

Análise de falha em isolador polimérico

LISBOA, M.B.¹, FURTADO, H.C.¹, OLIVEIRA, W.P.^{II}

¹ Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária, Cep: 21941-911
Rio de Janeiro, RJ.

e-mail: mbi@cepel.br ; heloisa@cepel.br

^{II} Furnas Centrais Elétricas S.A., Rua Real Grandeza, 219, Botafogo, Cep:22281-031, Rio de Janeiro, RJ
e-mail: wendell@furnas.com.br

RESUMO

O estudo visou a determinação das causas da falha de um isolador polimérico composto, empregado em uma linha de transmissão (LT) de 138kV. O trabalho foi desenvolvido seguindo a metodologia recomendada para análise de falhas, envolvendo caracterização metalúrgica e ensaios químicos. Foi possível, através dos ensaios realizados, identificar o mecanismo de corrosão sob tensão (CST) como o responsável pelo processo de fratura frágil sofrido pelo isolador. Este mecanismo é frequentemente associado às falhas em isoladores poliméricos compostos (resinas epóxi reforçadas com fibras de vidro ricas em boro), em presença de umidade. O isolador em questão apresentava uma série de características construtivas inadequadas que possibilitaram a penetração de umidade na terminação inferior e conseqüente contato com o núcleo do bastão PRV (polímero reforçado com vidro) levando à sua ruptura em serviço. Os resultados deste trabalho motivaram a substituição de todos os isoladores poliméricos com características semelhantes por parte da concessionária de energia elétrica.

Palavras chaves: análise de falha, isolador polimérico, CST.

Failure analysis in polymeric insulator

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the cause of the failure in service of a polymeric insulator used in a 138 kV transmission line (TL). The study was conducted following the most usual recommended methodology for failure analysis, metallurgical characterization and chemicals tests. The tests identified that the mechanism of stress corrosion cracking (SCC) was responsible for the insulator's brittle fracture. This mechanism is often associated with the existence of flaws in polymeric insulators compounds (epoxy resins reinforced with boron rich glass fibers) in the presence of moisture. The tests revealed that the design characteristics of the insulator were inappropriate because they allowed the penetration of moisture into its lower termination and subsequent contact with the GRP (glass reinforced polymer) core, leading to its disruption. These results led to the replacement of all insulators with similar characteristics by the electric power transmission utility.

Keywords: failure analysis, polymeric insulator, SCC.

1 INTRODUÇÃO

Um isolador polimérico de uma linha de transmissão de 138kV falhou em serviço após 13 anos de operação, Figura 1a. A fratura ocorrida no bastão do isolador, no interior da terminação do lado energizado (inferior), apresentava um aspecto de ruptura frágil, caracterizada pela superfície plana, Figura 1b.

Fraturas em isoladores poliméricos compostos ocorridas por sobrecarga de esforços axiais apresentam superfícies fibrosas muito irregulares com aspecto de escova [1]. As características frágeis observadas nesta ocorrência denotaram a ação de um mecanismo de fragilização. Este trabalho buscou, a partir da realização de ensaios de caracterização, a determinação das causas da falha no isolador.

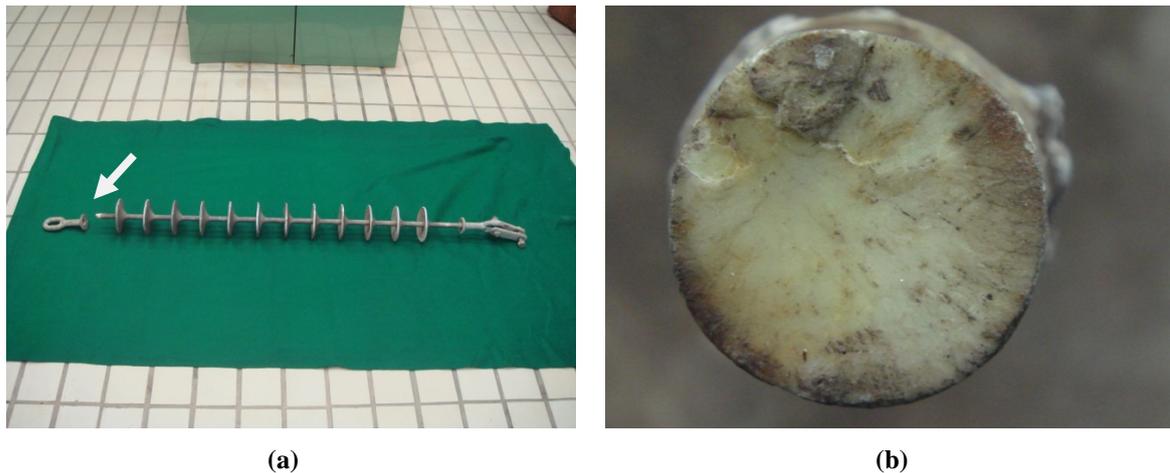


Figura 1: Isolador de 138 kV falhado em serviço (a) vista geral do isolador (seta indicando a região de falha) e (b) detalhe da superfície de fratura plana do bastão do isolador.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de caracterização para determinação das causas da falha se concentraram na região do bastão do isolador, o qual era composto por resina reforçada por fibra de vidro (PRV).

Inicialmente, executou-se uma análise visual seguida do exame da morfologia da fratura no microscópio estéreo e no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Visando a correlação da formação ácida decorrente do contato de soluções aquosas com os catalisadores presentes na resina utilizada na fabricação do isolador, procedeu-se a determinação, por potenciometria, do pH de uma solução de água bidestilada deixada em contato por 240 horas com o bastão. O teor de boro presente nas fibras de vidro foi avaliado por espectrofotometria de absorção atômica e empregou-se espectrofotometria de infravermelho com transformada de Fourier (IVTF) para avaliar a natureza da resina e do revestimento polimérico, comparando os resultados obtidos com padrões de tinta epóxi cinza e de silicone, respectivamente.

3 RESULTADOS

3.1 Análise Visual

A análise visual realizada sobre o isolador polimérico corroborou a observação inicial acerca das características frágeis do mecanismo de fratura e revelou indícios de características construtivas inadequadas, no que tange as recomendações sobre a perfeita estanqueidade contra penetração de umidade na terminação e consequente contato desta com o núcleo do bastão.

O aspecto de fratura é plano, livre de irregularidades, tendo a falha ocorrido no interior da terminação inferior em uma área sem revestimento de proteção. Na Figura 2 observa-se, também, a presença de produtos de corrosão, na superfície de fratura e na lateral da extremidade falhada do bastão, associada a pequenas trincas, além de marcas radiais provocadas pelo processo de fixação do bastão à terminação metálica (presença de uma luva interna dentada mordendo o bastão).

De acordo com a Figura 3a pode-se observar que a terminação metálica inferior possui uma superfície côncava, propiciando um acúmulo de água de chuva quando posicionada verticalmente na linha de transmissão e na Figura 3b verifica-se que o anel de selagem é muito delgado apresentando, ainda, características de descolamento e deterioração.

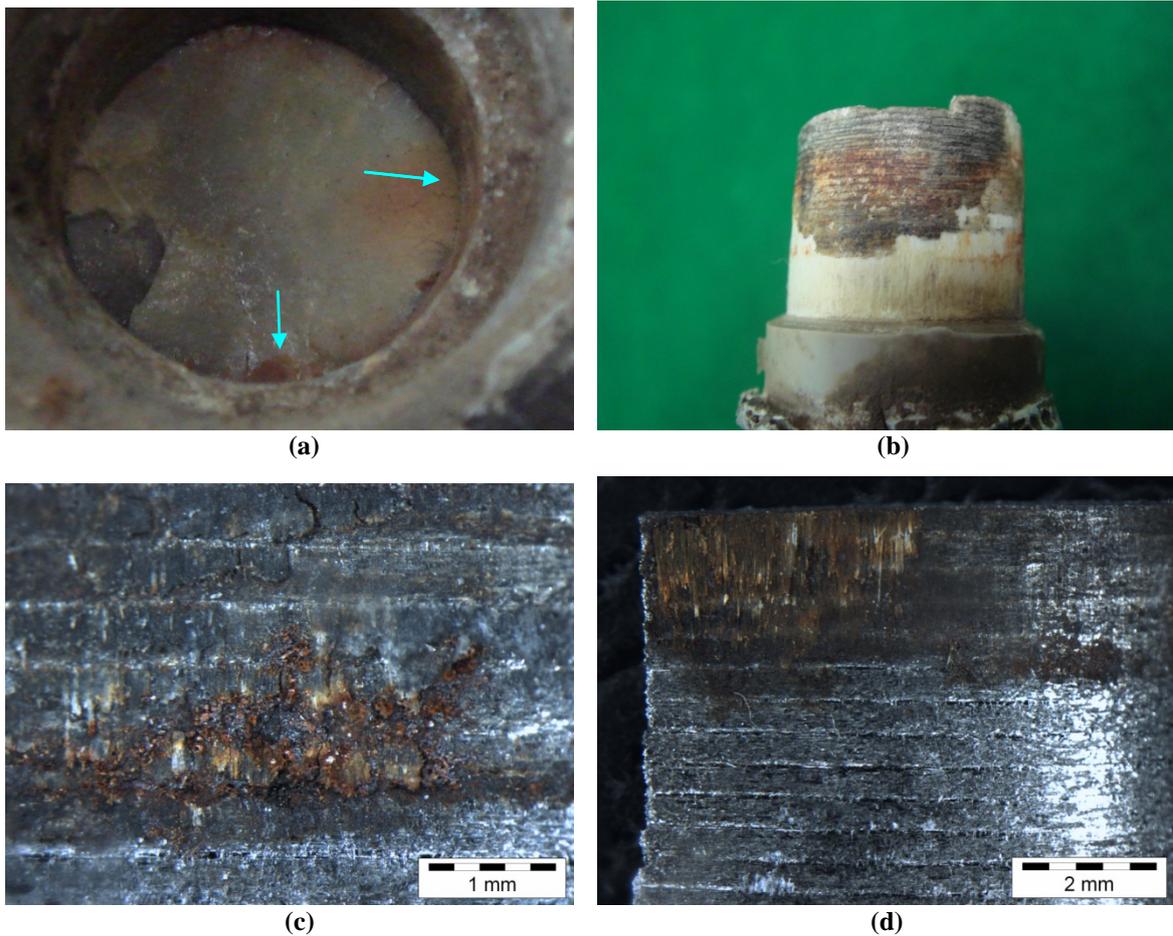


Figura 2: (a) Superfície de fratura plana no interior da terminação inferior (energizada), detalhe da presença de resíduos de corrosão (setas). (b), (c) e (d) Vista lateral do bastão fraturado, apresentando detalhes dos resíduos de corrosão, micro trincas e marcas radiais provocadas pelo processo de fixação do bastão à terminação metálica (acarretadas pela luva interna).



Figura 3: Detalhes construtivos inadequados do isolador polimérico (a) Terminação inferior falhada com desenho côncavo e (b) anel de selagem muito delgado com sinais de deterioração.

3.2 Análise Fratográfica

A análise no microscópio eletrônico de varredura, somada a análise visual e à efetuada com microscópio estéreo corroborou os indícios de ruptura frágil do bastão do isolador polimérico.

A observação da superfície de fratura no microscópio eletrônico de varredura revelou características típicas de falha frágil [2], Figura 4a. A caracterização individual das fibras de vibro revelou a presença de três zonas distintas características do mecanismo de corrosão sob tensão neste material: a) zona espelho ou zona de início de falha, b) zona mista, que compreende a zona de aumento de velocidade de propagação da trinca e c) zona farpada, característica de final de fratura [1,2]. Na Figura 4b podem ser observadas as características relacionadas.

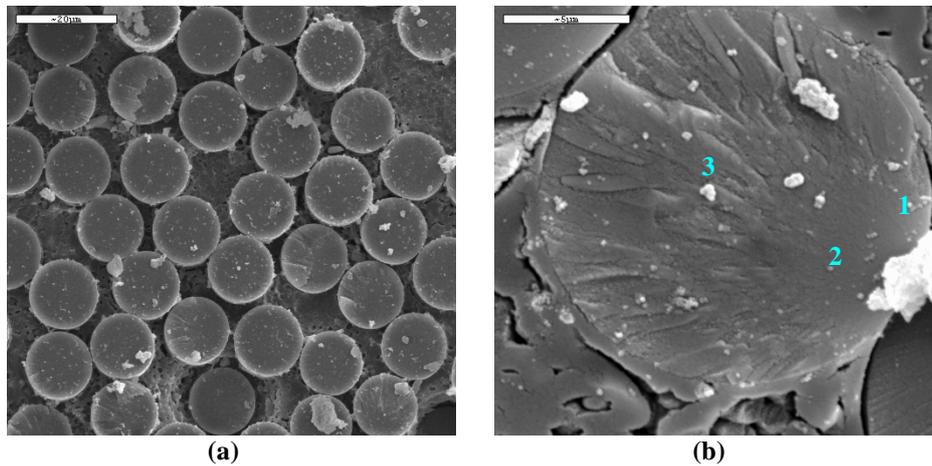


Figura 4: (a) Imagem de elétrons secundários da superfície de fratura do isolador (ampliação: 1000x); (b) Superfície de fratura de uma fibra de vidro contendo as três zonas características de fratura por CST: 1- zona espelho, 2 – zona mista e 3 – zona farpada (ampliação: 5.000x).

3.3 Ensaios Químicos

A Figura 5 apresenta os diagramas gerados nos ensaios de IVTF. A Tabela I apresenta os resultados obtidos em todos os ensaios químicos.

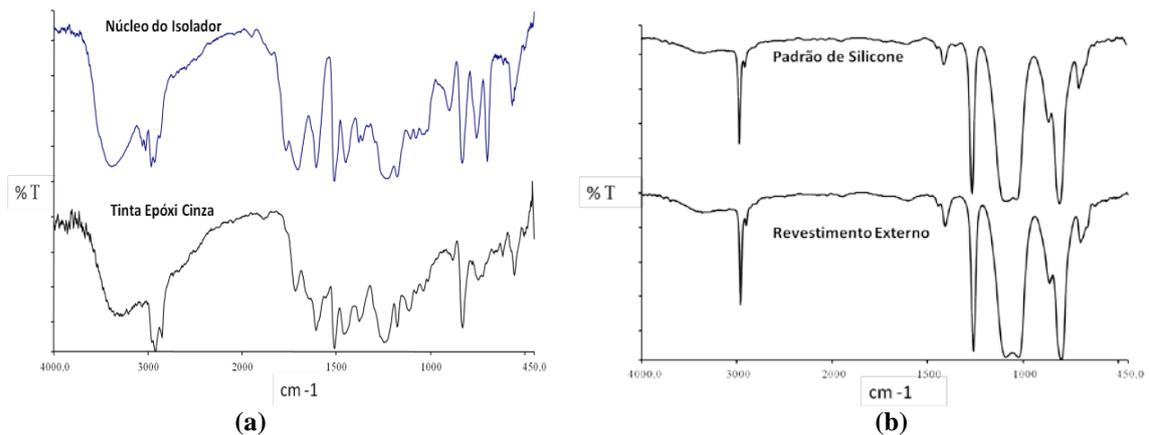


Figura 5: Diagramas IVTF que identificaram como (a) resina epóxi e (b) silicone, um dos constituintes do núcleo composto e do revestimento, respectivamente.

Tabela 1: Resultados dos ensaios químicos executados sobre o isolador polimérico falhado.

Amostra	*pH		Boro(%)	Identificação por IVTF
	Amostra	5,5		
Parte interna do núcleo do isolador	Amostra	5,5	20,9	Apresenta bandas características de epóxi.
	Branco	6,4		
Parte externa do núcleo do isolador				Apresenta bandas características de silicone.

*Branco = água grau analítico tipo II segundo ASTM D 1193.

4 DISCUSSÃO

De acordo com os resultados das análises, o isolador de 138kV, fabricado com um bastão composto de fibras de vidro (E-glass) contendo boro [3] e resina epóxi, falhou de maneira frágil pelo mecanismo de corrosão sob tensão, associado às inadequações de projeto deste, como o desenho côncavo das terminações de aço, que permitem o acúmulo de água e um anel de selagem muito delgado que não protegeu efetivamente o núcleo sem revestimento de silicone da permeação de umidade para o interior da terminação. Além das características inadequadas citadas, o sistema de fixação do bastão à terminação, incorpora uma luva interna denteada que promove a concentração de tensões transversais ao bastão PRV.

A ocorrência de fraturas frágeis em isoladores poliméricos é uma combinação entre um processo de falha mecânica, elétrica e química no qual a corrosão sob tensão se desenvolve nos bastões unidirecionais de resina reforçada por fibras de vidro, responsáveis pela sustentação mecânica dos isoladores, acarretando a sua falência mecânica.

As falhas frágeis por CST são causadas pelo ataque químico das fibras de vidro do bastão, quando os íons não silicosos são expulsos das fibras de vidro e a resina termoestável ao redor é hidrolisada. O mecanismo consiste na difusão de uma solução aquosa através da resina, com a taxa de permeação dependendo do tipo de cátions e ânions presentes na solução. Quando a fibra de vidro é exposta aos íons de hidrogênio ocorre a expulsão dos íons não silicosos, principalmente, boro, cálcio, alumínio e sódio. A susceptibilidade de deslocamento destes íons é determinada pela concentração iônica de hidrogênio e pelo tempo. A Figura 6 exemplifica o mecanismo.

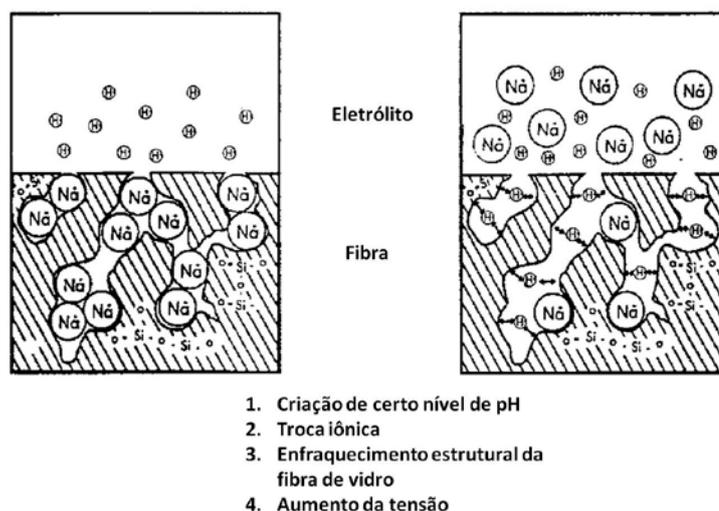


Figura 6: Modelo simplificado da troca iônica por ocasião de ataque ácido à fibra de vidro [4].

Quando o bastão composto é submetido à tensão mecânica e ao ataque químico, a erosão subsequente dá origem a trincas pequenas nas fibras individuais submetidas a maiores tensões de carregamento. O trincamento parcial do bastão irá seccioná-lo transversalmente, Figura 7. O mais alto estado

de tensões sempre ocorrerá na ponta da trinca e esta se desenvolverá continuamente até a existência de uma seção resistente insuficiente para suportar a carga trativa aplicada e ocorrer a ruptura total.

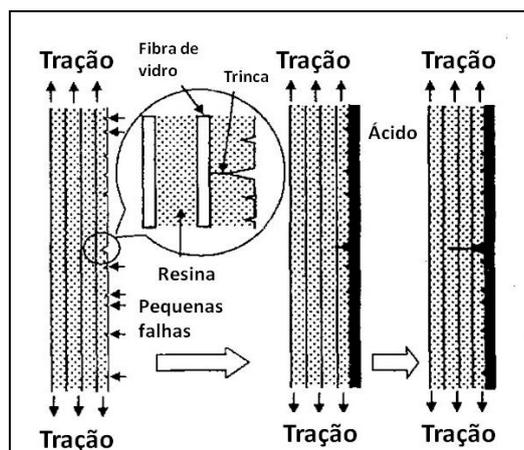


Figura 7: Representação esquemática da propagação da trinca num bastão GRP submetido a um processo de fratura frágil por corrosão sob tensão [5].

O mecanismo que possibilita o processo de substituição dos íons metálicos por íons de hidrogênio pode ter origem de diversas fontes como: chuva ácida, catalisador da resina em contato com a água dando origem a ácido carboxílico [4], penetração de ácido nítrico pela formação de dióxido de nitrogênio pelo efeito corona (equação 1) e posterior reação com a água [1, 6, 7] e até mesmo mecanismos envolvendo apenas a água em reações de hidratação, hidrólise e troca iônica [8, 9].



O mecanismo de formação de ácido nítrico proposto por Kumosa *et al.* [1, 6] e também comprovado por Linang and Dai [7], é o mais aceito, contudo, os demais mecanismos também demonstraram experimentalmente a sua validação.

O trabalho contendo a comprovação da viabilidade do mecanismo de interação do catalisador da resina com a umidade gerando ácido carboxílico por hidrólise, proposto por Tourreil *et al.* do grupo de trabalho B2.03 do CIGRÉ [4] teve participação do CEPTEL através da realização de testes de redução de pH, a partir de diferentes concentrações de catalisadores, empregados nas resinas utilizadas nos isoladores. Estes testes comprovaram a ocorrência de maior formação ácida, relacionada à maior concentração de catalisador. Ensaio semelhantes foram reproduzidos neste trabalho, corroborando os resultados anteriores.

Os testes realizados com o intuito de revelar a presença de boro nas fibras de vidro e a identificação da resina epóxi como constituintes do isolador falhado tiveram por objetivo a caracterização do material composto, frente à susceptibilidade à falha por corrosão sob tensão.

Com relação à resistência à corrosão sob tensão em meio de ácido nítrico, dentre os três tipos de arranjos E-glass/resina empregados nos isoladores, o arranjo envolvendo poliéster modificado é avaliado por Kumosa *et al.* [10] como 10 vezes menos resistente do que aquele contendo resina epóxi (empregado neste isolador falhado) e 200 inferior ao E-glass/resina vinil ester, Figura 8.

A resina vinil ester empregada em conjunto com a fibra ECR-glass é o arranjo composto mais indicado no sentido de maior resistência à corrosão sob tensão. A fibra ECR-glass é caracterizada pela ausência de boro na sua composição. O boro é o menor átomo no vidro e é o mais rapidamente expulso do arranjo cristalino pelo processo de substituição por íons de hidrogênio.

Apesar da discussão sobre os mecanismos propostos para a CST em isoladores poliméricos compostos e da susceptibilidade dos materiais empregados ainda possibilitarem algumas controvérsias, existe um ponto em comum no mecanismo de CST nestes materiais, que é a obrigatoriedade de penetração de água na terminação metálica e o conseqüente contato com o núcleo desprotegido do bastão. Para a água entrar em contato com o bastão, o revestimento de silicone e/ou o selo da terminação tem que falhar na sua função de barrar a umidade. Quando esta condição existe, poderá ocorrer a fratura frágil [2, 11].

Os ensaios realizados permitiram comprovar a penetração de água no núcleo do bastão PRV e identificar, por microscopia eletrônica de varredura, o aspecto de fratura característico de CST. Estes

resultados, somados à conhecida susceptibilidade à falha [9] do material empregado no núcleo composto (E-glass/epóxi), permitiram identificar a causa da fratura do isolador polimérico

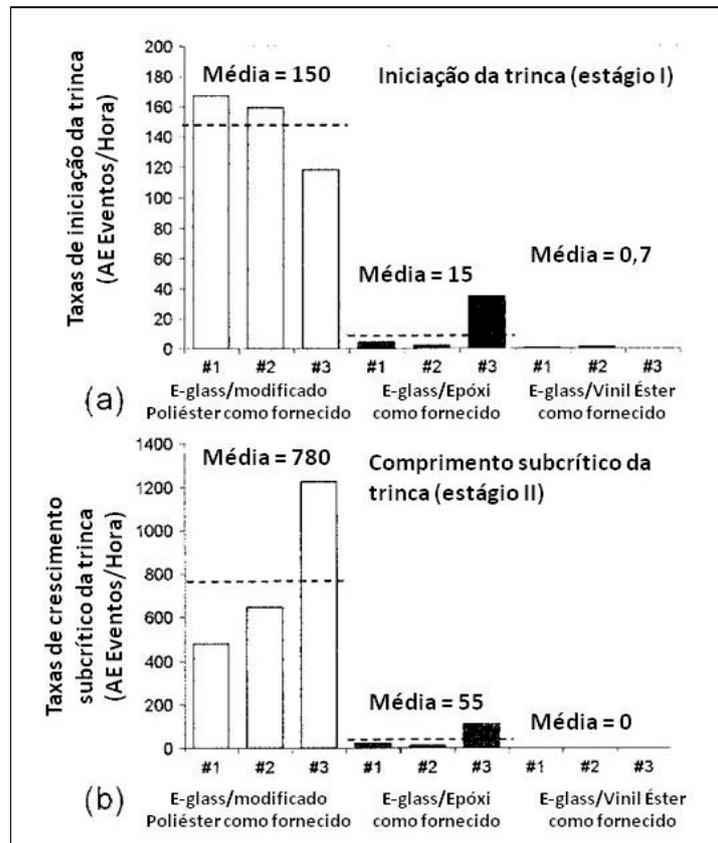


Figura 8: (a) Taxa de iniciação da trinca (estágio I) para compostos E-glass/polímero. (b) Taxa de extensão de trincas subcríticas (estágio II) para compostos E-glass/polímero [9].

5 CONCLUSÕES

O isolador polimérico de 138 kV fraturou de maneira frágil pelo mecanismo de corrosão sob tensão, provocado pela penetração de água na terminação inferior energizada e posterior reação química de substituição dos íons metálicos pelo hidrogênio, o que acarretou o enfraquecimento da estrutura.

O bastão PRV do isolador fraturado é confeccionado com resina epóxi reforçada com fibras de vidro (E-glass) contendo boro. Este material composto é susceptível ao mecanismo de corrosão sob tensão em presença de umidade.

O projeto do isolador em questão o torna susceptível a fraturas frágeis, pelo mecanismo de corrosão sob tensão, em função da selagem deficiente entre o bastão revestido de silicone e a sua porção prensada na terminação interna livre de revestimento, somada a um desenho inadequado da terminação inferior (concavidade voltada para cima), que permite o acúmulo de água. O sistema de fixação do bastão à terminação inferior promove, ainda, a concentração de tensões transversais ao bastão, pela presença de uma luva interna dentada que auxilia o processo de fixação.

A partir dos resultados deste estudo, a concessionária de energia elétrica envolvida promoveu a substituição de todos os isoladores com características semelhantes.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] KUMOSA, M., KUMOSA, L., ARMENTROUT, D., "Failure analyses of nonceramic insulators Part I: Brittle fracture characteristics", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 21, n. 3, pp. 14-27, May/June, 2005.B
- [2] BURNHAM, J.T, BAKER, T., BERNSTORF, A., *et al.*, "IEEE Task Force Report: brittle fracture in nonceramic insulators", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 3, pp. 848-856, July, 2002.

- [3] ANONYMOUS (2005) D578 – 05, *Standard Specification for Glass Fiber Strands*, ASTM - American Society for Testing of Materials.
- [4] TOURREIL, C. on behalf of Working Group B2.03, “Brittle fracture of composite insulators – failure mode chemistry, influence of resin variations and search for a Simple Insulator Core Evaluation Test Method”, *Electra*, n. 215, pp. 17-23, August, 2004.
- [5] KAMO, K., NAKANISHI, T., HAYASHI, Y., *et al* “Reproducing tests of brittle fractures of polymer insulators”, In: *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 395-398, Xi’an, China, June, 2000.
- [6] KUMOSA, M., KUMOSA, L., ARMENTROUT, D., “Failure analyses of nonceramic insulators Part II: The brittle fracture model and failure prevention”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 21, n. 4, pp. 28-41, July/August, 2005.
- [7] DAI, J., LIANG, X., “Analysis of the acid sources of a field brittle fractured composite insulator”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 13, n. 4, pp. 870-876, August, 2006.
- [8] MONTESINOS, J., GORUR, R.S., “An Investigation on the water induced brittle fracture of nonceramic insulators”, In: *Proceedings of 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria, BC*, pp. 365-368, Canadá, October, 2000.
- [9] MONTESINOS, R., GORUR, R.S., MOBASHER, B. *et al* , “Mechanism of brittle fracture in nonceramic insulators”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 9, n. 2, pp. 236-243, April, 2002.
- [10] KUMOSA, S.L., KUMOSA, S.M., ARMENTROUT, L.D., “Resistance to brittle fracture of glass reinforced polymer composites used in composite (nonceramic) insulators”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 4, pp. 2657-2665, October, 2005.
- [11] MELLO, D.R., BALESTRO, A.C., “Cuidados na seleção de isoladores poliméricos – O problema da aderência”, In: *Congresso Latino Americano de Distribuição Elétrica – CLADE 2008*, Mar Del Plata, Argentina, setembro, 2008.