ISSN 1516-392X

ANÁLISE DE FALHA EM ISOLADOR DE VIDRO DE UMA LT DE 345 kV[1]

Maurício Barreto Lisboa[2]
Wagner Ferreira Lima[3]
Heloísa Cunha Furtado[4]
Gerson Vale de Resende[5]
Wendell Porto de Oliveira[6]

Resumo
Foram investigadas as causas da fratura do pino de aço de um isolador de vidro, pertencente a uma cadeia de isoladores de uma linha de transmissão (LT) de 345kV, que provocou a queda de uma das fases da LT. Foram aplicadas técnicas convencionais de análise de falhas, envolvendo: inspeção visual, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, ensaios de microdureza, análise química e difração de raios-X. As análises nos isoladores (novos e fraturado) indicaram que a falha ocorreu por corrosão no pino, em combinação com a ação de esforços trativos sobre a cadeia de isoladores. Foram atribuídos aos efeitos de origem elétrica (efeito-corona, correntes de fuga) como sendo os principais potencializadores do mecanismo de corrosão, que foi agravado pelas características construtivas do isolador.
Palavras-chave: Isolador; Análise de falhas; Corrosão.

FAILURE ANALYSIS OF 345 kV TRANSMISSION LINE GLASS INSULATOR

Abstract
Were investigated the causes of the fracture of a steel pin of a glass insulator, belonging to a chain of insulators of a 345kV transmission line (TL) which caused the downfall of one of the stages of TL. We applied standard techniques of failure analysis involving: visual inspection, optical microscopy, scanning electron microscopy, micro hardness testing, chemical analysis and X-ray diffraction. The analysis in the insulators (new ones and fractured) indicated that failure occurred due to corrosion on the pin, in combination with the traction efforts action on the chain of insulators. Were attributed to the electrical origin effects (corona, leakage currents) as the main boosters of the corrosion mechanism, which was aggravated by the constructive characteristics of the insulator.
Keywords: Insulator; Failure analysis; Corrosion.

[1] *Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.*
[2] *Doutorado, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).*
[3] *Mestrado, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).*
[4] *Doutorado, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).*
[5] *Engenheiro, FURNAS.*
[6] *Doutorado, FURNAS.*

ISSN 1516-392X

1 INTRODUÇÃO

Falhas em componentes empregados na sustentação (e isolamento) de linhas de transmissão de energia elétrica configuram um sério problema pelo efeito de interrupção no fornecimento de energia e suas conseqüências.
Um isolador de suspensão (de vidro) fabricado em 1970, utilizado em uma cadeia de isoladores de uma linha de transmissão de 345 kV falhou em serviço provocando o desligamento da linha.
A fratura do pino do isolador relacionava-se claramente a um mecanismo de corrosão extremamente severa. Os demais isoladores da cadeia não apresentavam corrosão acentuada. Convém ressaltar que estes isoladores foram fabricados no ano de 1976 e apresentavam algumas características construtivas diferentes do isolador fraturado.
A corrosão de pinos e campânulas de isoladores é um assunto muito controverso e grave para todo o setor elétrico mundial. Em sua pesquisa, Domingues et al.[1] afirmam que as correntes de fuga que circulam nos isoladores são compatíveis com os processos de corrosão envolvendo perda de material em pinos de isoladores.
No caso de corrosão atmosférica, suspeita-se, inicialmente, que o principal agente é o meio ambiente. No entanto, muitos casos de corrosão observados em isoladores são verificados em regiões secas e com baixos níveis de contaminação atmosférica. Além disso, a corrosão em questão ocorre nas ferragens dos isoladores enquanto que, freqüentemente, as demais partes das torres de linha de transmissão, que também são de aço galvanizado, não são atacadas na mesma intensidade. Pode-se ainda acrescentar que, em um mesmo isolador, algumas regiões podem ser mais afetadas que outras. Essas observações corroboram a afirmação que, isoladamente, o meio ambiente não é o único responsável pela corrosão em isoladores de linhas de transmissão.
Considerando as condições de funcionamento, três mecanismos de corrosão podem ser considerados os mais atuantes nas partes metálicas de isoladores: corrosão eletrolítica, corrosão por células de concentração e a corrosão por efeito corona.
A corrosão eletrolítica é o caso mais difundido, no qual a corrosão do pino e da campânula é explicada pela passagem de corrente de fuga na cadeia de isoladores, nos quais são formadas células eletrolíticas. Nessas células, tanto a campânula quanto o pino podem funcionar como o anodo, se corroendo em função da corrente que passa.
Em seu trabalho, Meloni, Andreolli e Kobayashi[2] estudaram a corrosão nas partes metálicas de isoladores de vidro com dois tipos de campânulas diferentes: tipo sino e tipo reto. O autor verificou que as grandes correntes de fuga e as descargas de maior intensidade, juntamente com a umidade atmosférica, aceleravam os processos de corrosão nos isoladores.
No caso da corrosão por células de concentração diferencial. Uma parte do pino do isolador está parcialmente imersa no cimento, e a outra parte está exposta à atmosfera. Quando se forma uma camada de eletrólito na superfície externa, devido à chuva ou à umidade, é formada uma célula de concentração.
O terceiro agente está baseado, justamente, na questão da corrosão aparecer, preferencialmente, nos isoladores sujeitos a maior concentração de campo elétrico. Nesta hipótese, supõe-se que a ocorrência de efeito corona em locais específicos dos isoladores causaria uma corrosão localizada. O efeito corona ioniza o ar em torno do pino e da campânula, provocando a instabilidade dos gases nessas regiões. Os elétrons próximos ao pino e à campânula geram uma diferença de

ISSN 1516-392X

potencial na região que, juntamente com a variação do pH do meio, provoca a corrosão eletroquímica dos metais. A presença de água, proveniente do ar, contribuiria para o surgimento da corrosão no metal.[3-6]

2 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia de análise de falha envolveu ensaios laboratoriais nos pinos dos isoladores e consistiram na realização de: inspeção visual, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e dispersão de energia de raios-X para análise da superfície de fratura e da composição química semiquantitativa da seção transversal, ensaios de microdureza em diferentes regiões da seção transversal de forma a estimar a resistência mecânica dos componentes, análise química dos elementos carbono e enxofre e difração de raios-X para análise dos produtos de corrosão.
Foram analisados três isoladores:

- isolador com pino fraturado;
- isolador retirado de operação intacto; e
- isolador novo.

3 RESULTADOS

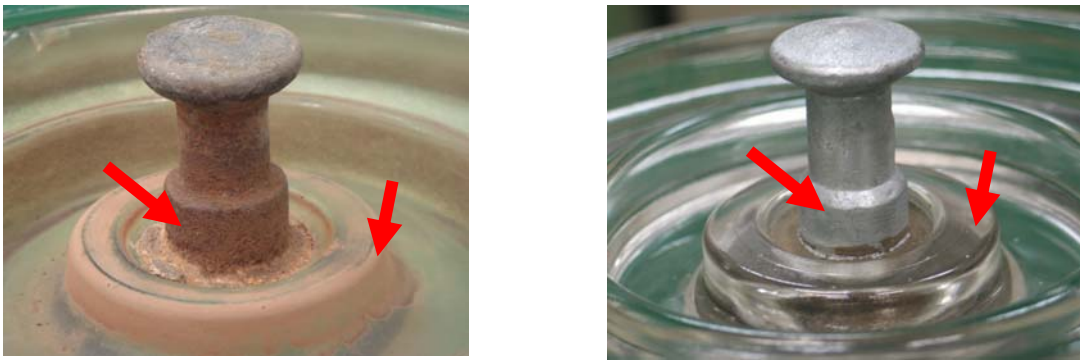
A Figura 1a apresenta a vista geral da seção do pino fraturado ainda fixado ao isolador. Pode ser observada uma pequena seção de aço em meio a produtos de corrosão. Na outra seção do pino, observado na Figura 1b, observa-se claramente uma redução progressiva da seção resistente. Na Figura 1a observa-se ainda a ausência de um anel de vidro ao redor do pino, semelhante ao identificado nos demais isoladores analisados bem como a ausência de características do chamado chamado “pino grávido*”, conforme identificados na Figura 1c para o isolador retirado de operação intacto.
O isolador novo (Figura 1d), apresentou características semelhantes às do isolador retirado de operação intacto, caracterizadas pela presença do anel de vidro e do pino grávido.

(a)

(b)

* Nome dado aos pinos com espessamento no corpo, empregados nos isoladores anti-corona.

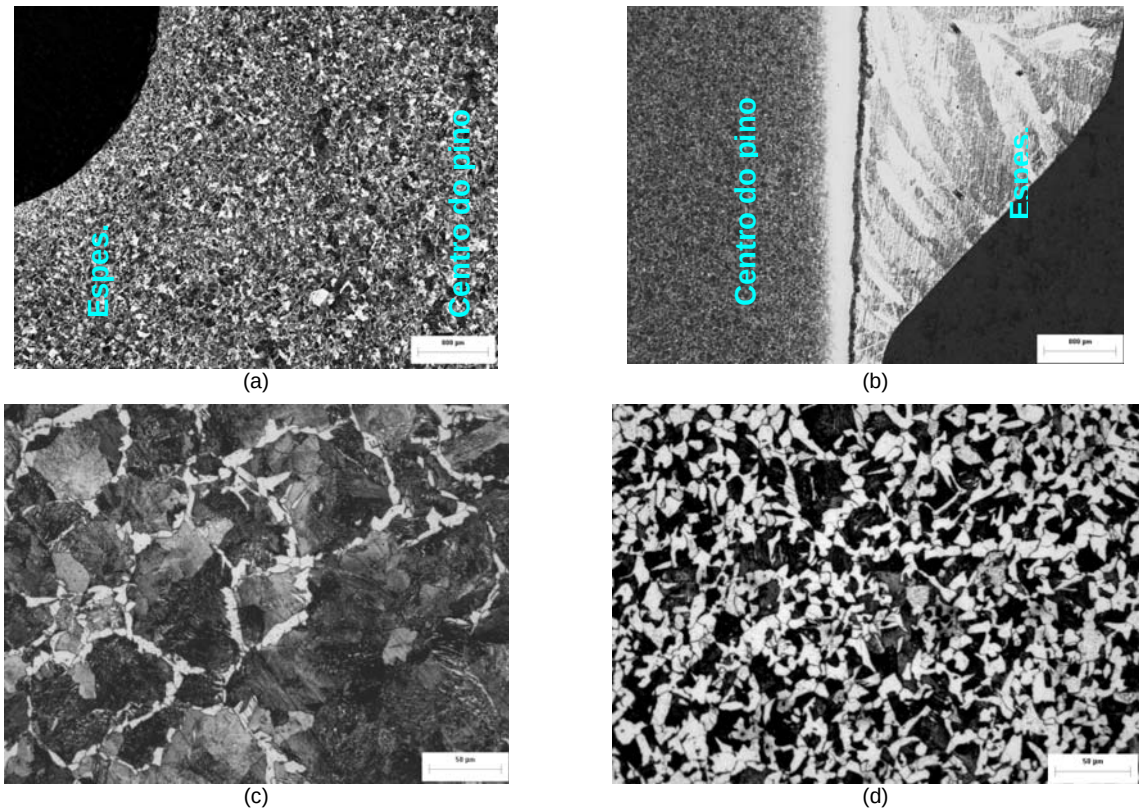
ISSN 1516-392X



(c) (d)

Figura 1. Isolador com o pino fraturado: (a) região de fratura em que não se observa o anel de vidro envolvendo a região do pino; (b) outra seção do pino fraturado; (c) isolador retirado de operação intacto, detalhes do anel de vidro e do pino grávido; (d) isolador novo, características semelhantes às do isolador intacto.

As análises metalográficas dos pinos dos isoladores novo e retirado de operação intacto revelaram que o corpo dos pinos era composto por uma microestrutura de ferrita e perlita, em que a ferrita envolve os grãos de perlita em uma estrutura típica de ferrita-proeutetóide. Entretanto a região de espessamento do corpo apresentou uma microestrutura semelhante a do corpo para o isolador retirado de operação e uma microestrutura de liga de zinco para o isolador novo, conforme corroborado pela análise por EDS. O pino fraturado apresentou uma microestrutura de ferrita e perlita, porém com menor quantidade de perlita e menor tamanho de grão na comparação com as demais, Figura 2.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 2. Imagens de microscopia ótica: (a) isolador intacto, com aspecto microestrutural semelhante nas regiões central e de espessamento; (b) isolador novo, com diferentes microestruturas, ampliação 25x; (c) ferrita proeutetóide e perlita, verificada nos isoladores intacto e novo e (d) ferrita e perlita com menor tamanho de grão observada no isolador fraturado.

ISSN 1516-392X

A Tabela 1 apresenta os valores de microdureza Vickers obtidos nas amostras do pino fraturado e nas amostras dos pinos dos isoladores novo e retirado de operação intacto, tendo por objetivo a comparação entre os valores medidos nas regiões central e de espessamento*. Como pode ser verificado, não há diferença significativa entre as duas regiões do pino do isolador retirado de operação intacto. Entretanto, para o pino do isolador novo, observa-se uma diferença considerável entre essas regiões, claramente decorrente das diferenças entre os materiais, aço C e zinco.
A comparação entre as microdurezas da região central dos pinos revelou-se condizente com o menor teor de perlita verificado para o pino fraturado.

Tabela 1. Valores de microdureza Vickers das amostras dos pinos dos isoladores

Amostra	Região	Valor médio (HV)	Desvio padrão (HV)	Valor mínimo (HV)	Valor máximo (HV)	Tensão limite de resistência à ruptura - σ_R (MPa)
Isolador com o pino fraturado	Central	201,2	6,4	187,3	209,3	657
Isolador novo	Central	236,2	13,8	211,7	256,5	740
	Espess. (Zn)	42,3*	3,3	40,1	45,5	*
Isolador retirado de operação intacto	Central	243,7	20,4	221,7	276,4	772
	Espess. (Aço C)	234,5	16,6	209,3	267,9	738

** O valor de 42,3 HV é inferior ao limite mínimo observado nas tabelas de conversão para σ_R.*

A observação no MEV/EDS da superfície de fratura do pino fraturado do isolador falhado em serviço revelou um aspecto de fratura dúctil, caracterizada pela presença de dimples e ausência de sinais de fragilização. As análises de EDS neste e nos demais pinos corroboraram tratarem-se de aços ao carbono sem elementos de liga e revelaram que o material presente no espessamento do isolador novo era uma liga de zinco.
A partir dos resultados da análise por EDS, foram efetuadas análises químicas para determinação dos elementos carbono e enxofre nas amostras das regiões centrais dos pinos dos isoladores: intacto, novo e fraturado. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2. Resultados da análise química quantitativa da região central dos pinos dos isoladores

Amostra	Elemento	
	C(%)	S(%)
Isolador retirado de operação intacto	0,48	0,043
Isolador novo	0,47	0,008
Isolador com o pino fraturado	0,39	0,038

Foi realizada a análise dos produtos de corrosão do isolador fraturado. O resultado é apresentado na Figura 3, no qual foi identificado apenas o composto de hidróxido de ferro denominado Goetita (FeOOH), comumente observado em aços carbono sujeitos à corrosão atmosférica.(7)

* No pino fraturado em serviço não é possível a identificação de um espessamento característico.

ISSN 1516-392X

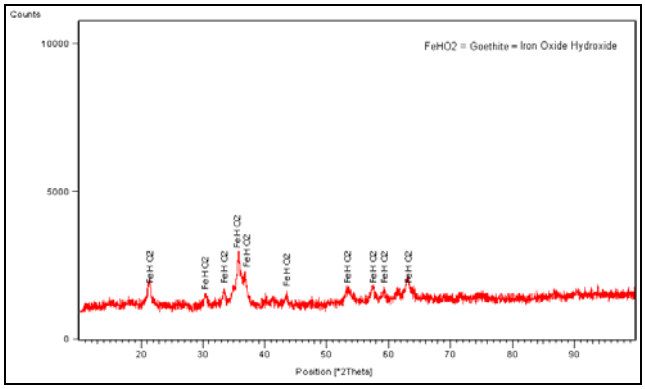


Figura 3. Espectro de difração de raios-X do produto de corrosão do pino fraturado.

4 DISCUSSÃO

Dentre todos os efeitos elétricos e atmosféricos potencializadores do fenômeno da corrosão, Domingues et al.[1] e Meloni, Andreolli e Kobayashi[2] afirmam que o efeito corona é o principal mecanismo causador da corrosão em isoladores de disco.

Apesar das observações anteriores indicarem que os isoladores próximos aos condutores são os mais afetados por corrosão provocada pelo efeito corona, verificou-se que o isolador analisado era o sétimo na cadeia. Contudo, conforme os resultados dos ensaios, não foram identificadas evidências de que o isolador fraturado fosse do tipo anti-corona (pino grávido e anel de vidro), ao contrário dos demais isoladores analisados, pertencentes à mesma cadeia, o que explicaria a sua maior susceptibilidade ao fenômeno, na comparação com os demais.

A caracterização microestrutural e mecânica do corpo dos pinos dos isoladores, além das análises químicas e do produto de corrosão não apresentaram indícios de que as diferenças observadas entre os isoladores, com exceção da luva anti-corrosão (ou anti-corona de aço ou de zinco) e do anel de vidro possam ter contribuído para a falha observada.

O menor teor de carbono presente no aço do pino fraturado é o responsável pela menor quantidade de perlita observada e contribui para a redução da resistência mecânica, confirmada pelos menores valores de microdureza. O maior teor de enxofre tende a gerar um maior número de inclusões, que tornam o aço mais susceptível a fragilização. Porém, os valores observados encontram-se dentro do especificado para aços empregados em aplicações semelhantes.

A presença de goetita como produto de corrosão, revelada na difração de raios-X, é esperada para aços carbono sujeitos a corrosão atmosférica e não permite uma relação direta com o mecanismo de corrosão.

É importante ressaltar, também, que a amostra identificada como isolador novo foi a única que apresentou uma luva de zinco integrada ao seu pino, conforme verificado na análise metalúrgica (microscopia ótica e MEV + EDS) e nos ensaios de microdureza Vickers. As demais amostras, que possuíam o “pino grávido”, apresentaram somente um aumento na seção transversal na região próxima ao cimento do isolador.

Considerando que os isoladores analisados foram montados e entraram em atividade no mesmo momento, verifica-se que os isoladores com “pino grávido” e com o “anel de vidro” (logo, do tipo anti-corona) apresentaram maior resistência à corrosão do que o isolador sem esses artefatos. Em seu catálogo, a empresa PPC Santana (antiga Isoladores Santana)[8] afirma que fornece isoladores com proteção

ISSN 1516-392X

anti-corrosão, os quais apresentam uma luva de zinco fundida e integrada ao pino do isolador, funcionando como um anodo de sacrifício, Figura 4. A empresa afirma também que, além de aumentar a resistência à corrosão, essa luva reduz os efeitos de corona e diminui a exposição do cimento ao intemperismo.

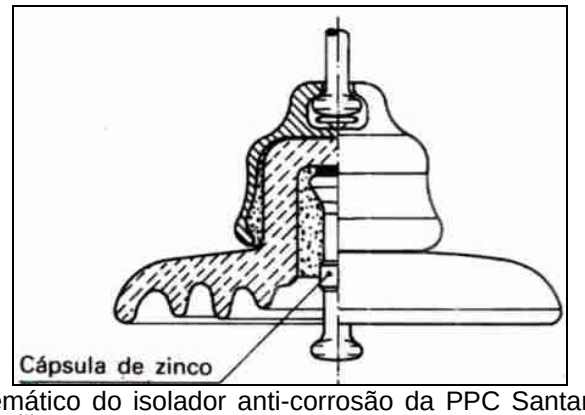


Figura 4. Desenho esquemático do isolador anti-corrosão da PPC Santana, destacando a luva de zinco (ou cápsula de zinco).[8]

As análises das amostras dos isoladores, somadas à revisão bibliográfica realizada sobre o tema, indicaram que a corrosão no isolador com pino fraturado, foi potencializada por efeitos de origem elétrica, os quais podem ser relacionados aos mecanismos de corrosão por efeito corona e correntes de fuga.

5 CONCLUSÕES

As análises no isolador com o pino fraturado indicaram que a falha ocorreu por corrosão no pino, em combinação com a ação de esforços trativos sobre a cadeia de isoladores. São atribuídos efeitos de origem elétrica (efeito-corona, correntes de fuga) como os principais potencializadores do mecanismo de corrosão.

O isolador com pino fraturado, fabricado em 1970, possuía características diferentes dos demais enviados (ausência de um anel de vidro ao redor do pino, que aparentemente não era do tipo grávido). Considerando-se que os isoladores foram montados no mesmo momento na cadeia, as observações acima estão diretamente relacionadas à menor resistência à corrosão do isolador fraturado na comparação com os demais (que são do tipo anti-corona).

O pino do isolador novo possui um reforço de zinco (luva de zinco) na região próxima ao cimento. Nos demais isoladores, apesar do aumento na seção transversal nessa região, as análises indicaram que eles não possuíam essa luva, a qual é mais efetiva no aumento da resistência à corrosão. Além do reforço da luva de zinco (corrosão) o isolador novo é confeccionado com um aço com maior grau de pureza, o que minimiza um possível efeito de fragilização mecânica (não identificada nesta ocorrência), pela presença de inclusões lineares associadas ao maior teor de enxofre dos isoladores antigos.

A goetita identificada como produto de corrosão do pino fraturado, não permite a correlação com nenhum mecanismo potencializador do processo corrosivo, por ser um hidróxido comumente encontrado em aços ao carbono submetidos à corrosão atmosférica.

ISSN 1516-392X

REFERÊNCIAS

1 DOMINGUES, L.A.M.C. et al. “Identificação de Pontos de Formação de Corona em Isoladores de Suspensão. Análise Teórico-Experimental.” XIV SNPTEE. Belém/PA, Brasil. 1997.
2 MELONI, A.E.M.; ANDREOLLI, M.C.; KOBAYASHI, M.K. “Corrosão por Corona em Isoladores de Disco de Vidro Temperado”, preprint.
3 Relatório do CEPEL número 631/96 - DPP/TEQ. “Isoladores para Linhas de Transmissão – Consolidação da Etapa I”.
4 Relatório do CEPEL número 2018/80. “Efeito Corona nos Isoladores de Vidro em Linhas de 500 kV”.
5 Relatório do CEPEL número 790/81. “Descargas Corona e suas Conseqüências”.
6 Relatório do CEPEL número 2389/80. “Análise dos Efeitos Corona em Linhas de Transmissão de 750 kV e 1000 kV”.
7 ANTUNES, R.A., COSTA, I., FARIA, D.L.A, “Characterization of corrosion products formed on steels in the first months of atmospheric exposure”, Materials Research, v.6 n.3, São Carlos April/June 2003.
8 Catálogo da empresa PPC Santana. “Isoladores de Suspensão e Descarregadores de Chifres”.