

Desenvolvimento de nova metodologia para avaliação de equipamentos e acessórios de redes protegidas sob condições de multiestressamento

Development of a new methodology for evaluating equipments used in spacer cable systems under multi stress conditions

Luiz Carlos Hartmann¹
Luiz Eduardo Linero¹
Guilherme Cunha²
Fernando Piazza²
Marilda Munaro²

¹Copel – Companhia Paranaense de Energia
hartmann@copel.com
linero@copel.com

²Lactec – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
cunha@lactec.org.br
piazza@lactec.org.br
marilda@lactec.org.br

Abstract: Spacer cable lines, when in operation, are subject to several distinct conditions such as humidity, pollution, temperature variation, solar radiation, electrical and mechanical stress. These stress agents, acting individually or combined, can induce ageing and degradation of the polymeric materials used in covered cables, spacers, insulators and ring ties. With the aim of evaluating the behaviour of these equipments under multi stress conditions, a new methodology has been developed. This methodology is based on the electrical compatibility test, with modified parameters and new techniques for evaluating their behaviour, including thermography and insulation resistance tests. It was observed that rough and

sharp-edge surface accumulate more contamination and have their insulation resistance severely reduced. The results shown by thermography are important tools for visualizing the leakage current path in the spacer, and detect tracking over covered cables.

Keywords: spacer cable systems, covered cables, insulation systems, multi stress, ageing.

Resumo: As redes protegidas de distribuição de energia, quando em operação, ficam submetidas a diversos estresses tais como umidade, poluição, variação de temperatura, radiação solar, tensão elétrica e mecânica. Esses agentes de estresse, agindo de forma individual ou combinada, podem induzir o envelhecimento e a degradação dos materiais poliméricos utilizados nos cabos cobertos, espaçadores, isoladores e anéis de amarração usados na construção das redes. Com o intuito de avaliar o desempenho desses equipamentos sob condições de multiestressamento, uma nova metodologia de avaliação foi desenvolvida. Esta metodologia tem como base o ensaio de compatibilidade elétrica, com parâmetros de teste modificados e com novas técnicas para avaliação do desempenho de materiais, entre as quais a termografia e a medida de resistência de isolamento. Demonstrou-se que os materiais com maior rugosidade, aspereza e rebarbas apresentam acúmulo maior de contaminantes e têm a resistência de isolamento reduzida. Ainda, a termografia demonstrou ser uma técnica importante para visualizar os caminhos de fuga de corrente nos espaçadores e para a detecção de trilhamento em cabos cobertos.

Palavras-Chave: redes protegidas, cabos cobertos, sistemas de isolamento, multiestresse, envelhecimento, compatibilidade elétrica.

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. Esse 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 vêm sendo implantada desde a década de 90 é a utilização de redes compactas protegidas. Os resultados obtidos nas primeiras experiências brasileiras foram promissores, revelando que as redes compactas 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 compacta protegida estão a compactação do circuito, a redução das áreas de poda de árvores, a minimização das interrupções no fornecimento de energia a boa resistência mecânica e custos mais atrativos [2] [3] [4].

Os equipamentos que compõem as redes protegidas são os cabos cobertos, os espaçadores poliméricos, os isoladores poliméricos e os acessórios de amarração. Os materiais poliméricos isolantes normalmente usados na confecção desses equipamentos e acessórios são o polietileno de alta densidade (HDPE), o polietileno reticulado (XLPE), a borracha de silicone (SIR) e a borracha de etileno-propileno (EPR) [5] [6].

Em condições reais de operação, as redes compactas protegidas ficam submetidas a diversos tipos de estresse, tais como o elétrico, o térmico, o mecânico e o ambiental. Cada um desses tipos de estresse possui um subconjunto de variáveis. Assim, para o estresse elétrico tem-se como variáveis o campo elétrico aplicado e a frequência de operação. Para o estresse térmico, as variáveis são a temperatura de operação e as variações de temperatura do ambiente. Com relação ao estresse mecânico tem-se a tração e a compressão, e para o estresse ambiental as variáveis são a composição dos gases que formam o ambiente, a presença de poluentes, a umidade e a radiação ultravioleta. Esses estresses, agindo de forma individual ou combinada, podem induzir o envelhecimento dos materiais poliméricos usados na composição dos sistemas de isolamento dos equipamentos das redes protegidas. O envelhecimento deve ser entendido como uma mudança não-reversível das características isolantes do material [5][6] [7] [8] [9].

Os principais mecanismos de envelhecimento que atuam nos equipamentos e acessórios das redes protegidas são o trilhamento elétrico, a erosão, a oxidação e a fotodegradação [7][8] [9] [10] [11] [12] [13].

Trilhamento elétrico é um mecanismo de envelhecimento superficial do dielétrico que produz trilhas 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. O alto valor de

resistividade superficial dos polímeros isolantes usualmente empregados em redes protegidas limita a circulação de correntes superficiais responsáveis pelo fenômeno de trilhamento. Entretanto, fatores ambientais tais como contaminação via poluentes industriais, sais e outros depósitos, na presença de umidade, podem reduzir drasticamente a resistência superficial da isolamento, criando assim condições para fluir correntes entre pontos de diferentes potenciais. Correntes superficiais circulando continuamente através do filme condutor podem causar evaporação não-uniforme, formando as chamadas bandas secas. Conseqüentemente, o campo elétrico torna-se não-homogêneo, podendo provocar a ocorrência de descargas superficiais que carbonizam o material e iniciam a formação de trilhas elétricas. Com a carbonização, aumenta-se a não-homogeneidade do potencial superficial, contribuindo assim para a aceleração do fenômeno de trilhamento elétrico. A ocorrência desse fenômeno sobre uma área limitada do polímero pode preceder a erosão [12].

A oxidação tem grande importância no envelhecimento de polímeros, afetando as propriedades mecânicas. As reações de oxidação podem ocorrer por uma variedade de fatores, tais como: radiação, calor, forças mecânicas ou ozônio, que pode ser gerado por descargas parciais em uma atmosfera contendo oxigênio [13]. 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 dos equipamentos e acessórios das redes compactas protegidas sob condições de multiestressamento, foi desenvolvida uma nova metodologia de avaliação. Essa metodologia tem como base o ensaio de compatibilidade elétrica da norma CODI 3.2.18.24 – Especificação de Espaçadores e Amarrações para Rede Compacta de 15 kV [16]. Foram realizadas modificações nos parâmetros de teste e proposta uma nova forma de avaliação do desempenho dos equipamentos e acessórios testados, a qual utiliza a termografia para avaliação da fuga de corrente em espaçadores e as medidas de resistência de isolamento como um parâmetro quantitativo a ser considerado.

2 Materiais e métodos

Neste trabalho foram avaliados os equipamentos e acessórios abaixo citados, sendo todos produzidos comercialmente:

- cabo protegido do fabricante A;
- seis isoladores tipo pino do fabricante B;

- conjuntos espaçador - anéis de amarração do fabricante B;
- um conjunto espaçador - anéis de amarração do fabricante C;
- um conjunto espaçador do fabricante B com anéis de amarração do fabricante D.

O ensaio de multiestressamento foi realizado tendo como base o arranjo experimental do ensaio de compatibilidade elétrica desenvolvido no Lactec, mostrado na Figura 1. Os parâmetros de teste foram modificados com o intuito de acelerar os mecanismos de envelhecimento dos materiais.

O teste foi realizado sob as seguintes condições:

- aplicação de corrente elétrica no cabo para a temperatura da superfície da cobertura de 60 °C;
- ciclos de aspersão de chuva de 05 minutos por 15 minutos sem aspersão;
- aspersão de 1 mm/minuto de água com condutividade de 1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- tensão aplicada de 22 kV fase-fase.

Para avaliar o desempenho dos materiais testados, as seguintes técnicas foram usadas:

- inspeção visual com documentação fotográfica antes, durante e após o ensaio;
- inspeção com termografia durante o período de ensaio;
- medição da resistência de isolamento dos espaçadores antes e após a realização do ensaio.



Figura 1: Arranjo experimental do ensaio de compatibilidade elétrica.

Deve ser destacado que o arranjo experimental utilizado consiste de um sistema trifásico que permite simular uma rede protegida em condições muito próximas das encontradas no campo. Os sistemas de aplicação de corrente e tensão são independentes, o que permite aquecer o cabo sem tensão aplicada, assim como aplicar tensão com o sistema de aquecimento desligado.

A inspeção visual e a termografia foram realizadas decorridos 10, 15, 21, 28 e 40 dias de ensaio.

A termografia foi realizada utilizando-se um termovisor NEC-Thermo Tracer, modelo TH5100. Após 40 dias de ensaio o arranjo experimental foi desligado e os materiais foram retirados para inspeção visual e medidas de resistência de isolamento.

A resistência de isolamento foi realizada nos conjuntos espaçador-amarração, antes e após o ensaio de multiestressamento. O arranjo experimental usado nesse ensaio é apresentado na Figura 2.

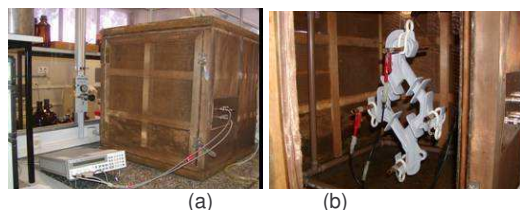


Figura 2: Arranjo experimental para medida de resistência de isolamento em espaçadores: (a) vista externa e (b) vista interna.

O equipamento utilizado para as medidas de resistência de isolamento foi um medidor de altas resistências, marca Hewlett Packard, modelo 4339A.

As medidas foram realizadas em ambiente controlado (temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de $60 \pm 2\%$) e com a amostra inserida em gaiola de Faraday. Foi aplicada tensão de 500 V DC, em cinco posições distintas do espaçador (denominadas 1-2, 2-3, 3-4, 4-1 e 2-4), isto é, entre fase e fase e entre fase e mensageiro, durante 60 segundos. Terminado o período de aplicação de tensão, a leitura é efetuada e registrada. Para cada posição testada foram realizadas cinco medidas de resistência de isolamento e calculada a média dos valores obtidos.

3 Resultados e discussão

Os resultados dos ensaios aqui apresentados estão subdivididos em inspeção visual, termografia e medida de resistência de isolamento.

3.1 Inspeção visual

Na inspeção visual, realizada após dez dias de ensaio, nenhuma alteração significativa (trilhamento, erosão e/ou fissuração) foi observada nos materiais. Após quinze dias de teste, foi observado início de trilhamento no cabo protegido, principalmente nas regiões próximas dos pontos de amarração. Na avaliação realizada após 21 dias, foi observado aumento da região de trilhamento elétrico no cabo e, em alguns pontos, ocorrência de erosão da cobertura (Figura 3).



Figura 3: Trilhamento elétrico e erosão no cabo protegido.

Conforme mostrado na Figura 4, os anéis de amarração do fabricante B, confeccionados em EPR, apresentaram trilhamento elétrico e deformação permanente, mantendo-se curvados depois da retirada do ensaio de multiestressamento.



Figura 4: Anéis de amarração do fabricante B apresentando deformação permanente e trilhamento elétrico.

Na Figura 5 estão mostrados os anéis de amarração do fabricante D, confeccionados com um composto de silicone, que apresentaram pequena deformação permanente, acrescida de um leve trilhamento elétrico.



Figura 5: Anéis de amarração do fabricante D apresentando pequena deformação permanente e leve trilhamento elétrico.

A Figura 6 mostra os anéis de amarração, em silicone, do fabricante C, os quais não apresentaram deformação permanente. Todavia, foi observada a ocorrência de um leve trilhamento elétrico em um dos anéis.



Figura 6: Anéis de amarração do fabricante C: nenhuma alteração significativa.

No berço do espaçador do fabricante B, e em regiões próximas a ele, foi observado acúmulo de sal, trilhamento elétrico e alterações superficiais devido à passagem de corrente de fuga (Figura 7). Vale observar que, durante inspeção visual desse espaçador, foram notados rugosidade, aspereza e rebarbas em sua superfície. Esses fatores constituem pontos de acúmulo de contaminantes, sendo, portanto, pontos de maior probabilidade de ocorrência de trilhamento elétrico. Por outro lado, o espaçador do fabricante C não apresentou alterações significativas após o multiestressamento.

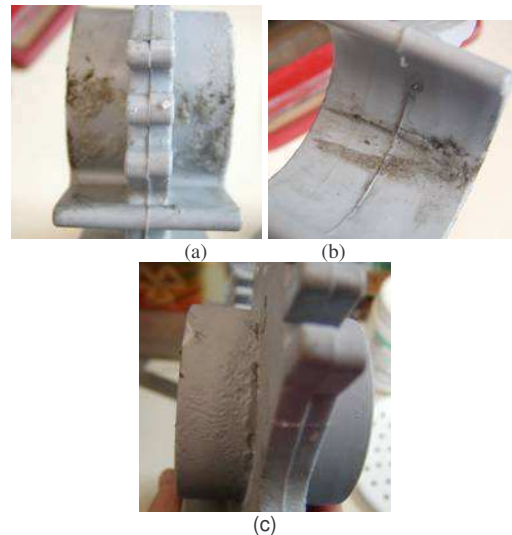
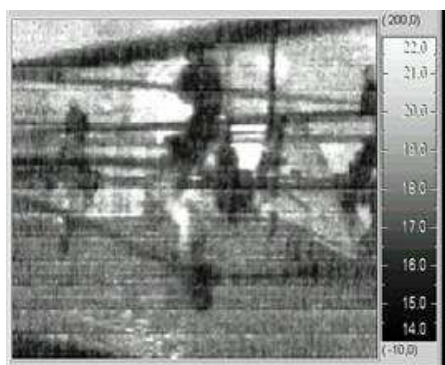


Figura 7: Espaçador do fabricante B: imagem do berço apresentando (a) acúmulo de sal, (b) trilhamento elétrico e (c) alterações superficiais devido à corrente de fuga.

3.2 Termografia

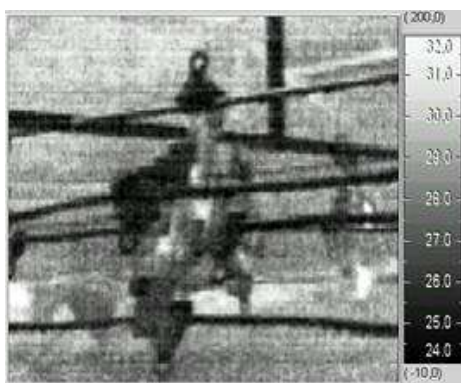
Nas Figuras 8 e 9 estão apresentados os resultados de termografia, com o sistema de aquecimento desligado, para os espaçadores dos fabricantes B e C, decorridos 15, 28 e 40 dias de ensaio. Pode ser notada, em todos os espaçadores, a ocorrência de fuga de corrente na região central dos espaçadores, sendo este fenômeno mais acentuado no espaçador do fabricante B.



(a)

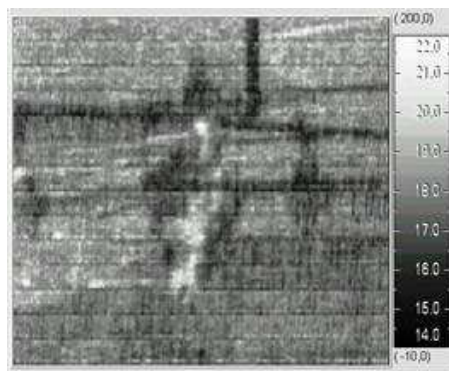


(b)

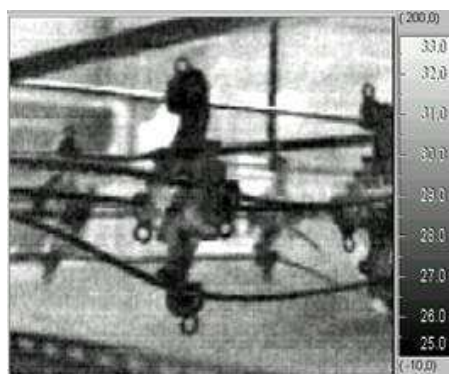


(c)

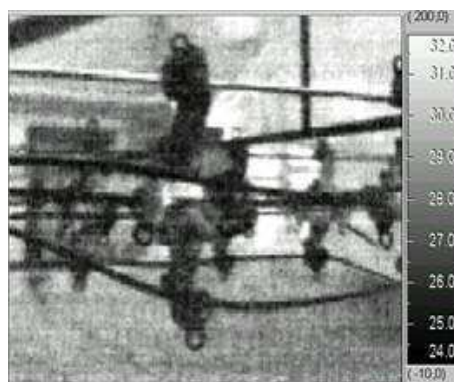
Figura 8: Fabricante B: termografia, com o sistema de aquecimento desligado, do conjunto espaçador-amarração, decorridos (a) 15 dias, (b) 28 dias e (c) 40 dias de ensaio.



(a)



(b)

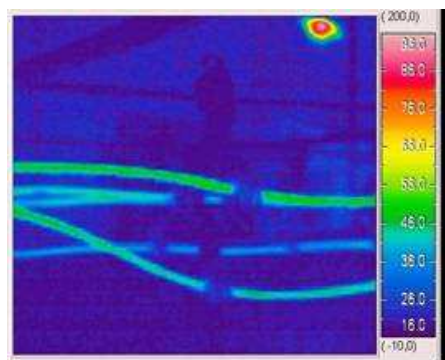


(c)

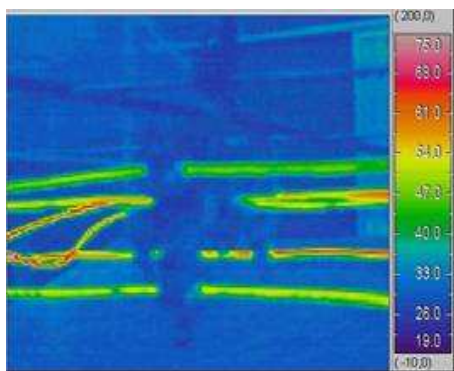
Figura 9: Fabricante C: termografia, com o sistema de aquecimento desligado, do conjunto espaçador-amarração, decorridos (a) 15 dias, (b) 28 dias e (c) 40 dias de ensaio.

Nas Figuras 10 a 11 são apresentados os resultados de termografia, com o sistema de aquecimento ligado, para os espaçadores dos fabricantes B e C, decorridos 15, 28 e 40 dias de ensaio. É observado, na região próxima do espaçador do fabricante B, elevação de temperatura ($68\text{ }^{\circ}\text{C}$) no cabo, decorridos 28 dias de ensaio. Foi verificado que neste ponto estava ocorrendo trilhamento elétrico do cabo. No

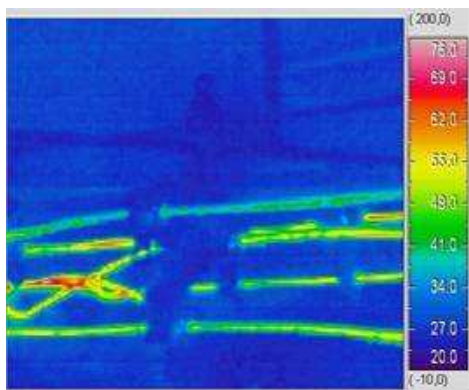
espaçador do fabricante C não foi verificada nenhuma alteração significativa na temperatura.



(a)

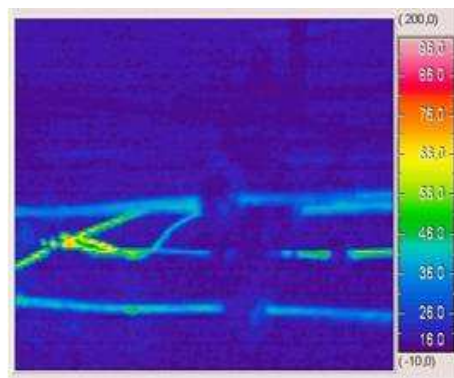


(b)

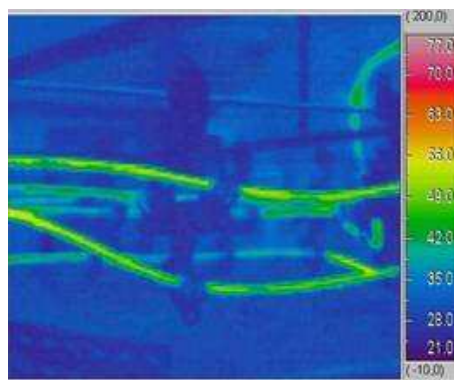


(c)

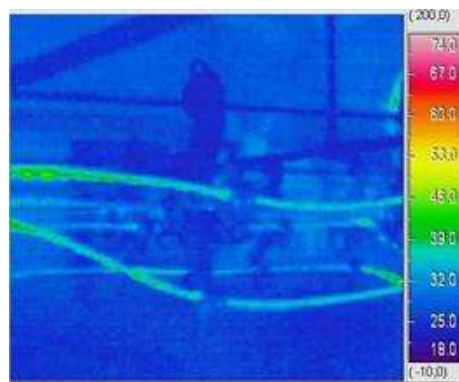
Figura 10: Fabricante B: termografia, com o sistema de aquecimento ligado, do conjunto espaçador-amarração, decorridos (a) 15 dias, (b) 28 dias e (c) 40 dias de ensaio.



(a)



(b)



(c)

Figura 11: Fabricante C: termografia, com o sistema de aquecimento ligado, do conjunto espaçador-amarração, decorridos (a) 15 dias, (b) 28 dias e (c) 40 dias de ensaio.

Os resultados do ensaio de multiestressamento estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados do teste de multiestressamento.

Inspeção	Fuga de corrente	Trilhamento
10 dias	Em todos os espaçadores, sendo em menor intensidade nos espaçadores do fabricante C.	Não.
15 dias	Em todos os espaçadores, sendo em menor intensidade nos espaçadores do fabricante C.	Sim. Nos cabos, em locais próximos dos pontos de amarração.
Após 28 dias e 40 dias	Em todos os espaçadores, sendo em menor intensidade nos espaçadores do fabricante C.	Sim. Nos cabos, em locais próximos dos pontos de amarração. Início de erosão em alguns pontos.

3.3 Medida de resistência de isolamento

A Tabela 2 mostra os resultados das medidas de resistência de isolamento nos espaçadores novos. O valor médio da resistência de isolamento dos espaçadores novos, tanto do fabricante B quanto do fabricante C, está na faixa de $10^{14} \Omega$.

Os resultados das medidas de resistência de isolamento realizadas em dois espaçadores, sendo um dos espaçadores do fabricante B e outro do fabricante C, após o ensaio de multiestressamento, estão apresentados na Tabela 3. O espaçador B apresentou redução acentuada da resistência de isolamento, chegando esta diminuição ser, em alguns casos, de até seis ordens de grandeza. Foi verificado que havia resíduos de trilhamento e contaminantes (sal) aderidos no berço do espaçador do fabricante B. O espaçador do fabricante C não apresentou alteração significativa no valor de resistência de isolamento.

Tabela 2: Resistência de isolamento nos espaçadores novos.

Espaçador	Medida	R (Ω)
Fabricante B	1-2	$1,73 \times 10^{14}$
	2-3	$4,15 \times 10^{14}$
	3-4	$7,60 \times 10^{14}$
	4-1	$4,53 \times 10^{14}$
	2-4	$4,42 \times 10^{14}$
Fabricante C	1-2	$7,20 \times 10^{15}$
	2-3	$2,58 \times 10^{14}$
	3-4	$5,30 \times 10^{14}$
	4-1	$2,12 \times 10^{14}$
	2-4	$1,96 \times 10^{14}$

Tabela 3: Resistência de isolamento nos espaçadores após o multiestressamento.

Espaçador	Medida	R (Ω)
Fabricante B	1-2	$2,63 \times 10^{11}$
	2-3	$2,54 \times 10^{11}$
	3-4	$3,54 \times 10^{11}$
	4-1	$4,32 \times 10^{11}$
Fabricante C	2-4	$1,73 \times 10^{11}$
	1-2	$5,12 \times 10^{14}$
	2-3	$3,26 \times 10^{14}$
	3-4	$2,15 \times 10^{15}$
	4-1	$5,83 \times 10^{15}$
2-4	$4,84 \times 10^{15}$	

As medidas de resistência de isolamento vêm corroborar os resultados obtidos na inspeção visual e na termografia. Os espaçadores com maior rugosidade superficial, aspereza e rebarbas apresentaram maior acúmulo e aderência de contaminantes na superfície, maior ocorrência de trilhamento elétrico e redução da resistência de isolamento, isto é, tiveram pior desempenho.

4 Conclusão

Foi apresentada uma nova metodologia para qualificação e avaliação de equipamentos e acessórios da rede protegida. Esta nova metodologia tem como base o ensaio de compatibilidade elétrica e apresenta duas novas técnicas para avaliação do desempenho de materiais: a termografia e a medida de resistência de isolamento. Pelo fato destas técnicas de avaliação serem inovadoras, particularmente para o teste de compatibilidade elétrica, não existe nenhuma norma ou documento técnico que conste uma referência para fins de comparação dos valores obtidos.

Os resultados obtidos indicam que o método é adequado para a qualificação e avaliação de desempenho de conjuntos espaçador-amarração, sendo que a mesma metodologia pode ser empregada para avaliação de conjunto isolador-amarração.

Os anéis de amarração que apresentaram melhor desempenho foram aqueles confeccionados em silicone. Os anéis fabricados em EPR apresentaram trilhamento elétrico e elevada deformação permanente.

A termografia, com o sistema de aquecimento desligado, mostrou-se como uma ferramenta útil para verificação dos caminhos de fuga de corrente nos espaçadores. Além disso, com o sistema de aquecimento ligado, apresentou-se como uma ferramenta útil para verificação da ocorrência de trilhamento elétrico em cabos protegidos.

A resistência de isolamento mostrou-se um parâmetro a ser considerado nas avaliações de desempenho de materiais.

As medidas de resistência de isolamento confirmaram os resultados obtidos na inspeção visual e na termografia. Os espaçadores do fabricante B, com maior rugosidade superficial, aspereza e rebarbas apresentaram maior acúmulo e aderência de contaminantes na superfície, maior ocorrência de trilhamento elétrico e redução da resistência de isolamento, isto é, tiveram pior desempenho em relação ao espaçador do fabricante C.

Os mecanismos de envelhecimento observados foram o trilhamento elétrico e a erosão. O trilhamento elétrico ocorre preferencialmente na interface cabo-espaçador-amarração.

Para validação completa da metodologia desenvolvida, o procedimento deve ser repetido e novo ensaio, envolvendo um número maior de fabricantes, deve ser realizado.

5 Referências

- [1] H. Doi, H. Miyuachi, M. T. Matsumoto. "Cabos Cobertos com XLPE para Linhas Aéreas de Distribuição". **Mundo Elétrico**, pp. 90-93, 1987.
- [2] F. Nishimura, L. D. Cicarelli, J. P. Martins. "Rede Aérea Isolada e Protegida de Média Tensão". **Eletricidade Moderna**, n. 241, pp. 68-73, 1994.
- [3] M. R. Soares. "Novo Padrão da CEMIG Eleva Níveis de Confiabilidade". **Eletricidade Moderna**, n. 291, p. 50-63, 1998.
- [4] C. A. Sotille, W. Pinheiro. "Aplicação de Cabos Protegidos". **Revista Electron**, pp. 14-22, 1989.
- [5] G. C. Silva. "**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] M. Munaro. "**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] G. C. Montanari, L. Simoni. "Aging Phenomenology and Modeling". **IEEE Trans. Elect. Insul.**, vol. 28, n. 5, p. 775-776, Oct. 1993.
- [8] R. J. Densley, R. Bartnikas, B. Bernstein. "Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Dry-Cured Insulation Systems for Power Transmission Cables". **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 9, n. 1, pp. 559-571, 1994.
- [9] A. C. Gjaerde. "Multiple Aging Models – Origin and Similarities". **IEEE El. Ins. Magazine**, v. 13, n. 1, p. 6-13, 1997.
- [10] J. F. Rabek. **Photodegradation of polymers – Physical Characteristics and Applications**. Springer-Verlag, Berlin 1996.
- [11] W. Pinheiro et al. "Cabos cobertos: Diagnóstico de Problemas e Estudo de Soluções". **Eletricidade Moderna**, n. 299, p. 151-154, 1999.
- [12] N. Yoshimura, S. Kumagai, B. Du. "Research in Japan on the Tracking Phenomenon of Electrical Insulating Materials". **IEEE El. Ins. Magazine**, v. 13, n. 5, p. 8-19, 1997.
- [13] K. D. Wolter, J.F. Johnson, J. Tanaka. "Polymer Degradation and its Measurements". In: **Engineering Dielectrics – Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Measurement Techniques**, vol. IIB. Baltimore: ASTM STP926, Bartnikas editor, pp. 313-439, 1987.
- [14] R. Satoto et al. "Weathering of high-density polyethylene in different latitudes". **Polymer Degradation and Stability**, v. 56, pp. 275-279, 1997.
- [15] J. Samper. "Importance of weathering factors other than UV radiation and temperature in outdoor exposure". **Polymer Degradation and Stability**, v. 76, pp. 455-465, 2002.
- [16] COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO. Especificação de espaçadores e amarrações para rede compacta 15 kV. CODI 3.2.18.24, 1996.