



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

Edemir Luiz Kowalski	Camila Mariana de Oliveira Wolski	Marilda Munaro
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
edemir@lactec.org.br	camila.wolski@lactec.org.br	marilda@lactec.org.br

Rafael Pires Machado	Anselmo Pombeiro
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Copel Distribuição S.A.
rafael.machado@lactec.org.br	ansel@copel.com

Estudo dos efeitos da degradação sobre as propriedades mecânicas e elétricas em materiais poliméricos de ferramentas usadas na manutenção com redes energizadas

Palavras-chave

borracha natural
degradação
equipamentos de proteção individual/coletiva
polietileno
propriedades elétricas
propriedades mecânicas

Resumo

As ferramentas para trabalho em linha viva são confeccionadas com materiais isolantes. Na aplicação destas ferramentas, além do isolamento elétrico são necessárias certas propriedades mecânicas. Atualmente as avaliações destes equipamentos são realizadas por meio de ensaios elétricos que analisam somente o isolamento do material e observa-se que muitos materiais são aprovados em nestes ensaios, porém, possuem suas propriedades mecânicas comprometidas. Este trabalho apresenta um estudo realizado sobre amostras de polietileno e de borracha natural retiradas de equipamentos de linha viva comerciais, submetidos a envelhecimento acelerado, dos quais foram avaliadas as propriedades mecânicas e elétricas. O resultado obtido mostra que os materiais estudados apresentam um comprometimento mecânico antes do

comprometimento das propriedades elétricas, justificando a necessidade de pesquisa no sentido de se desenvolver metodologias e técnicas para a realização de ensaios mecânicos não destrutivos nos equipamentos de linha viva.

1. Introdução

As concessionárias de energia elétrica aplicam cada vez mais a manutenção das redes de distribuição e transmissão com a técnica de linha viva, ou seja, a manutenção com a rede energizada. O principal benefício dessa forma de trabalho é não haver necessidade de interrupção do fornecimento de energia elétrica durante a manutenção, aliada à redução de custos administrativos das interrupções programadas e melhoria da imagem da concessionária junto a seus clientes.

Os profissionais responsáveis por essas atividades devem utilizar equipamentos de proteção individual e coletiva tais como luvas, mangas, bastões isolantes entre outros, para impedir a circulação de corrente elétrica, que possa causar qualquer dano físico ao usuário [1,2]. Este ferramental é projetado para garantir o isolamento elétrico, sendo confeccionado em material polimérico isolante, onde os mais usados são a borracha natural (mantas, luvas e mangas), polietileno (coberturas circular, de isolador e condutor) e resina epóxi com fibra de vidro (vara de manobra).

Em função da característica de isolamento elétrico ser fundamental a estas ferramentas existe padronização de ensaios elétricos que são realizados periodicamente, cujo objetivo é verificar se as características dielétricas estão adequadas a utilização.

No entanto, esses equipamentos possuem várias propriedades físico-químicas, onde a propriedade elétrica é apenas uma delas. Uma ferramenta, dentro de uma visão de segurança, deve estar apta a ser aplicada para a realização da atividade, cumprindo sua funcionalidade de forma integral.

Esses equipamentos ficam submetidos a solicitação mecânica, elétrica e ambiental, que com o tempo de utilização provocará a degradação dos materiais poliméricos modificando suas propriedades [3-7].

Estudos recentes [2] mostraram que a borracha natural, devido aos processos de degradação, apresenta alterações significativas nas propriedades mecânicas, enquanto que as características elétricas se mantinham próximas ao do material não degradado. Por este motivo, torna-se fundamental a caracterização dos materiais poliméricos utilizados na confecção destas ferramentas e o conhecimento das mudanças causadas pela degradação, evitando assim, que equipamentos inadequados sejam disponibilizados ao serviço colocando em risco a atividade e a segurança dos eletricitistas.

Neste trabalho serão apresentados resultados de ensaios mecânicos, elétricos obtidos antes e após envelhecimento acelerado para os materiais poliméricos aplicados na confecção de ferramentas utilizadas na manutenção de redes energizadas.

2. Desenvolvimento

2.1. Materiais e métodos

2.1.1. Materiais

Foram analisados dois equipamentos comerciais de borracha natural: manta isolante (BM) e lençol isolante (BL); e duas coberturas em polietileno: circular (CI) a usada na proteção do cabo condutor (CA). Na Tabela 1 e Tabela 2 são apresentadas a composição básica das amostras utilizadas.

Tabela 1 – Composição das amostras de borracha natural.

Amostra	Teor de material polimérico e plastificantes (%)	Teor de negro de carbono (%)	Teor de cargas inorgânicas (%)
BL	63,8	-	36,2
BM	52,1	23,5	24,5

Tabela 2 – Composição das amostras de polietileno.

Amostra	Teor de material polimérico (%)	Teor de cargas inorgânicas (%)
CI	98	2
CA	98	2

Os corpos de prova foram obtidos diretamente dos equipamentos, no caso dos materiais confeccionados em borracha e para as coberturas em polietileno foram obtidos a partir de placas termo-prensadas a temperatura de 150°C.

2.1.2. Envelhecimento térmico

Para degradação térmica das amostras foi utilizada estufa com circulação de ar da marca Fanem modelo 320 SE. As análises se basearam em 3 temperaturas diferentes (70°, 90° e 110°), tanto para borracha natural quanto para o polietileno. Os tempos de exposição foram de 7 até 60 dias dependendo do tipo do ensaio.

2.1.3. Envelhecimento por UV em Weather Ometer

As amostras foram envelhecidas em equipamento da marca ATLAS modelo Ci4000, com os métodos descritos na norma ASTM G26/94. Este equipamento trabalha com uma lâmpada de xenônio com 6500 W de potência, irradiância de 0,35W/m² (a 340nm), imitando a luz solar da Flórida às 12:00h. Possui ciclos de 102 minutos de luz incidindo a 90° com temperatura de 63°C e umidade relativa de 60%, e 18 minutos de luz e spray de água deionizada com temperatura de 50°C e umidade de 80%. As amostras foram envelhecidas por um período de 500h e 1000h.

2.1.4. Medida de corrente de fuga alternada

Neste ensaio foram aplicadas tensões de 1kV em 1 kV com frequência de 60 Hz, por meio de Ponte marca Tettex que aplica tensões até 12 kV. No ensaio a amostra é colocada entre eletrodos de aço inox com alívio de campo elétrico, e eletrodo de guarda. A corrente e tensão elétrica são medidas diretamente no equipamento.

2.1.5. Medida de corrente de fuga contínua

Neste ensaio foram aplicadas tensões até 12 kV em forma de degrau de 1kV em 1 kV com a respectiva medida da corrente elétrica após 120 s do degrau de tensão aplicada. No ensaio a amostra é colocada entre eletrodos de aço inox com alívio de campo elétrico, e eletrodo de guarda. A tensão é aplicada por uma fonte de DC Marca Matsusada Precision de 0 – 50 kV e a corrente elétrica é medida por meio de multímetro marca Tektronix modelo TX1 True RMS Multimeter. A tensão aplicada é medida na própria

fonte.

2.1.6. Tração a ruptura

O ensaio de tração foi realizado conforme norma ASTM D 638, onde os corpos de prova foram submetidos à tração até a ruptura na velocidade de 50 mm por minuto, em equipamento INSTRON modelo 4467 com célula de carga 100 kg e L_0 de 25 mm.

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos para o ensaio de tração para as amostras BM e BL são apresentados na Figura 1a. Nota-se que a amostra BL apresenta redução no alongamento com tempo de exposição ao WOM, enquanto que a amostra BM não apresenta alterações significativas, o que indica que a amostra BM apresenta maior estabilidade a fotodegradação. Na Figura 1b estão apresentados os resultados do ensaio de tração para as CI e CA. A amostra CA não apresentou variação significativa com a exposição ao UV, já a amostras CI tiveram redução em seu alongamento em função do tempo de exposição ao WOM.

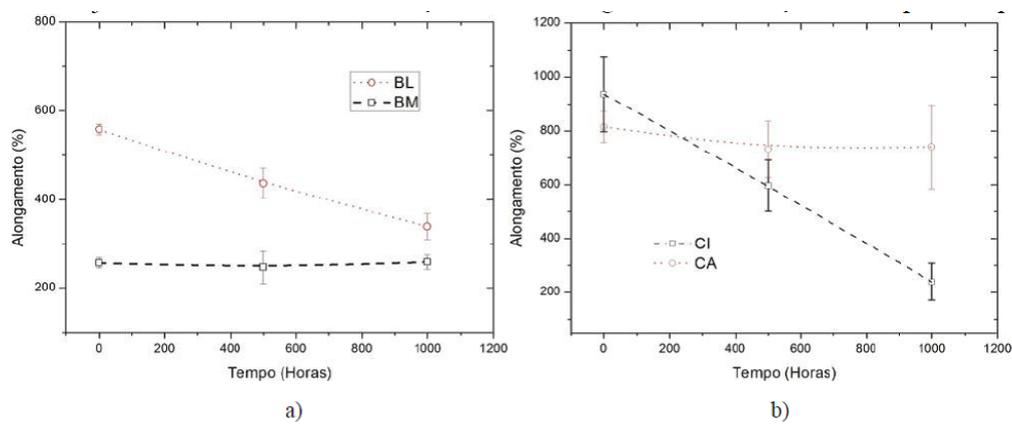


Figura 1 – a) Variação do alongamento à ruptura em função do tempo de envelhecimento por WOM para amostra BL e BM. b) Alongamento à ruptura em função do tempo de envelhecimento por WOM das amostras CI e CA.

As diferenças observadas entre as formulações dos equipamentos, provavelmente, devem-se a quantidade e qualidade do aditivo utilizado.

3.1. Análise BL

Na amostra BL foi constatado redução no alongamento com o aumento do tempo de exposição e também com o aumento da temperatura. Os resultados da Figura 2a mostram maior redução no alongamento para as amostras envelhecidas a 100°C, onde após 25 dias passa a apresentar fratura frágil. Na temperatura de 90°C ocorre aumento na propriedade de alongamento até 7 dias de ensaio e depois ocorre redução. Nos materiais envelhecidos a 70°C há redução inicial que se estabiliza depois de 15 dias. Análise semelhante pode ser feita na Figura 2b, onde se observa redução do valor da tensão de ruptura em função do tempo de exposição.

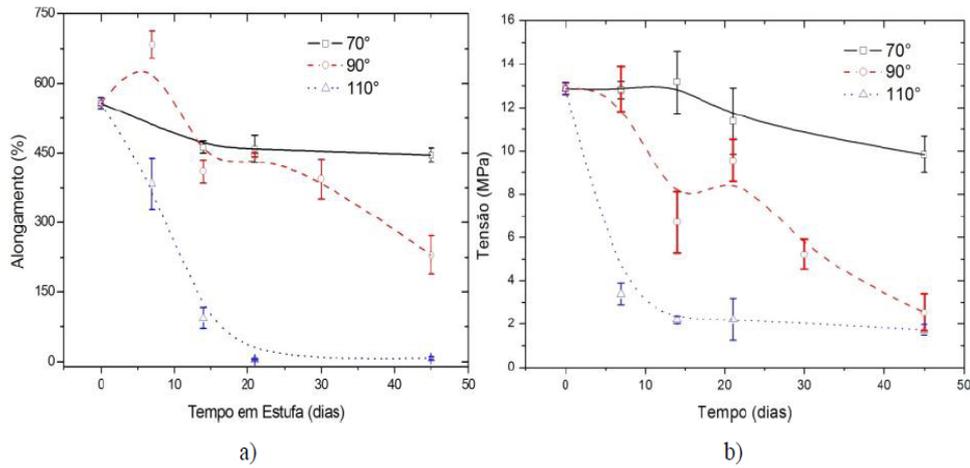


Figura 2 – a) Alongamento à ruptura em função do tempo de envelhecimento em estufa da amostra BL. b) Tensão de ruptura em função do tempo de envelhecimento em estufa da amostra BL.

3.2. Análise BM

Nos resultados da amostra BM, apresentados na Figura 3a, percebe-se comportamento mais estável em relação à amostra BL. Na temperatura de 70°C o alongamento tem redução, mas volta aos valores originais após 45 dias de ensaio. Para as outras temperaturas há redução nos valores de alongamento com o tempo de envelhecimento, porém, menos acentuada como na amostra BL. O valor mais baixo de alongamento obtido ocorreu para a temperatura de 110°C com 45 dias de envelhecimento, com redução 30% comparando com o material sem envelhecimento. Nos resultados da tensão de ruptura da amostra BM, apresentados na Figura 3b, é observado apenas pequena variação nas amostras envelhecidas a 110°C. Esses resultados mostram maior estabilidade das amostras BM em relação a amostra BL.

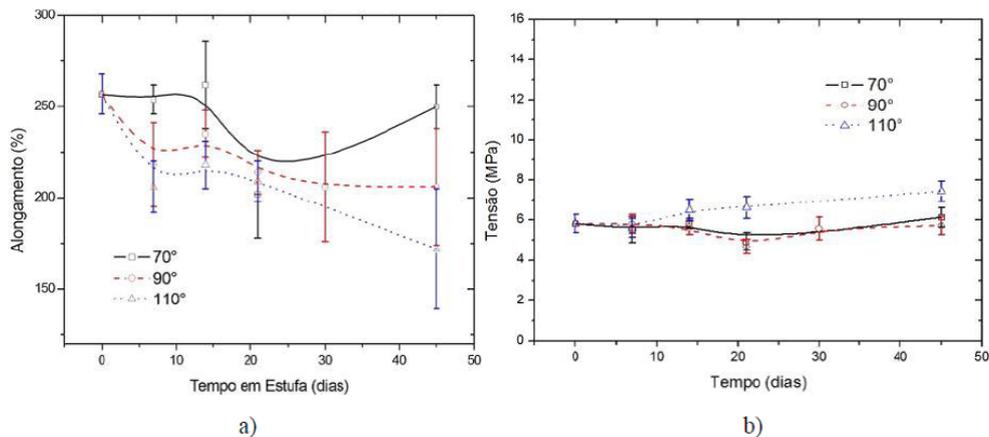


Figura 3 – a) Alongamento à ruptura em função do tempo de envelhecimento em estufa da amostra BM. b) Tensão de ruptura em função do tempo de envelhecimento em estufa da amostra BM.

3.3. Análise CA

Nos resultados da amostra CA, apresentados na Figura 4a, só foi observada redução significativa no alongamento com o tempo de envelhecimento na temperatura de 110°C, onde em 45 dias houve redução de 63%. Na Figura 4b são apresentados os resultados da tensão de ruptura em função do tempo de envelhecimento. Nesse caso as três temperaturas apresentaram redução de aproximadamente 20%, independente da temperatura adotada, para 45 de envelhecimento.

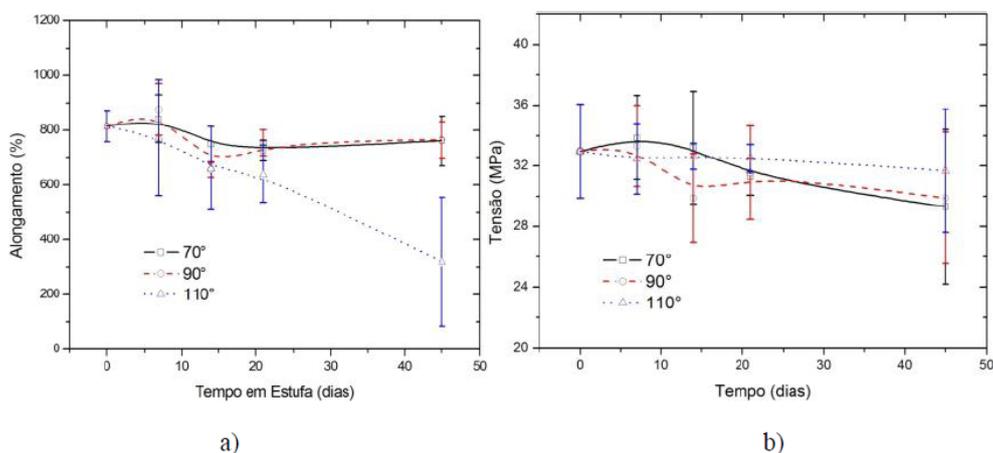


Figura 4 – a) Alongamento à ruptura em função do tempo de envelhecimento em estufa da amostra CA. b) Tensão de ruptura em função do tempo de envelhecimento em estufa para a amostra CA.

D.Análise CI:

Os resultados de alongamento a ruptura estão apresentados na Figura 5a, observa-se redução no valor de alongamento com o tempo de envelhecimento em todas as temperaturas, diferente do observado na amostra CA, indicando menor proteção a termo oxidação que a amostra CI. Nos resultados de tensão de ruptura, apresentados na Figura 5b, não há uma variação significativa nos valores.

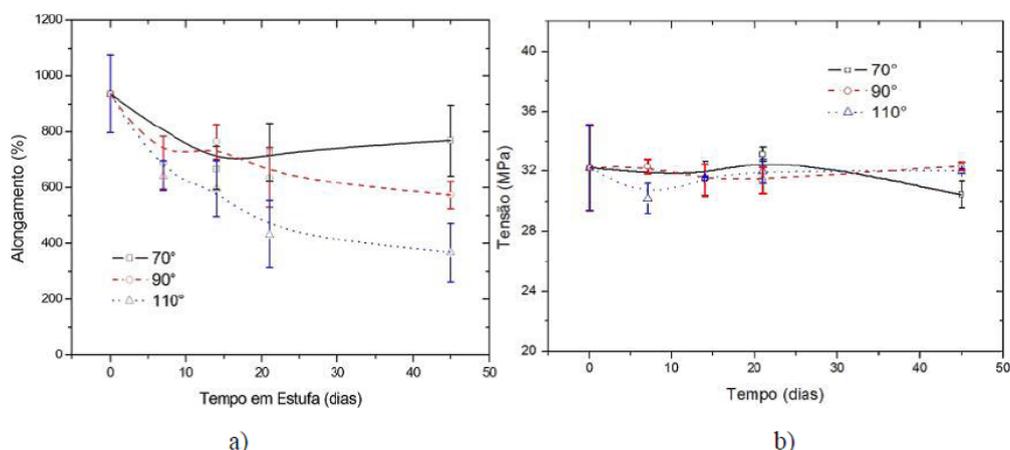
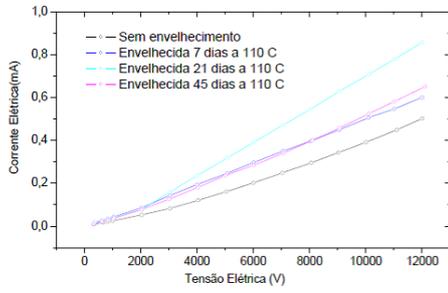


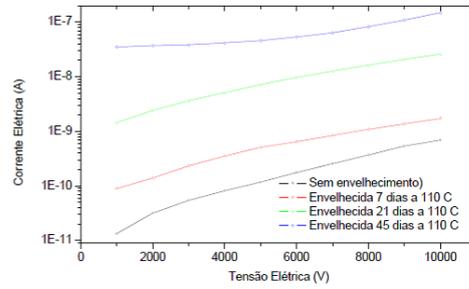
Figura 5 – a) Alongamento em função do tempo de envelhecimento em estufa da amostra CI. b) Tensão de ruptura em função do tempo de envelhecimento da amostra CI.

3.4. Ensaios elétricos

Nos gráficos da Figura 6 à Figura 13 são apresentados os resultados obtidos para os experimentos de tensão CA e CC aplicada sobre as amostras e respectiva medida de corrente elétrica. São apresentados somente os resultados obtidos das amostras envelhecidas a 110°C e em WOM, em função destes, nos ensaios mecânicos terem apresentado as maiores alterações nas propriedades mecânicas. O principal objetivo da apresentação destes resultados é permitir comparação entre as propriedades elétricas e mecânicas das amostras estudadas.

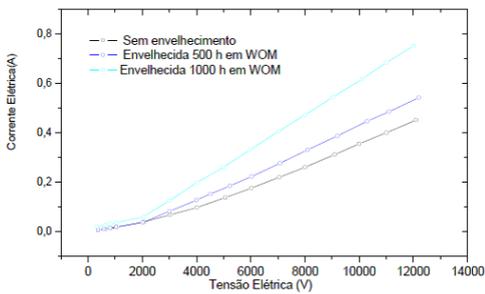


a)

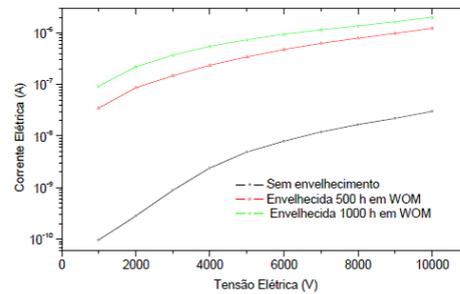


b)

Figura 6 - Variação da corrente elétrica em função da tensão para amostra CI envelhecida a 110 C. a) CA; b) CC.

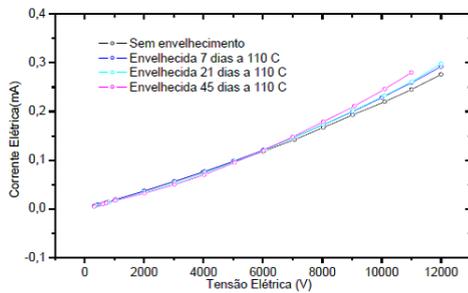


a)

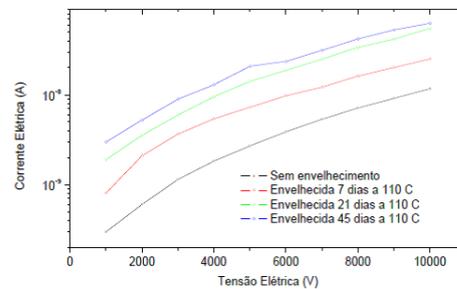


b)

Figura 7 -Variação da corrente elétrica em função da tensão para amostra CI envelhecida em WOM: a) CA; b) CC.

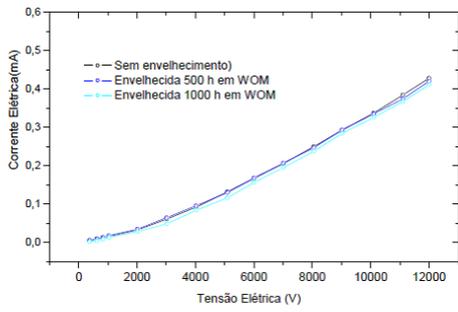


a)

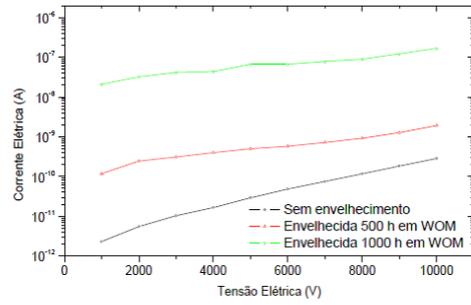


b)

Figura 8 - Variação da corrente elétrica em função da tensão para amostra BL envelhecida a 110 °C; a) CA; b) CC.

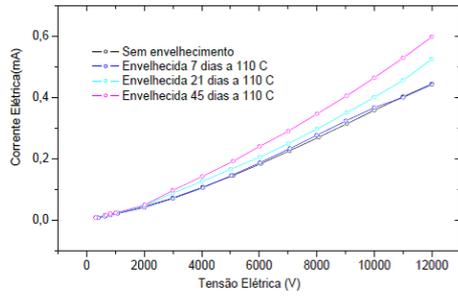


a)

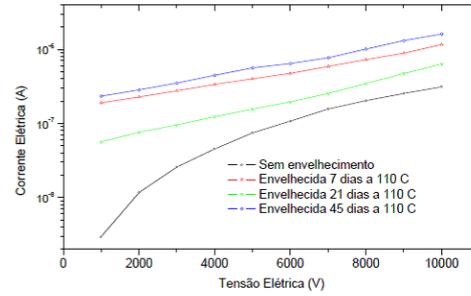


b)

Figura 9 -Variação da corrente elétrica em função da tensão para amostra BL envelhecida em WOM; a) CA; b) CC.

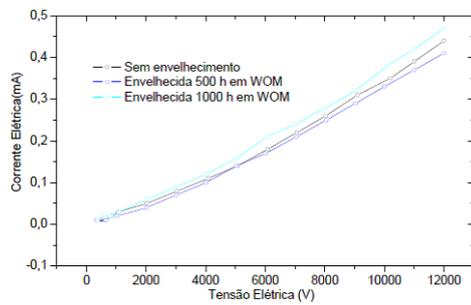


a)

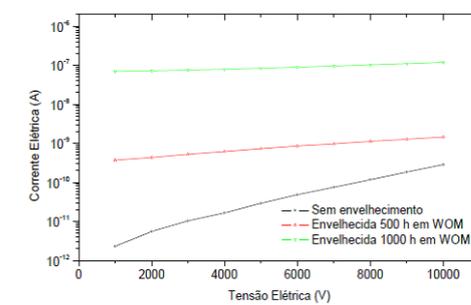


b)

Figura 10 - Variação da corrente elétrica em função da tensão para amostra CA envelhecida a 110°C; a) CA; b) CC.



a)



b)

Figura 11- Variação da corrente elétrica em função da tensão para amostra CA envelhecida em WOM; a) CA, b) CC.

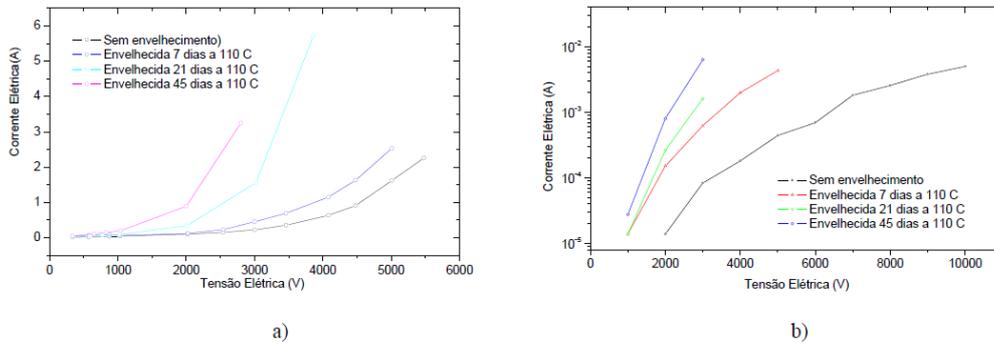


Figura 12 - Variação da corrente elétrica em função da tensão para amostra BM envelhecida a 110°C; a) CA; b) CC.

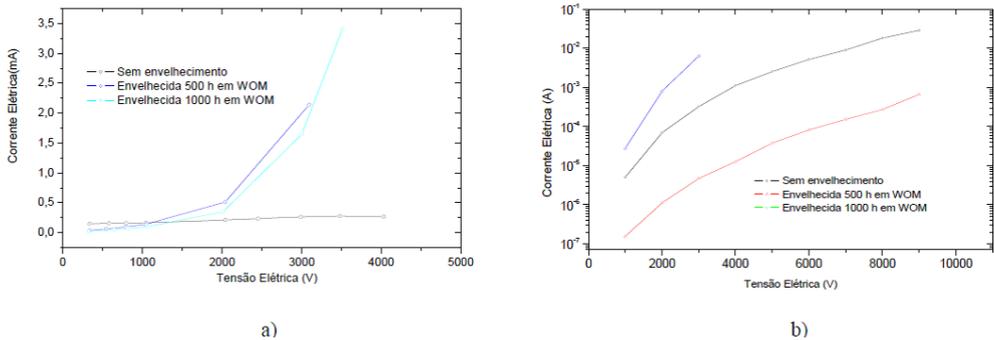


Figura 13 - Variação da corrente elétrica em função da tensão para amostra BM envelhecida em WOM; a) CA; b) CC.

Os resultados obtidos mostram que em todas as situações, mesmo com envelhecimento térmico e tempos longos de envelhecimento em câmara de intemperismo artificial, a corrente elétrica de fuga DC e AC se apresentaram baixas, comparadas a aquelas estabelecidas pelas normas técnicas para ensaio em ferramentas de linha viva. Somente a amostra de manta isolante, apresentou resultados de corrente elétrica de fuga acima do aceitável (18 mA). No ensaio das mantas isolantes, não foi possível atingir as tensões nominais de ensaio, atingidas nas demais amostras estudadas.

3.5. Resultados comparativos entre as propriedades elétricas e mecânicas

Foi realizado um estudo comparativo entre as propriedades elétricas, corrente elétrica CA e CC, e propriedades mecânicas de alongamento. As correntes elétricas de fuga CA e CC são colocadas em forma gráfica, em função da propriedade mecânica alongamento a qual retrata os processos de envelhecimento e degradação do material sendo associado aos processos de relaxação molecular do mesmo refletindo diretamente sobre as propriedades macroscópicas. Para esta comparação, utilizou-se a perda de alongamento do material no ensaio de tração em 30%, valor este retratado na bibliografia para materiais [1].

Os resultados podem ser vistos nos gráficos das Figuras 14 e 15 os quais são divididos em quatro regiões:

- a primeira região retrata o material que possui um alongamento menor ou igual a 30% e corrente elétrica de fuga inferior ou igual a 18 mA, sendo bons mecanicamente e eletricamente;
- a segunda região retrata materiais que apresentam um alongamento menor ou igual a 30% e corrente elétrica de fuga superior a 18 mA, sendo bons mecanicamente e ruins eletricamente;
- a terceira região é aquela onde o material apresenta um alongamento superior a 30% e corrente elétrica de fuga inferior ou igual a 18 mA, sendo classificados como ruins mecanicamente e bons eletricamente; e
- a quarta região é a que o material apresenta alongamento superior a 30% e corrente elétrica de fuga

superior a 18 mA, sendo classificado como ruim mecanicamente e eletricamente.

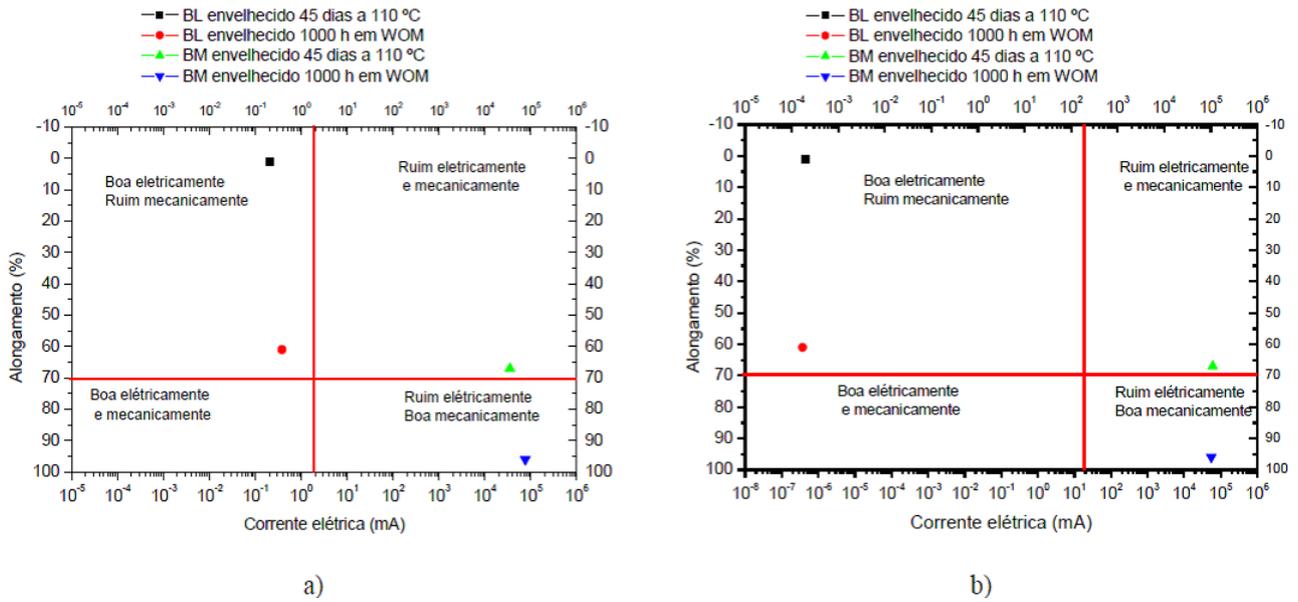


Figura 14 - a) Resultado comparativo entre corrente elétrica de fuga AC e alongamento % no ensaio de tração para as amostras de borracha natural envelhecidas termicamente a 110 °C por 45 dias e em WOM por 1000 h. b) Resultado comparativo entre corrente elétrica de fuga DC e alongamento % no ensaio de tração para as amostras de borracha natural envelhecidas termicamente a 110 °C por 45 dias e em WOM por 1000 h.

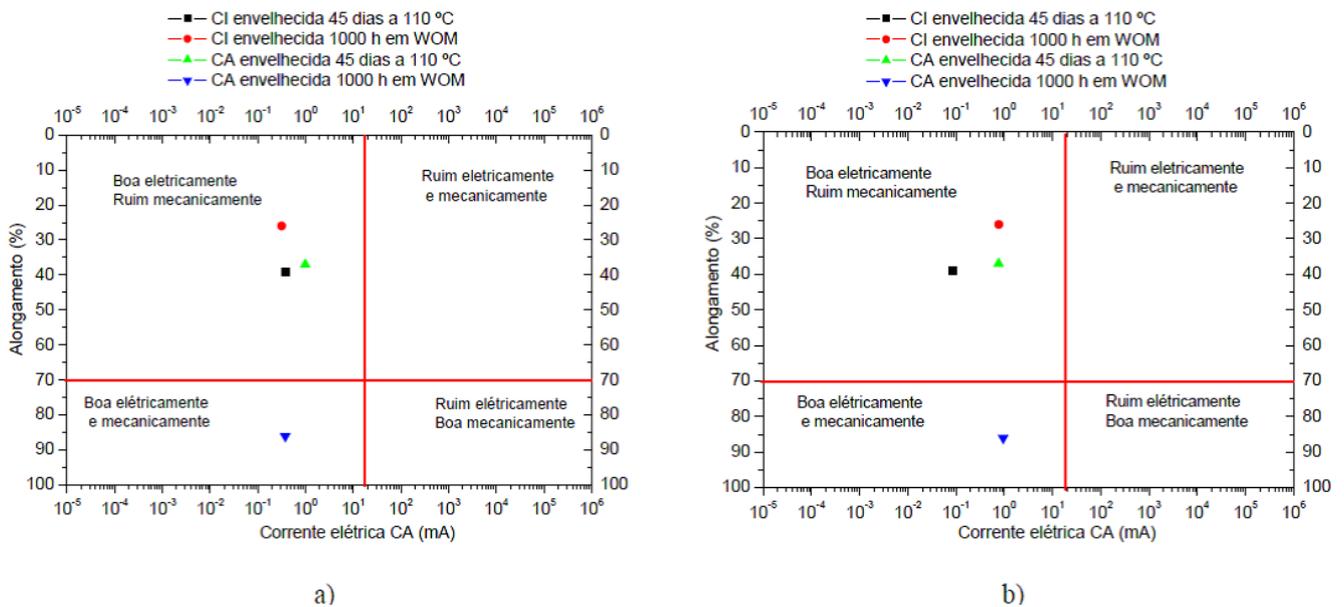


Figura 15 - a) Resultado comparativo entre corrente elétrica de fuga AC e alongamento % no ensaio de tração para as amostras de polietileno envelhecidas termicamente a 110 °C por 45 dias e em WOM por 1000 h. b) Resultado comparativo entre corrente elétrica de fuga DC e alongamento % no ensaio de tração para as amostras de polietileno envelhecidas termicamente a 110 °C por 45 dias e em WOM por 1000 h.

Os resultados obtidos mostram que para os materiais estudados, que em termos de propriedades elétricas se encontram dentro dos níveis considerados aceitáveis, porém, as propriedades mecânicas já estão comprometidas. Deve-se ressaltar que a exceção ocorrida com o material retirado da manta isolante, que mesmo sem envelhecimento apresentava altos valores de corrente elétrica de fuga, em função de altas cargas de negro de fumo encontradas no material, motivo este pelo qual, no envelhecimento em WOM em 1000 h, praticamente não sofreu alteração em suas propriedades mecânicas.

3.6. Metodologias Propostas Para Ensaio Mecânicos

Em função dos resultados obtidos neste projeto, foram desenvolvidos equipamentos e metodologias para se realizar ensaios mecânicos não destrutivos em ferramentas de linha viva. A inspeção visual continua a ser fundamental nos processos de avaliação de ferramentas, sendo ainda um importante critério para eliminação de materiais.

Para os materiais confeccionados em elastômeros adotou-se a técnica de medida de dureza *Shore A*. Os valores aplicados estão fundamentados em nas normas técnicas nacionais e estrangeiras e em testes conduzidos em laboratório onde se determinou os valores mínimos e máximos de dureza aceitáveis.

Para coberturas circulares, foi desenvolvido equipamento que mede a deformação máxima aceitável em função dos diâmetros originais dos equipamentos, que retratam de forma macroscópica e mensurável os processos de relaxação moleculares, diretamente associados à degradação e envelhecimento, bem como levam em conta a forma do equipamento e sua funcionalidade em campo. Esta medida é realizada por meio de sensores de força.

Coberturas de condutores são avaliadas da mesma forma que as coberturas circulares, ou seja, por meio de medida macroscópica de deformação, a qual retrata os processos de relaxação das cadeias moleculares, associados à forma e funcionalidade do equipamento. A medida é realizada por meio de sensores de força.

Para avaliar as propriedades mecânicas de varas de manobra, constatou-se que a propriedade de melhor detecta os processos de envelhecimento e degradação é a medida de flecha sobre esforço estático. Desenvolveu-se um equipamento com o qual se avalia a flecha em função do esforço estático a ela aplicado.

Todos estes equipamentos e metodologias desenvolvidos serão aplicados na COPEL, a fim de validá-los. Não são apresentados detalhes dos equipamentos e técnicas em função da realização do pedido de propriedade intelectual e industrial dos mesmos.

3. Conclusões

A formulação de elastômero usada na confecção da amostra BM apresentou menor resistência a foto e termo oxidação quando comparada com a BL. Este fato se repetiu com amostra de polietileno das coberturas, onde a amostra CA apresentou menor variação das propriedades mecânicas que a amostra CI em função do tempo de envelhecimento.

Os resultados comparativos entre ensaios elétricos e mecânicos mostraram que as amostras comprometidas

mecanicamente não apresentaram alterações significativas nos ensaios elétricos, indicando a importância de realização de ensaios na avaliação desses equipamentos ao longo do tempo de uso.

São propostas metodologias para se realizar a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais de forma não destrutiva, auxiliando desta forma um melhor acompanhamento dos materiais empregados em ferramentas de linha viva.

4. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a COPEL, LACTEC, ANEEL e CNPq.

4. Referências bibliográficas

- [1] OLIVEIRA, S. M., Estudo de Interatividade de Cargas de Látex para uso de Material de Linha Viva. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais do CEFET-PR, 2004.
- [2] KOWALSKI, E. L., Estudo da Borracha Natural por meio de Técnicas de Caracterização de Dielétricos, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, 2006.
- [3] RADHAKRISNAN, C. K. et al. In: Polymer Degradation and Stability, 91, 2006, p. 902.
- [4] SATOTO, R. et al. Weathering of high density polyethylene in different latitudes. Polym. Degrad. Stab., v. 56, p. 275-279, 1997
- [5] SAMPERS, J. Importance of weathering factors other than UV radiation and temperature in outdoor exposure. Polym. Degrad. Stab., v. 76, p. 455, 2002.
- [6] PAOLI, M. A. Degradação e estabilização de polímeros. 1º. ed. [S.l.]: Artliber, 2009.
- [7] ABNT NBR - Cabos cobertos com material polimérico para redes aéreas compactas de distribuição em tensões de 13,8 kV e 34,5 kV.
-