



Avaliação do Desempenho em Campo de Cabos Protegidos Submetidos a Envelhecimento Natural em Distintas Regiões do Brasil

Dr. Guilherme C. da Silva
LACTEC
cunha@lactec.org.br
Eng. Milton Ochiuto
CEMAT

MSc. Fernando Piazza
LACTEC
piazza@lactec.org.br

MSc. Marilda Munaro
LACTEC
marilda@lactec.org.br

Luiz Carlos Hartmann
COPEL

RESUMO

O presente trabalho apresenta resultados do desempenho mecânico, elétrico e dielétrico, ao longo do tempo, de cabos protegidos submetidos a envelhecimento natural em distintas regiões do Brasil. Para esta avaliação foram construídas duas redes protegidas piloto, sendo uma localizada no estado do Paraná e outra no estado do Mato Grosso. Tais regiões foram escolhidas por apresentarem solicitações ambientais bastante particulares. O intuito da construção destas redes piloto foi o desenvolvimento de laboratórios em campo, onde os equipamentos da rede protegida ficassem submetidos ao processo de envelhecimento natural sob condições normais de operação. Estes laboratórios permitiram estudar o desempenho de cabos protegidos, de distintos fabricantes, em locais que possuíam solicitações ambientais diferentes. O desempenho dos cabos protegidos foi avaliado através de análises de microscopia eletrônica de varredura e ensaios de resistividade superficial, rigidez dielétrica, resistência ao trilhamento elétrico e resistência à abrasão.

PALAVRAS-CHAVE

Cabos cobertos, envelhecimento, redes protegidas.

1. INTRODUÇÃO

O padrão convencional de rede aérea de distribuição urbana utilizada no Brasil emprega condutores nus apoiados sobre isoladores fixados em cruzetas de madeira. Este tipo de rede apresenta atualmente uma saturação tecnológica, tanto quanto ao nível de confiabilidade exigido pela sociedade, quanto à necessidade de preservação de meio ambiente [1,2]. Para atender às exigências dos consumidores, as concessionárias de energia elétrica vêm realizando grandes esforços no desenvolvimento e implantação de novas redes de distribuição a custos compatíveis com a realidade nacional. No Brasil, uma das alternativas que vem sendo implantada desde a década de 90 é a utilização de redes aéreas protegidas. Os resultados obtidos das primeiras experiências brasileiras foram promissores, revelando que as redes aéreas protegidas constituem uma solução técnica e economicamente viável para aumentar a confiabilidade e segurança do sistema de distribuição [3]. Entre as vantagens da utilização da rede aérea protegida estão: compactação do circuito, redução das áreas de poda de árvores, minimização das interrupções no fornecimento de energia, boa resistência mecânica e custos atrativos [2-4]. Ainda, as redes aéreas protegidas são compatíveis com os novos índices de qualidade de energia implantados em 1998 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e com as exigências do Sistema de Gestão Ambiental ISO 14000, que define políticas e programas de gerenciamento do meio ambiente [3].

Entre os equipamentos que compõem estas redes estão os cabos protegidos, onde os condutores são cobertos com uma camada de material polimérico, geralmente polietileno reticulado (XLPE). Também

é utilizada a cobertura dupla XLPE/HDPE. Em condições reais de operação, a isolação dos cabos protegidos está submetida a diversos estresses, a saber, elétrico, térmico, mecânico e ambiental. Cada um destes estresses possui um subconjunto de variáveis. Assim, para o estresse elétrico têm-se como variáveis o campo elétrico aplicado e a frequência de operação. Para o estresse térmico as variáveis são: temperatura de operação e ciclos térmicos. Com relação ao estresse mecânico tem-se o dobramento, tração e compressão e para o estresse ambiental as variáveis são: composição dos gases que formam o ambiente, presença de poluentes, umidade e radiação ultravioleta. Estes estresses, agindo de forma individual ou combinada, podem induzir o envelhecimento e degradação dos cabos protegidos [5-9].

Os principais mecanismos de envelhecimento que atuam na isolação dos cabos protegidos são: trilhamento elétrico, erosão, oxidação e fotodegradação [7-12]. O trilhamento elétrico é um mecanismo de envelhecimento superficial do dielétrico que produz trilhas elétricas como resultado da ação de descargas elétricas próximas ou na superfície do material isolante; erosão é a perda localizada e gradual de massa que ocorre pela ação de descargas superficiais [12]. As reações de oxidação podem ocorrer por uma variedade de fatores, tais como: radiação, calor e forças mecânicas [13]. A exposição dos materiais poliméricos à radiação ultravioleta pode levar a ocorrência de fotodegradação. A fotodegradação tem como efeitos a cisão ou o entrecruzamento das cadeias poliméricas, os quais levam a alteração nas propriedades mecânicas do material [10]. Materiais poliméricos podem ainda ser afetados por variáveis climáticas, tais como: temperatura, intensidade de radiação solar, umidade, poluição atmosférica, ciclo térmico, índice pluviométrico e oxigênio contido no ar [14,15].

Com o intuito de avaliar o desempenho de cabos protegidos frente ao envelhecimento natural e sob condições normais de operação, foram construídas duas redes piloto, classe de tensão 15 kV. A primeira rede foi construída em Curitiba, em 1995, no estado do Paraná e a segunda rede foi construída em Cuiabá, em 2001, no estado do Mato Grosso. No presente trabalho estas redes serão citadas como CTBA 1 e CUIA 2. Os locais escolhidos possuem variações climáticas bastante acentuadas e por esta razão foram escolhidas para montagem das redes piloto. Em Cuiabá a incidência de radiação ultravioleta e a temperatura média ao longo do ano são muito maiores do que em Curitiba. Já Curitiba possui umidade relativa superior a Cuiabá [16].

2. EXPERIMENTAL

Para avaliação do desempenho dos cabos protegidos foram realizados diversos ensaios nas instalações do LACTEC, normalizados e não-normalizados, nos cabos novos e após distintos períodos de envelhecimento natural nas redes CTBA 1 e CUIA 2. A rede CTBA 1 foi avaliada a cada 1,5 anos durante 4,5 anos; a rede CUIA 2 foi avaliada anualmente pelo período de 3 anos. Os cabos protegidos avaliados estão identificados na Tabela 1.

Identificação	Material
A1	XLPE
A2	HDPE entrecruzado
B	Dupla camada XLPE/HDPE
C	XLPE
D	XLPE

Foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura e ensaios de resistividade superficial, rigidez dielétrica, trilhamento elétrico e resistência à abrasão.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O ensaio foi realizado utilizando microscópio eletrônico de varredura Philips, modelo XL30. Para a visualização das superfícies, as mesmas foram submetidas à metalização com ouro.

Resistividade e resistência superficial

O ensaio de resistividade superficial em cabos protegidos foi realizado tendo como referência as normas nacionais NBR 11873, EB 2173 e NBR 7299 [17-19]. O equipamento utilizado durante o ensaio foi um medidor de altas resistências, modelo HP4339A. Foram utilizadas cinco amostras de

cada cabo. As medidas de resistência foram realizadas com aplicação de tensão contínua de 500 V DC, durante 1 minuto e a resistividade superficial foi calculada de acordo com o estabelecido em [19].

Rigidez dielétrica em corrente alternada

Para a realização do ensaio de rigidez dielétrica, não-normalizado, foram utilizadas cinco amostras de cada cabo, com 5 m de comprimento. O equipamento utilizado para realização deste ensaio foi um transformador de ensaio BIDDLE, modelo 17000. A tensão elétrica foi aplicada a partir de 20 kV, em patamares de 5 kV, até a ruptura da isolação.

Resistência ao trilhamento elétrico

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 10296 [20]. O equipamento utilizado foi um aparato de teste para avaliação de resistência ao trilhamento desenvolvido no LACTEC. Foram utilizadas cinco amostras de cada cabo.

Resistência à abrasão

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado de acordo com a norma EB 2173 [18]. Foram preparadas cinco amostras de cada cabo, com 15 cm de comprimento. Para realização do ensaio foi utilizado um aparato de teste para ensaio de abrasão desenvolvido no LACTEC e um paquímetro digital, CAL.

3. RESULTADOS

Nas figuras 1 e 2 são apresentadas imagens da superfície da isolação de cabos protegidos de CUIA 2 após 3 anos de envelhecimento natural, obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Não foram realizadas imagens na superfície dos cabos retirados de CTBA 1. Na figura 1a é observado que a superfície da face mais exposta à radiação solar do cabo A2 apresenta buracos e imperfeições provavelmente causados por fotodegradação. Na superfície da face menos exposta à radiação (figura 1b) não foram observadas quaisquer destas alterações. Este fato pode indicar que este material é sensível aos efeitos da radiação solar.

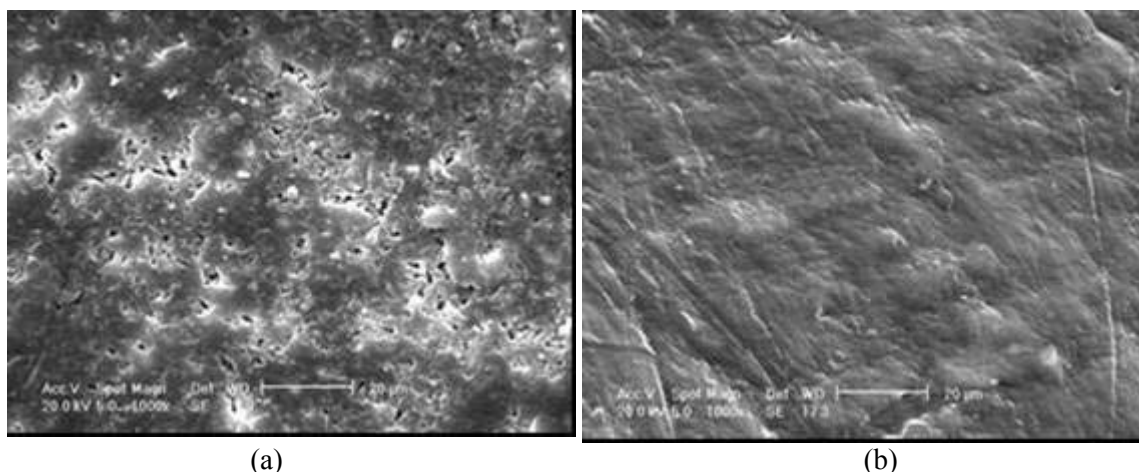


Figura 1. Imagem da superfície do cabo A2 retirado de CUIA 2: (a) face mais exposta à radiação solar; (b) face menos exposta à radiação solar.

O cabo B apresentou fissuras em ambas as superfícies, sendo este fato muito mais pronunciado na face mais exposta à radiação solar, como pode ser visto na Figura 2. É provável que, somado aos efeitos da radiação ultravioleta, outros fatores podem ter contribuído para a degradação do material. O material da cobertura do cabo B possui baixa resistência à fissuração.

A cobertura do cabo do fabricante D não apresentou alterações superficiais em nenhuma das faces, indicando que este material é pouco afetado pela fotodegradação.

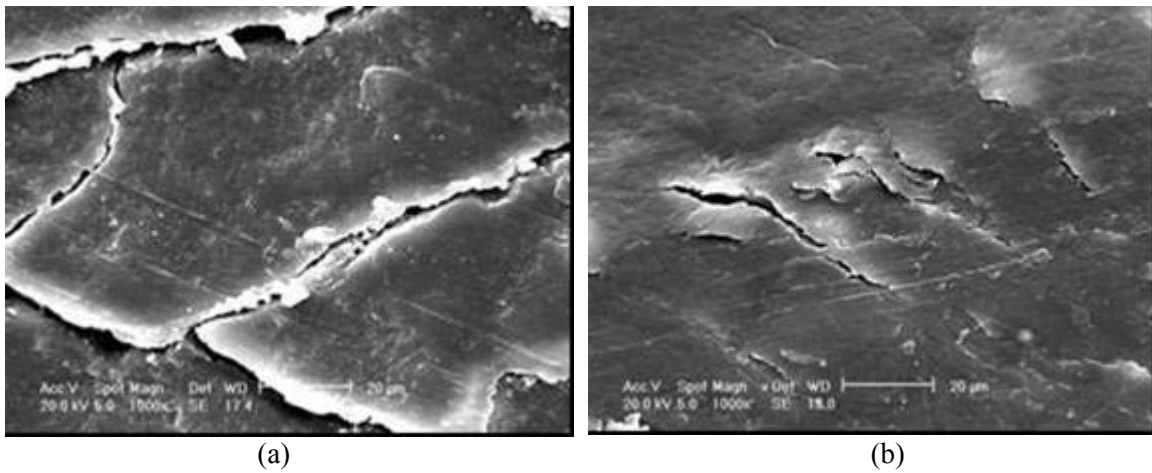


Figura 2. Imagem da superfície do cabo B retirado de CUIA 2: (a) face mais exposta à radiação solar; (b) face menos exposta à radiação solar.

Os resultados das medidas de resistividade superficial dos cabos de CUIA 2 são apresentados na figura 3. Os cabos de CTBA 1 não apresentaram variação significativa nos valores de resistividade superficial ao longo de 4,5 anos de operação. Já nos cabos B e D de CUIA 2 é observada uma tendência à diminuição da resistividade superficial com o tempo. Esta diminuição pode ser devida ao início de degradação na superfície destes materiais pelas solicitações ambientais encontradas na cidade de Cuiabá, isto é, maior incidência de radiação ultravioleta e temperaturas mais elevadas. Todavia, deve ser observado que todos os cabos apresentam valores de resistividade superficial superiores ao estabelecido em [17,18] para cabos novos.

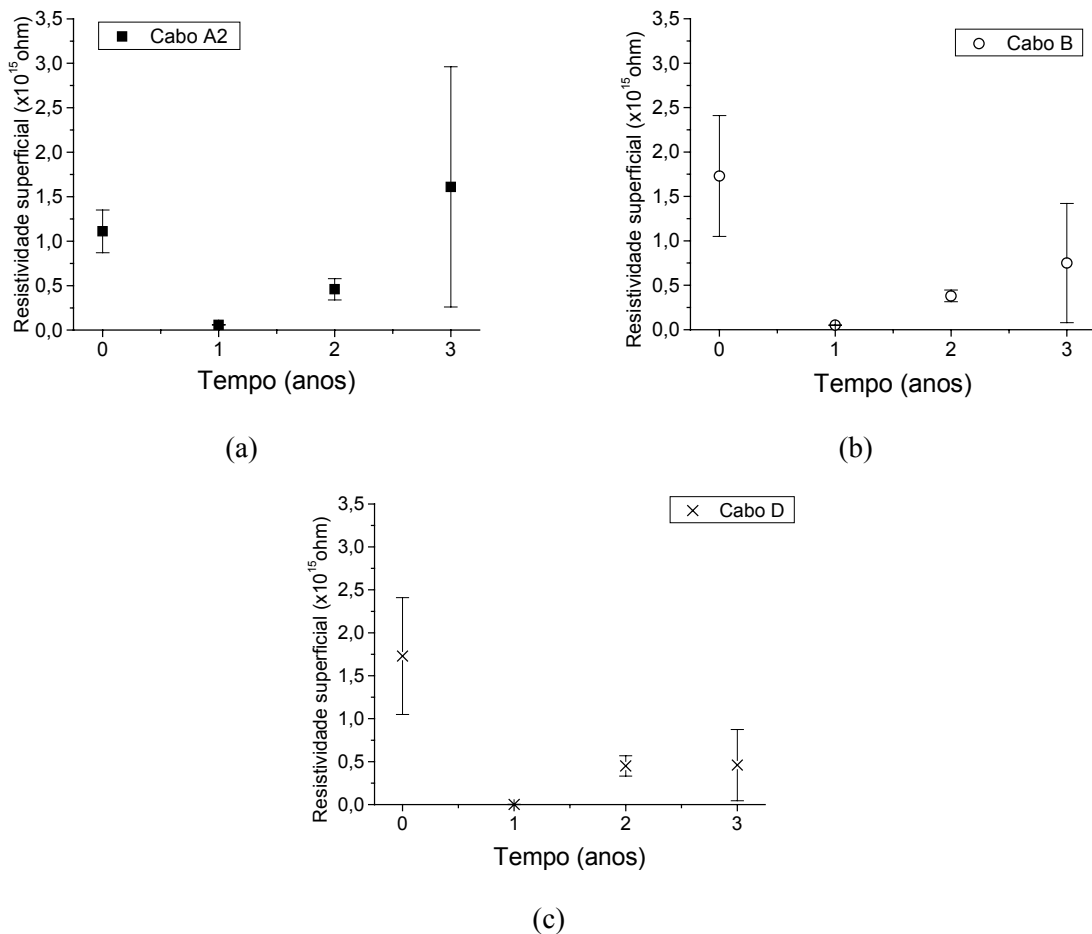


Figura 3. Resistividade superficial dos cabos retirados de CUIA 2 : (a) cabo A2; (b) cabo B) e (c) cabo D.

Os valores de rigidez dielétrica obtidos em CTBA 1 e CUIA 2 são mostrados nas Figuras 4 e 5. Os cabos A1 e C de CTBA 1 e A2 e D de CUIA 2 não apresentaram alterações significativas de suportabilidade elétrica durante o período de avaliação. A diminuição acentuada na suportabilidade do cabo do fabricante B, em CUIA 2, pode ser explicada pelo elevado nível de fissuração apresentado por este cabo, conforme observado nas análises de MEV. As fissuras permitiriam a penetração de umidade no interior da isolação tendo como consequência a redução da rigidez dielétrica.

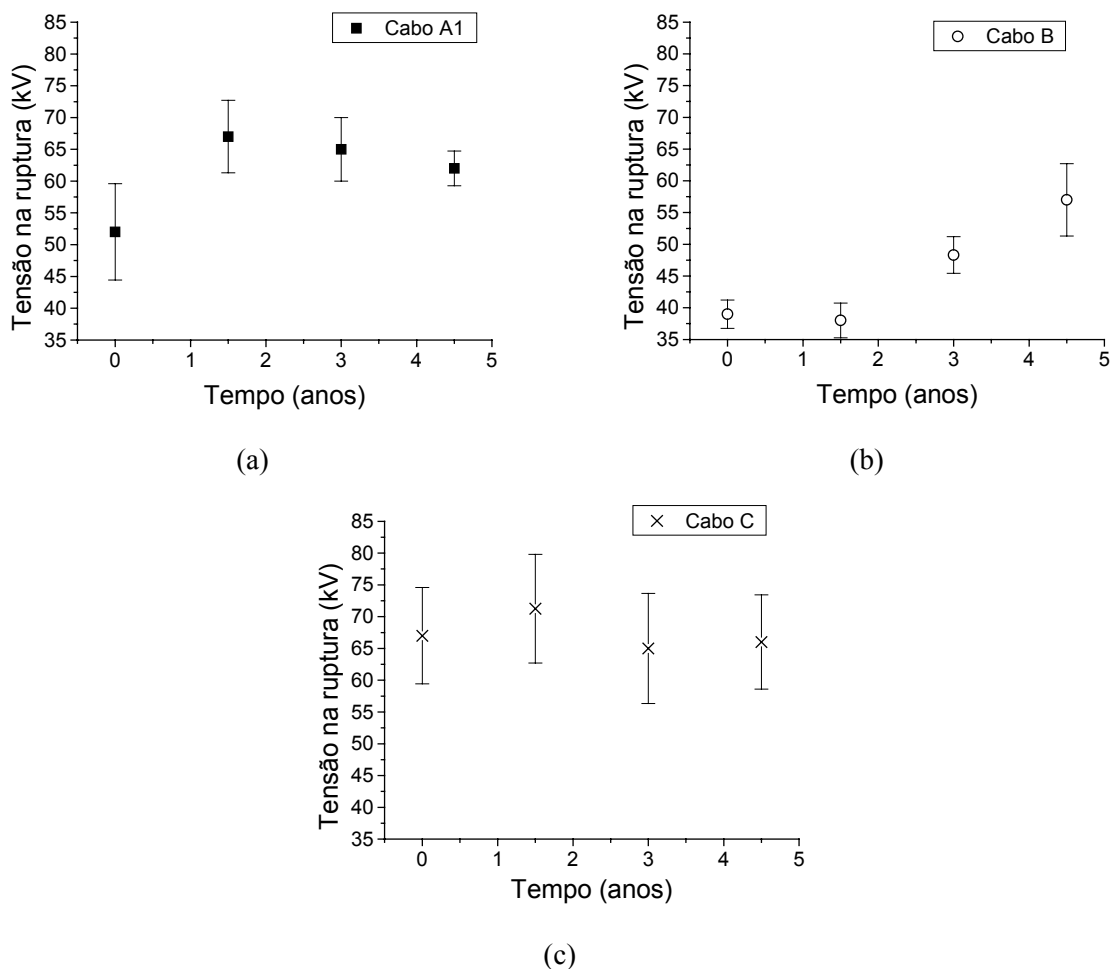
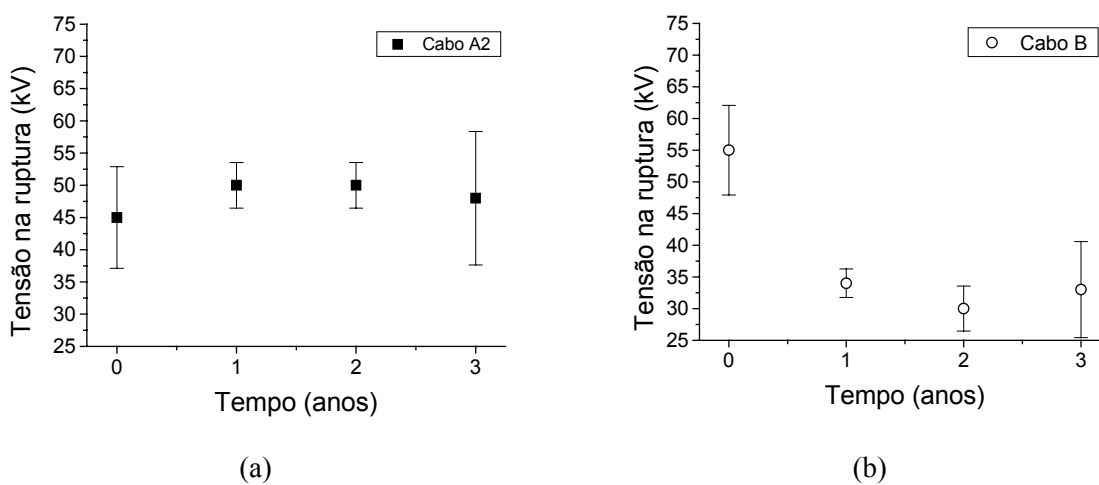
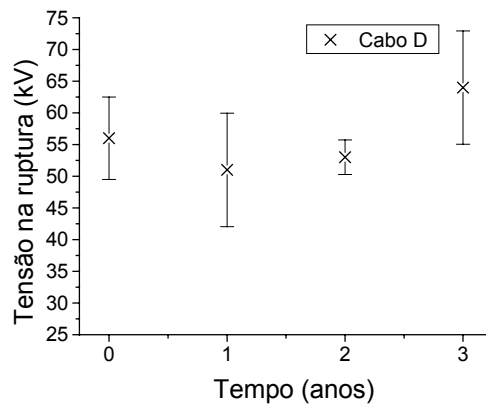


Figura 4. Rigidez dielétrica dos cabos retirados de CTBA 1: (a) cabo A1, (b) cabo B) e (c) cabo C.

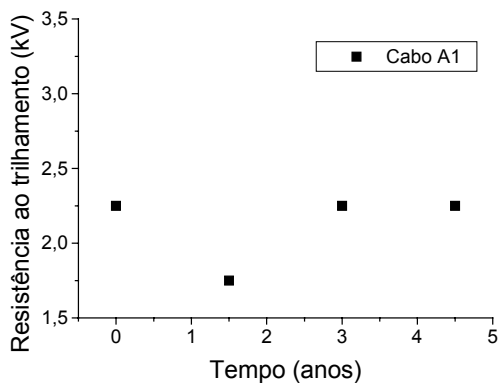




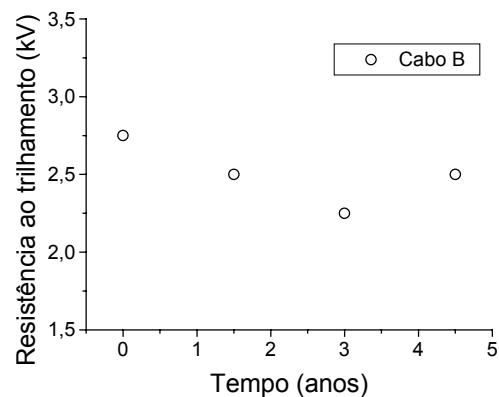
(c)

Figura 5. Rigidez dielétrica dos cabos retirados de CUIA 2 : (a) cabo A2; (b) cabo B) e (c) cabo D.

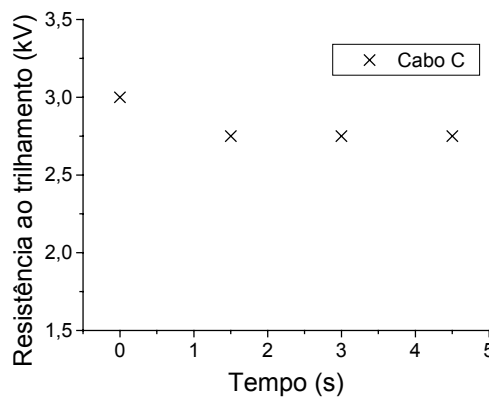
As Figuras 6 e 7 mostram os valores de resistência ao trilhamento elétrico obtidos em CTBA 1 e CUIA 2. O cabo A1 de CTBA 1 apresentou resistência ao trilhamento inferior ao exigido por norma [17,18] em todas as etapas de avaliação indicando sua baixa resistência ao trilhamento elétrico. O cabo B apresentou redução acentuada da resistência ao trilhamento elétrico até o 3º ano. Já o cabo C apresentou o melhor desempenho. Em CUIA 2 o cabo A2 novo apresentou valor inferior ao estabelecido em [17,18]. Nas etapas posteriores o cabo apresentou valores de resistência ao trilhamento compatíveis com as exigências normativas. O cabo B apresentou uma diminuição de resistência ao trilhamento elétrico na 3ª fase e o cabo D uma redução na 4ª fase. Todavia, deve ser observado que tanto o cabo B quanto o cabo D tiveram valores de resistência ao trilhamento superior ao estabelecido em [17,18], sendo que o cabo D teve o melhor desempenho.



(a)

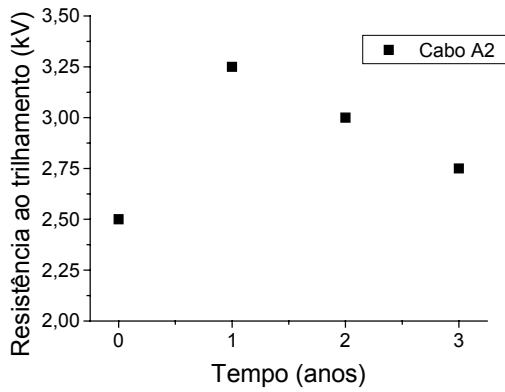


(b)

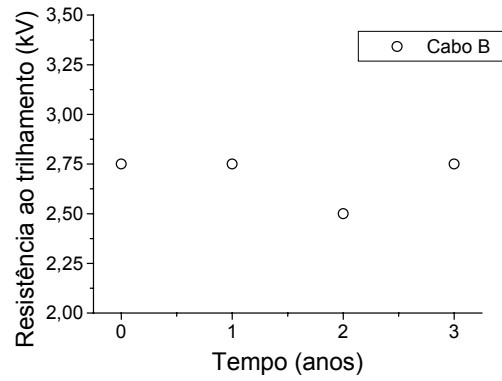


(c)

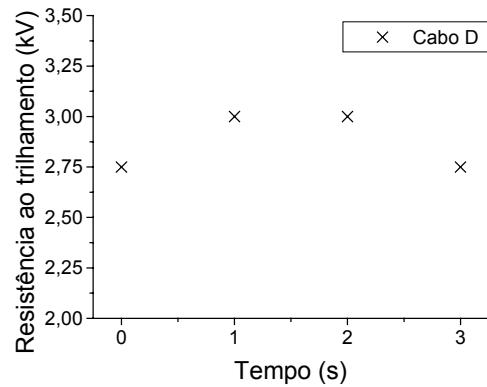
Figura 6. Resistência ao trilhamento elétrico dos cabos de CTBA 1: (a) cabo A1, (b) cabo B e (c) cabo C.



(a)



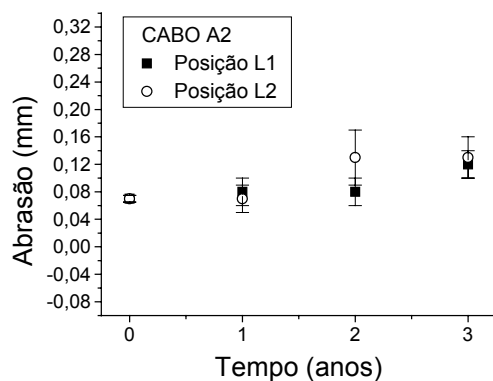
(b)



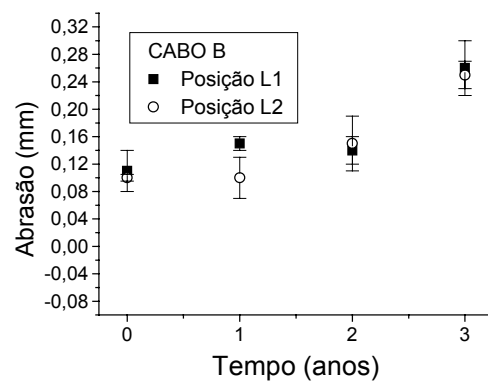
(c)

Figura 7. Resistência ao trilhamento elétrico dos cabos de CUIA 2 : (a) cabo A2, (b) cabo B) e (c) cabo D.

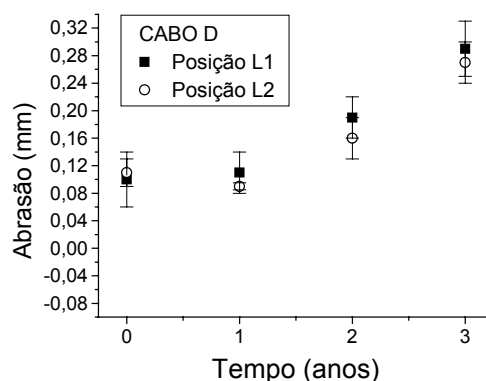
Na Figura 8 estão apresentados os resultados do ensaio de abrasão realizados nos cabos retirados de CUIA 2. Em CTBA 1 os cabos não apresentaram variação significativa da abrasão. Por outro lado, em CUIA 2 os cabos apresentaram uma tendência ao aumento da abrasão, isto é, a diminuição de sua resistência à abrasão, chegando muito próximo aos valores limite estabelecidos em [17]. Este efeito é mais pronunciado nos cabos B e D.



(a)



(b)



(c)

Figura 8. Resistência à abrasão dos cabos retirados de CUIA 2: (a) cabo A2, (b) cabo B e (c) cabo D.

4. CONCLUSÃO

A avaliação de desempenho de cabos protegidos foi realizada em duas cidades: Curitiba e Cuiabá. O clima da cidade de Curitiba caracteriza-se por elevada umidade e temperatura amena na maior parte do ano; a cidade de Cuiabá tem como características a alta incidência de radiação ultravioleta e elevada temperatura ao longo do ano.

Na cidade de Curitiba não foram observadas, após 4,5 anos de operação, alterações muito significativas no desempenho dos cabos protegidos. Este fato é um indicativo do bom estado de conservação dos mesmos. A única ressalva diz respeito ao cabo A que apresentou baixa resistência ao trilhamento elétrico em todas as etapas de avaliação. Ainda, o cabo C apresentou o melhor desempenho.

Na cidade de Cuiabá, apesar do menor tempo de avaliação (3 anos), foram observadas alterações significativas em diversos parâmetros. Nas análises das imagens de MEV foi observada fissuração nos cabos A e B, sendo esta mais acentuada no cabo B (isolação em dupla camada). É sugerido que a ocorrência de fissuração seja devido à fotodegradação ocasionada pela alta incidência de radiação solar e elevada temperatura da região. Ainda, o cabo B apresentou redução acentuada da rigidez dielétrica e da resistência à abrasão.

Foi observado que as variáveis climáticas da região em que os cabos estão instalados afetam fortemente o seu desempenho em campo. Novos estudos devem ser realizados, em outras regiões do país, para continuidade da avaliação de desempenho dos cabos que compõem a rede protegida.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DOI, H., MIYUACHI, H., MATSUMOTO, M. T. *Cabos Cobertos com XLPE para Linhas Aéreas de Distribuição*. Mundo Elétrico, p. 90-93, 1987.
- [2] NISHIMURA, F.; CICALARELLI, L.D.; MARTINS, J.P. *Rede Aérea Isolada e Protegida de Média Tensão*. Eletricidade Moderna, n. 241, p. 68-73, 1994.
- [3] SOARES, M. R. *Novo Padrão da CEMIG Eleva Níveis de Confiabilidade*. Eletricidade Moderna, n. 291, p. 50-63, 1998.
- [4] SOTILLE, C. A., PINHEIRO, W. *Aplicação de Cabos Protegidos*. Revista Electron, p. 14-22, 1989.
- [5] SILVA, G. C. *Comportamento elétrico e dielétrico de cabos de potência extrudados utilizados em redes de distribuição de energia elétrica*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia, Setor de Tecnologia da UFPR, Curitiba, 2000.
- [6] MUNARO, M. *Avaliação da degradação do polietileno empregado em equipamentos para distribuição de energia elétrica, através de temperatura de oxidação medida por calorimetria diferencial de varredura (DSC)*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia, Setor de Tecnologia da UFPR, Curitiba, 2000.

- [7] MONTANARI, G. C.; SIMONI, L. *Aging Phenomenology and Modeling*. IEEE Trans. Elect. Insul., vol. 28, n. 5, p. 775-776, Oct. 1993.
- [8] DENSLEY, R. J.; BARTNIKAS, R.; BERNSTEIN, B. *Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Dry-Cured Insulation Systems for Power Transmission Cables*. IEEE Trans. Power Delivery, v. 9, n. 1, p. 559-571, 1994.
- [9] GJAERDE, A. C. *Multiple Aging Models – Origin and Similarities*. IEEE El. Ins. Magazine, v. 13, n. 1, p. 6-13, 1997.
- [10] RABEK, J.F., *Photodegradation of polymers – Physical Characteristics and applications*. Springer-verlag, Berlin 1996.
- [11] PINHEIRO, W. et al. *Cabos cobertos: Diagnóstico de Problemas e Estudo de Soluções*. Eletricidade Moderna, n. 299, p. 151-154, 1999
- [12] YOSHIMURA, N.; KUMAGAI, S.; DU, B. *Research in Japan on the Tracking Phenomenon of Electrical Insulating Materials*. IEEE Elect. Insul. Magazine, v. 13, n. 5, p. 8-19, 1997.
- [13] WOLTER, K.D.; JOHNSON, J.F.; TANAKA, J. *Polymer Degradation and its Measurements*. In: EICHHORN, R.M.; BARTNIKAS, R. *Engineering Dielectrics –Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Measurement Techniques*, vol. IIB. Baltimore: ASTM STP926, Bartnikas editor, 1987, p. 313-439.
- [14] SATOTO, R. et al. *Weathering of high-density polyethylene in different latitudes*. Polymer Degradation and Stability. Elsevier Science Limited, v. 56, p. 275-279, 1997.
- [15] SAMPER, J. *Importance of weathering factors other than UV radiation and temperature in outdoor exposure*. Polymer degradation and stability, v. 76 p. 455-465, 2002.
- [16] www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA BRASILEIRA REGISTRADA *Cabos cobertos com materiais poliméricos para redes aéreas compactas de distribuição de energia em tensões de 13,8kV a 34,5 KV*. NBR 11873, Rio de Janeiro, 2001.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cabos Aéreos Cobertos com XLPE para Uso em Regiões Arborizadas com Tensões de 15 e 25 kV*, EB-2173. Rio de Janeiro, 1991.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ensaio de Resistividade Superficial – Método de Ensaio*, NBR 7299. Rio de Janeiro, 1982.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Material isolante elétrico – Avaliação de sua resistência ao trilhamento elétrico e erosão sob severas condições ambientais*, NBR 10296. Rio de Janeiro, 1988.