figura 2: Isolador espaçador de PEAD



Figura 3: Isolador de sustentação tipo pino de PEAD

B. Materiais

Na tabela I, a seguir, são apresentadas as amostras que foram obtidas pela CELESC para o desenvolvimento das atividades previstas no projeto.

Tabela I: Amostras analisadas no projeto

Espaçadores de PEAD	
Fabricante	Origem
A	Almoxarifado da CELESC
B	Campo, com pelo menos 4 anos de uso
Isoladores tipo pino de PEAD	
Fabricante	Origem
C	Almoxarifado da CELESC
B	Campo, com pelo menos 4 anos de uso
Isoladores de ancoragem tipo bastão de silicone	
Fabricante	Origem
D	Almoxarifado da CELESC
D	Campo, com pelo menos 3 anos de uso
Cabos isolados com cobertura de XLPE	
Fabricante	Origem
E	Almoxarifado da CELESC
E	Campo, com pelo menos 7 anos de uso
F	Campo, com pelo menos 7 anos de uso

Amostras que foram retiradas do almoxarifado da concessionária, ou seja, sem uso e amostras que foram retiradas da rede, com um determinado tempo de uso e com comprovados problemas operacionais, tais como: peças quebradas, com fissuras e trincas e produtos que apresentaram queda de desempenho elétrico.

C. Envelhecimentos acelerados

Inicialmente, as amostras retiradas do almoxarifado da concessionária, exceto os cabos isolados, foram submetidas a diferentes tipos de envelhecimentos acelerados em laboratório, descritos a seguir:

Envelhecimento acelerado em Weather-ometer – para avaliação do efeito da radiação ultravioleta presente na luz solar sobre o desempenho dos materiais poliméricos.

As amostras foram expostas durante um período total de 4320 horas (seis meses) aos seguintes parâmetros de ensaio de acordo com a norma ASTM G155 [1], ciclo N°1:

- Lâmpada de arco xenônio de 6500 W, com filtros de borossilicato;
- Irradiância de 0,35 W/m² em 340 nm;
- Temperatura do painel preto = (63 ± 3)°C;
- Ciclos de 102 minutos de luz, seguido de 18 minutos de luz e aspersão de água.

Envelhecimento em estufa com circulação de ar – para avaliação do efeito de elevadas temperaturas sobre o desempenho dos materiais poliméricos.

As amostras foram colocadas no interior de uma estufa com circulação de ar e expostas a uma temperatura de 120°C, por um período total de exposição de 4320 horas (seis meses).

Envelhecimento em banho de água – para avaliação do efeito da exposição prolongada dos materiais poliméricos em água, sob temperatura moderada.

As amostras foram imersas em água a 40°C, num tanque termostaticado, por um período total de exposição de 4320 horas (seis meses).

D. Ensaios de caracterização

1) Caracterização elétrica

As amostras de espaçadores, isoladores tipo pino e isoladores bastão foram caracterizadas eletricamente através da medida da corrente de fuga em 13,4 kV, a seco e sob pulverização de água. Os ensaios foram realizados no laboratório da UNICAMP (FEEC-LAT).

2) Caracterização mecânica

As amostras de espaçadores e isoladores tipo bastão foram caracterizadas mecanicamente através da medida da resistência à tração numa máquina universal de ensaios da MTS.

3) Caracterização físico-química

As amostras foram submetidas a diversos ensaios de caracterização físico-química

- Análise termogravimétrica (TGA) – A análise termogravimétrica foi realizada em um equipamento “DuPont instruments”, modelo 951. O ensaio foi realizado em atmosfera de nitrogênio e com taxa de aquecimento de 20°C/min a partir da temperatura ambiente até 600°C.
- A calorimetria exploratório diferencial (DSC) foi realizada em um equipamento modelo 2910 da TA Instrument. Através da técnica de DSC é possível obter alguns parâmetros bastante interessantes para avaliação da degradação térmica de um determinado material, entre eles podemos destacar a Temperatura de fusão (T_m), o Tempo de Oxidação Induzida (OIT) e a Temperatura de Início da Oxidação (OOT), que foram medidos neste trabalho. Os métodos de ensaio de OIT e OOT foram baseados nas normas ASTM D4565 [2] e ASTM E2009 [3], respectivamente.
- A densidade dos polímeros foi medida com base no método de ensaio descrito na norma ASTM D 792 [4], que consiste, basicamente, em calcular o volume deslocado por uma massa de material, num líquido de densidade conhecida, com auxílio de um picnômetro e uma balança analítica.
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) – O objetivo da utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura neste trabalho foi avaliar o estado de degradação superficial dos produtos após os diferentes envelhecimentos acelerados. As imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas em um equipamento JEOL, modelo JSM-5800LV, utilizando detecção por elétrons retroespalhados (BS), tensão de aceleração de 25 keV e ampliação de 85 vezes.

E. Resultados e discussão

A seguir são apresentados, de forma resumida, os resultados mais relevantes das caracterizações elétricas, mecânicas e físico-químicas dos produtos (não envelhecidos, após envelhecimento acelerado em laboratório e retirados de campo) estudados no projeto.

1) Caracterização elétrica

Os resultados de corrente de fuga em 13,4 kV, com pulverização de água, são apresentados na tabela II. Em vermelho são mostrados os maiores valores medidos para cada produto.

Tabela II: Resultados da caracterização elétrica

Corrente de fuga, com pulverização de água, em 13,4 kV (μA)			
Envelhecimento	Espaçador	Isolador bastão	Isolador pino
Inicial	29,9	15,4	58,8
Weather-ometer	279,0	533,7	73,7
Estufa	33,2	20,7	54,7
Água	34,4	20,6	60,0
Campo	1130	1600	N.R.

N.R. = Não Realizado

Com base nos resultados da tabela II, pode-se fazer os seguintes comentários gerais a respeito da caracterização

elétrica:

- A medida de corrente de fuga, com pulverização de água, se mostrou a propriedade elétrica mais sensível aos efeitos degradativos ocorridos nos materiais poliméricos estudados neste projeto;
- Os produtos poliméricos mais afetados pela degradação, com base nos resultados da corrente de fuga com pulverização de água, foram o espaçador (PEAD) e o isolador de ancoragem tipo bastão (silicone), após envelhecimento em Weather-ometer e em campo;
- Os maiores valores de corrente de fuga após envelhecimento em Weather-ometer e em campo indicam que esta propriedade é mais susceptível aos efeitos da degradação causada pela radiação ultravioleta do sol, que é a preponderante nesses dois tipos de envelhecimentos.

2) Caracterização mecânica

Somente as amostras de espaçadores e isoladores tipo bastão foram caracterizadas mecanicamente, antes e após os envelhecimentos acelerados em laboratório. Tais amostras não foram avaliadas após envelhecimento em campo, em função da quantidade e do estado das mesmas.

No caso do isolador tipo pino, o ensaio não foi realizado devido à falta de normalização específica para este produto e conseqüente definição dos parâmetros de ensaio mais adequados.

As figuras 4 e 5 mostram os resultados dos ensaios mecânicos realizados nos espaçadores e isoladores tipo bastão.

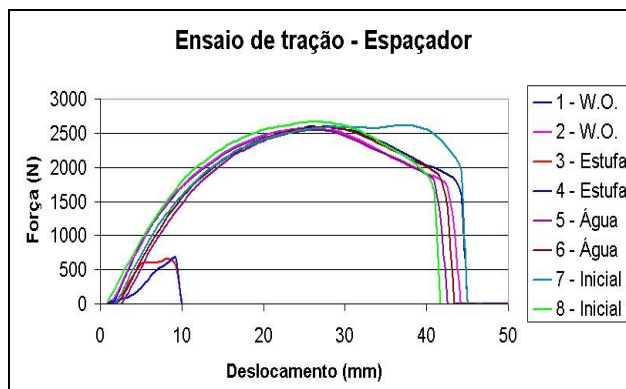


Figura 4: Resultados dos ensaios mecânicos no espaçador de PEAD

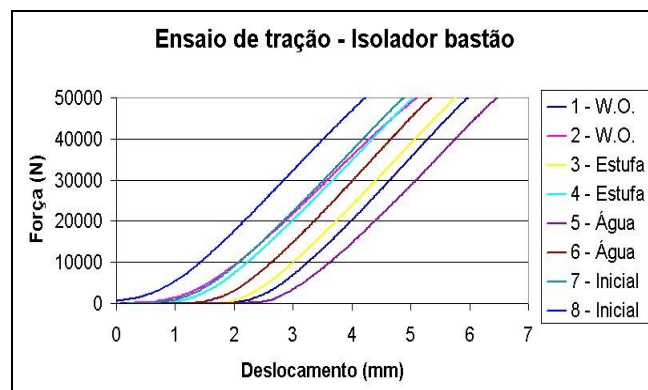


Figura 5: Resultados dos ensaios mecânicos no isolador bastão de silicone

Diante dos resultados da caracterização mecânica realizada nos produtos descritos anteriormente, é possível fazer as seguintes considerações:

- No caso dos espaçadores, foi observado que o tipo de envelhecimento que mais afeta a propriedade mecânica é o envelhecimento térmico em estufa. As amostras submetidas a este envelhecimento apresentaram forças de ruptura da ordem de 600 N. De acordo com a especificação CELESC NE-103E, a carga mecânica nominal de ruptura para este produto é de 4500 N, ou seja, as amostras envelhecidas em estufa não atenderam a este requisito. As demais não atingiram este valor em função da deformação e escorregamento das garras, não sendo possível verificar o atendimento ou não do requisito.
- No caso dos isoladores bastão, todas as peças testadas, independente do tipo de envelhecimento, suportaram a força limite de tração de 50 kN sem deformação, descolamento do elemento central ou ruptura. O limite de tração utilizado no teste, de 50 kN, é a carga mecânica nominal de ruptura estabelecida para este produto na especificação CELESC E-313.0046. Este comportamento foi atribuído ao fato de que a degradação do material do revestimento e das saias, no caso o silicone, não influencia na resistência mecânica do produto final, que depende basicamente das características mecânicas do núcleo (fibra de vidro impregnada com resina).

3) Caracterização físico-química

Análise Termogravimétrica (TGA)

A tabela III mostra um sumário das temperaturas de decomposição térmica dos produtos estudados, obtidas da curva TGA no pico máximo da primeira derivada, após os diferentes tipos de envelhecimentos.

De uma maneira geral, não foi observada diferença significativa na temperatura de decomposição dos materiais retirados de campo em relação aos envelhecidos em laboratório, confirmando que a análise por TGA não é a técnica mais adequada para avaliação do estado de degradação dos produtos poliméricos estudados neste projeto, uma vez que os produtos visivelmente degradados apresentaram praticamente a mesma temperatura de decomposição que os não envelhecidos.

Tabela III: Resultados da temperatura de decomposição térmica por TGA

Temperatura de decomposição térmica (°C)				
Envelhecimento	Espaçador	Isolador bastão	Isolador pino	Cobertura cabos
Inicial	499	483	529	503
W.O.	494	490	514	N.R.
Estufa	490	496	520	N.R.
Água	497	492	527	N.R.
Campo	502	493	527	503(E) 500(F)

N.R. = Não Realizado

Análise térmica por DSC

As tabelas IV a VI mostram um sumário dos resultados de

T_m (temperatura de fusão), OIT (tempo de oxidação induzida) e OOT (temperatura de início de oxidação), respectivamente, obtidos das curvas DSC, após os diferentes tipos de envelhecimentos.

Tabela IV: Temperatura de fusão (T_m) por DSC

Temperatura de fusão (°C)				
Envelhecimento	Espaçador	Isolador bastão	Isolador pino	Cobertura cabos
Inicial	142	146	N.A.	130
W.O.	150	142	N.A.	N.R.
Estufa	139	138	N.A.	N.R.
Água	137	142	N.A.	N.R.
Campo	138	146	N.A.	136(E) 125(F)

N.R. = Não Realizado

N.A. = Não Aplicável

Quando comparamos os valores de T_m dos materiais envelhecidos em laboratório e em campo, verificamos que não há uma diferença significativa entre eles, tanto no caso dos isoladores como no caso das coberturas de cabos, mostrando que a temperatura de fusão também não é uma propriedade adequada para a avaliação da degradação ou para ser utilizada como requisito de desempenho para os materiais estudados no projeto.

Tabela V: Tempo de oxidação induzida (OIT) por DSC

OIT a 200°C (minutos)				
Envelhecimento	Espaçador	Isolador bastão	Isolador pino	Cobertura cabos
Inicial	1,6	> 120	> 120	> 120
W.O.	1,0	32	> 120	N.R.
Estufa	1,6	> 120	> 120	N.R.
Água	0,9	> 120	> 120	N.R.
Campo	0,9	0,9	> 120	> 120 (E) 98(F)

N.R. = Não Realizado

Através da análise dos resultados mostrados na tabela V, verifica-se que o OIT é uma medida bastante interessante para ser utilizada como requisito de desempenho para os produtos poliméricos da rede protegida da CELESC, principalmente para os isoladores à base de PEAD.

No caso dos espaçadores, os valores de OIT, de uma maneira geral, foram muito baixos (próximos de zero), indicando a baixa presença de aditivos anti-oxidantes na formulação desses produtos, tanto para o fabricante A como para o fabricante B.

Por outro lado, para os isoladores tipo pino, foi possível diferenciar claramente amostras com baixos valores de OIT (retiradas de campo do fabricante B) das amostras com OIT superior a 120 minutos (fabricante C, exceto após envelhecimento em estufa). Desta maneira, é possível se estabelecer um requisito de desempenho com base nessa propriedade, por exemplo: o OIT dos produtos à base de PEAD deve ser no mínimo de 120 minutos.

No caso do isolador tipo bastão, os OIT's apresentaram valores acima de 120 minutos para todas as amostras analisadas neste projeto, provavelmente por se tratarem de produ-

tos à base de silicone e tal propriedade não ser sensível à degradação para esse material.

Com relação à cobertura dos cabos, fabricadas com polietileno reticulado (XLPE), não foi possível estabelecer qualquer relação entre o OIT e os níveis de degradação do material, pois os valores de OIT obtidos foram maiores que 120 minutos para as ambas as amostras (envelhecidas e não envelhecidas) de um mesmo fabricante (fabricante E).

Tabela VI: Temperatura de início de oxidação (OOT) por DSC

Temperatura de decomposição térmica (°C)				
Envelhecimento	Espaçador	Isolador bastão	Isolador pino	Cobertura cabos
Inicial	217	270	> 300	259
W.O.	209	234	> 300	N.R.
Estufa	216	267	> 300	N.R.
Água	210	269	> 300	N.R.
Campo	219	220	> 300	260(E) 240(F)

N.R. = Não Realizado

Com base nos resultados apresentados na tabela VI, é possível fazer as seguintes considerações sobre a medida do OOT (temperatura de início de oxidação):

- No caso dos isoladores pino, também foram observados baixos valores de OOT para as amostras do fabricante B (220 °C) em relação às demais do fabricante C, confirmando a análise dos resultados de OIT para este produto.

- No caso dos espaçadores, os resultados de OOT também confirmaram as análises de OIT, ou seja, todas as amostras, independente do fabricante, apresentaram baixos valores (baixa estabilidade térmica).

- Quanto às coberturas de cabos (XLPE), da mesma forma que para o OIT, não foi possível validar o uso do OOT como uma técnica para avaliação da degradação deste tipo de material, pois os valores de OOT obtidos foram praticamente os mesmos para ambas as amostras (envelhecidas e não envelhecidas) de um mesmo fabricante (fabricante E).

Medida de densidade

Os resultados de densidade são mostrados na tabela VII, a seguir.

Tabela VII: Resultados de densidade por picnometria

Densidade (g/cm ³)				
Envelhecimento	Espaçador	Isolador bastão	Isolador pino	Cobertura cabos
Inicial	0,964	0,980	1,546	0,910
W.O.	0,972	0,991	1,551	N.R.
Estufa	0,957	0,987	1,593	N.R.
Água	0,958	0,975	1,516	N.R.
Campo	0,947	0,951	1,488	0,958(E) 0,927(F)

N.R. = Não Realizado

O resultado mais relevante obtido com as medidas de densidade está relacionado com os isoladores bastão de silicone. Observou-se uma boa correlação desta propriedade com a

degradação do material. De uma maneira geral, as amostras mais degradadas apresentaram uma menor densidade, devido, provavelmente, à quebra das ligações cruzadas, mostrando que tal propriedade pode ser utilizada como um potencial requisito de desempenho para produtos à base de silicone em especificações e normas de aceitação.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As figuras 6 a 8 mostram as fotomicrografias obtidas no MEV para os isoladores e espaçadores, comparando os efeitos superficiais dos diferentes tipos de envelhecimento (não envelhecidos e envelhecidos em água, em estufa e em weather-ometer).

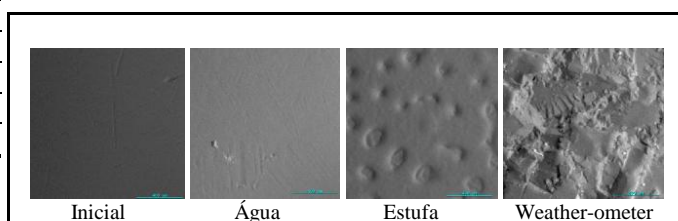


Figura 6: Fotomicrografias das superfícies dos espaçadores

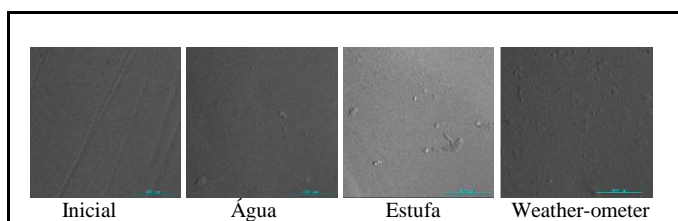


Figura 7 – Fotomicrografias da superfície dos isoladores bastão

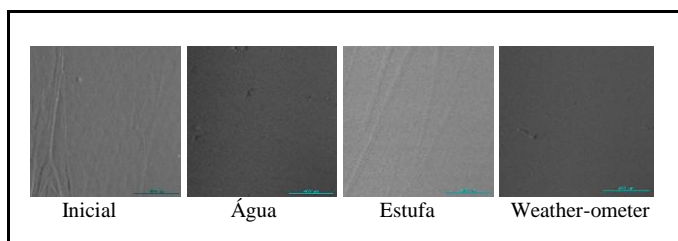


Figura 8 – Fotomicrografias da superfície dos isoladores tipo pino

A análise das imagens obtidas no MEV mostra que a superfície dos espaçadores, envelhecidos em estufa e em weather-ometer, apresentaram maior grau de degradação superficial que as amostras de espaçadores envelhecidas em água.

O envelhecimento em estufa provocou o surgimento de bolhas superficiais e em weather-ometer o aumento da rugosidade.

Os isoladores tipo bastão e tipo pino não mostraram diferença significativa em suas superfícies após os envelhecimentos acelerados.

III. CONCLUSÕES

A. Requisitos de desempenho

O principal objetivo proposto no início do projeto foi a internalização dos resultados do estado da arte e da técnica à

concessionária, com propostas de melhorias nas especificações de produtos e de compra, através da proposição de requisitos de desempenho específicos para a aplicação na concessionária, através da comparação entre as degradações naturais em campo e aceleradas em laboratórios.

A recepção de produtos poliméricos, através de ensaios desenvolvidos aplicáveis e das especificações de compra adequadamente estudadas para a aplicação específica destes produtos, são bases fundamentais de apoio à normalização e à operação para manutenção da integridade da rede de distribuição.

Há vários anos, as concessionárias têm solicitado trabalhos em componentes de rede compacta, devido aos muitos problemas registrados com isoladores poliméricos de ancoragem e, principalmente, com isoladores do tipo pino. Daí a necessidade de estudo de causas de degradações de isoladores, com propostas de soluções alternativas e de levantamento de requisitos para a otimização de desempenho dos produtos, que foi um dos motivadores da proposição deste projeto.

Os produtos poliméricos, como os isoladores e os espaçadores, são de aplicação relativamente recente no setor elétrico e é importante serem monitorados quanto a possíveis falhas, pois suas funcionalidades são imprescindíveis no isolamento, proteção e coordenação de isolamento das redes de energia elétrica. É de conhecimento que as propriedades desejáveis para estes produtos poliméricos não são bem conhecidas e não foram ainda bem estudadas, sob o ponto de vista de adequação aos micro-climas brasileiros ou mesmo em nível mundial. Assim, nota-se que até mesmo as especificações técnicas de órgãos normativos internacionais, como o CIGRÉ, ainda não têm definidas as características desejáveis para estes produtos poliméricos e o mesmo ocorre com a ABNT [5]-[9].

Como fruto deste projeto, com base nos resultados dos ensaios realizados nos produtos poliméricos envelhecidos em laboratório e retirados de campo, é possível propor alguns requisitos de desempenho específicos para cada tipo de produto estudado. A seguir são listadas algumas sugestões de requisitos de desempenho que poderão ser utilizados na elaboração de especificações de produtos da própria concessionária ou de outros órgãos normativos, por exemplo, a ABNT.

1) Requisitos gerais

De uma maneira geral, todos os materiais poliméricos utilizados na rede externa de distribuição devem conter, em sua formulação, aditivos para proteção contra a degradação térmica e fotooxidativa, de modo a garantir um desempenho adequado ao produto durante o seu tempo de vida útil. Como a determinação e quantificação dos teores desses aditivos presentes na matriz polimérica é uma tarefa difícil, pois exige equipamentos muito sofisticados e um conhecimento prévio do tipo de aditivo que se deseja analisar, normalmente são utilizados ensaios que medem indiretamente a presença de tais aditivos.

Propriedades mecânicas

A degradação dos polímeros, tanto térmica como fotooxi-

dativa, provoca a queda das suas propriedades mecânicas, tais como, resistência à tração e alongamento na ruptura. Portanto, a medida da variação dessas propriedades, antes e após envelhecimentos acelerados em laboratório, é muito utilizada como uma maneira indireta de avaliação da presença de estabilizantes na matriz polimérica e, portanto, do desempenho do produto. Por exemplo, algumas concessionárias de energia e a própria ABNT já adotam em suas especificações requisitos similares a estes:

- A variação da resistência à tração e do alongamento à ruptura deve ser menor do que $\pm 25\%$, após envelhecimento em estufa por 168 horas a uma temperatura que depende do material a ser avaliado (110°C para polietileno e 135°C para silicone e EPR, por exemplo);

- A variação da resistência à tração e do alongamento à ruptura deve ser menor do que $\pm 25\%$, após envelhecimento em câmara de UV por 2000 horas.

Esses requisitos de desempenho são normalmente classificados como ensaios de “tipo” ou de qualificação de produto, pois são ensaios demorados e que exigem a preparação de corpos-de-prova específicos e padronizados, portanto, geralmente não são aceitáveis como ensaios de recebimento ou de rotina.

Espectroscopia no infravermelho (FTIR)

O efeito da degradação de polímeros pode levar à formação de grupos funcionais específicos na superfície dos produtos, principalmente a carbonila, resultado da oxidação das cadeias poliméricas. Através da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é possível identificar a presença de tais produtos de degradação, que devem ser ausentes em produtos não degradados. Em outras palavras, absorções significativas de carbonilas devem estar ausentes, no espectrograma infravermelho, na região de 1600 a 1750 cm^{-1} , das amostras novas.

Análise termogravimétrica (TGA)

Através da análise termogravimétrica (TGA), consegue-se avaliar a estabilidade térmica dos polímeros, através da medida da temperatura de início de decomposição, com aquecimento controlado em atmosfera de nitrogênio e taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$. Dependendo do material, pode-se estabelecer uma temperatura mínima de decomposição para garantir uma adequada estabilidade térmica ao produto. Porém, com base nos resultados alcançados nesse projeto, não foi possível definir tais temperaturas para os produtos alvo de estudo.

2) Requisitos específicos

Além dos requisitos gerais descritos anteriormente, com base nos resultados do projeto, é possível sugerir alguns requisitos de desempenho específicos para cada tipo de material estudado.

Espaçadores e isoladores tipo pino, fabricados em PEAD

A técnica termoanalítica de calorimetria exploratória diferencial (DSC) é muito utilizada para acompanhamento da degradação térmica dos polímeros, através de várias propriedades por ela determináveis como: temperaturas de fusão

cristalina (T_m), entalpias de fusão cristalina (ΔH), temperatura de transição vítrea (T_g), e temperaturas de início de decomposição (T_{id}) ou temperaturas de início de oxidação (OOT); também, sob a forma de DSC isotérmico, pode ser determinado o tempo de oxidação induzida (OIT).

No caso dos espaçadores e isoladores tipo pino, ambos fabricados em PEAD, tais propriedades térmicas se mostraram muito interessantes para serem utilizadas como requisitos de desempenho para recebimento e aceitação, principalmente o OOT e o OIT.

Para os isoladores tipo pino foram obtidos valores bastante elevados de OIT, mesmo para amostras envelhecidas, o que permite se estabelecer um requisito de desempenho com base nessa propriedade, por exemplo: o OIT dos produtos à base de PEAD deve ser no mínimo de 120 minutos.

Este raciocínio pode ser estendido para o caso do OOT e, por exemplo, se estabelecer um requisito da seguinte forma: o OOT dos produtos à base de PEAD deve ser no mínimo de 270°C.

Isoladores tipo bastão, fabricados em silicone

Para os isoladores tipo bastão, de silicone, com base nos resultados do projeto, verificou-se que a propriedade que se mostrou mais promissora para ser adotada como requisito de desempenho foi a densidade. As amostras mais degradadas apresentaram uma menor densidade, devido, provavelmente, à quebra das ligações cruzadas. Desta forma, pode-se sugerir um valor mínimo de densidade para as amostras novas, por exemplo: a densidade dos produtos à base de silicone deve ser maior ou igual a 1,55 g/cm³.

Cobertura de cabos, fabricados em XLPE

Quanto às coberturas de cabos de polietileno reticulado (XLPE), não foi possível validar o uso de nenhuma das técnicas utilizadas neste projeto como possíveis requisitos de desempenho, devido ao fato de que não foi possível a realização de ensaios de envelhecimento em laboratório e devido ao número limitado de amostras retiradas de campo. De qualquer forma, para as coberturas de cabos, os poucos resultados mostraram que o OOT tem potencial para se tornar um possível requisito de desempenho para produtos à base de XLPE.

B. Propostas para futuros trabalhos

Apesar dos vários resultados alcançados neste projeto, não só no que se refere ao conhecimento do estado atual dos principais produtos poliméricos utilizados na rede protegida de 25 kV da CELESC, mas também com relação aos requisitos de desempenho que foram propostos, ainda assim, alguns resultados podem ser melhorados, o que justifica a proposição e a continuidade dos trabalhos em pontos específicos descritos a seguir.

- Confirmação dos requisitos propostos no projeto através de análises em um número maior de amostras, com uma maior diversidade de fabricantes, principalmente com mais amostras retiradas de campo e comprovadamente com pro-

blemas;

- Estudo mais apurado dos produtos à base de silicone (isolador bastão), tanto para validar o ensaio de densidade como um possível requisito de desempenho, como também para propor outros ensaios que possam ser utilizados em especificações de recebimento e de aceitação pela concessionária;

- Avaliação de mais amostras de coberturas de cabos em XLPE, com ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório e comparação com amostras retiradas de campo de diferentes fornecedores;

- Validação de requisitos já consagrados, tal como a variação das propriedades mecânicas antes e após envelhecimentos em estufa e em câmara de ultravioleta, para diferentes tipos de materiais poliméricos utilizados na rede;

- Estudo de outros tipos de ensaio de acompanhamento da degradação, que não fizeram parte do escopo do projeto, tais como: índice de fluidez (específico para PEAD), medida da cor, rugosidade superficial, dureza, grau de inchamento para materiais reticulados (silicone e XLPE), etc.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASTM G155-05a *Standard Practice for Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials*, 2005.
- [2] ASTM D4565-10 *Standard Test Methods for Physical and Environmental Performance Properties of Insulations and Jackets for Telecommunications Wire and Cable*, 2010.
- [3] ASTM E2009-08 *Standard Test Method for Oxidation Onset Temperature of Hydrocarbons by Differential Scanning Calorimetry*, 2008.
- [4] ASTM D792-08 *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*, 2008.
- [5] O. Arndt, J. M. G. Angelini, E. Coser, C. A. Ferreira, J. A. D. Rossi, M. Martinez, F. Brito, M. V. R. Ferraz, "Studies on silicone and PEAD insulators and on polymeric silicone zinc oxide lightning surge arrester", *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Ljubljana, Slovenia, 27 - 31 august 2007.
- [6] C. A. Ferreira, E. Coser, J. M. G. Angelini, J. A. D. Rossi, "Avaliação de isoladores e pára-raios poliméricos de linhas de distribuição elétricas"; *9º Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPOL)*, Campina Grande, Paraíba, outubro de 2007.
- [7] C. A. Ferreira, J. M. G. Angelini, J. A. D. Rossi, O. Arndt, "Laboratory studies of degradation polymeric surge arresters and insulators: Products Performance Requirements", *IX International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, Foz do Iguaçu, PR, novembro de 2007; Grupo de Estudos de Isoladores do Cigré, RJ, dezembro de 2007.
- [8] N. Geber, J. A. D. Rossi, J. M. G. Angelini, "Otimização de desempenho de redes compactas de distribuição primária e secundária da Manaus Energia", *XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)*, Belo Horizonte, 2006.
- [9] F. Noronha, J. M. G. Angelini, N. C. Góis, L. H. I. Mei, "Performance development requirements for elastomers of electric power network insulators", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 162-163, may 2005.