



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GSE/22
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTO DE ALTA TENSÃO - GSE

EFEITOS DOS PRODUTOS FERROSOS DE CORROSÃO NO DESEMPENHO DO ISOLAMENTO ELÉTRICO DE COLUNAS DE PORCELANA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**Márcio Antônio Sens
UFF – UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**

RESUMO

Colunas de isoladores de porcelana, utilizadas em subestações do sistema de transmissão de energia elétrica, em suportes de barramentos de alta tensão e para-raios, frequentemente são manchadas por produtos de corrosão das terminações, em aço galvanizado. Tais manchas, na cor da ferrugem, frequentemente são apontadas como danosas ao isolamento elétrico e até lhes são atribuídas algumas causas de catastróficas falhas no Sistema Elétrico Nacional. Comprovou-se, entretanto, que tais manchas, provocadas pela corrosão das ferragens, apenas prejudicam a estética das colunas de porcelana e não alteram o comportamento dielétrico das mesmas. As manchas podem ser facilmente removidas, com esponja e água.

PALAVRAS-CHAVE

Segurança; ferrugem; corrosão; manutenção; isolamento.

1.0 - INTRODUÇÃO

O problema que será abordado no presente Informe Técnico refere-se ao envelhecimento de sistemas de isolamento elétricos de equipamentos de subestações por colunas de porcelana por ação da corrosão atmosférica.

Muito pouco se conhece ou se divulga no Setor Elétrico, sobre o comportamento de colunas de isoladores contaminados por produtos de corrosão das ferragens eletromecânicas. Erros técnicos têm sido cometidos por equipes técnicas ligadas às entidades de fiscalização, pelo desconhecimento e por falta de estudos e investigações experimentais neste campo^{[1],[2]}. Apenas em um relatório da ANEEL^[2] aparecem 53 citações à palavra “ferrugem” e mais 15 vezes à palavra “corrosão”. Em muitas destas citações a ferrugem e a corrosão estão associadas ao objeto isolador. Cabe esclarecer sobre a condutividade elétrica da ferrugem seca e úmida.

Os resultados aqui apresentados são inéditos e não se tem conhecimento de similaridades. O trabalho foi executado experimentalmente, partindo-se de hipóteses levantadas por entidades de fiscalização^[2] para justificar ocorrências e sinistros que resultaram em queda de sistemas de transmissão de energia elétrica e um objeto, em tamanho real, de 750 kV foi disponibilizado pela concessionária para os estudos sobre a suportabilidade dielétrica do equipamento já envelhecido e marcado pelos produtos da corrosão. A investigação, cujos resultados são apresentados parcialmente neste Informe Técnico, foi motivada, principalmente, pela ocorrência do dia 10 de novembro de 2009, com início às 22h13min, que acarretou o desligamento do Sistema Interligado Nacional – SIN, com a interrupção de 24.436 MW, atingindo dezoito estados, conforme Relatório da ANEEL^{[2],[3]}.

Muitos documentos têm sido publicados levantando suspeitas ou afirmando que alguns desligamentos de importantes linhas de transmissão do Setor Elétrico Nacional foram causados por descargas atmosféricas que teriam encontrado facilidades para condução superficial em colunas de porcelana manchadas por produtos de corrosão do aço das ferragens eletrotécnicas. Entre estas ferragens, destacam-se aquelas das extremidades de

segmentos tubulares de porcelana utilizados para transformadores de instrumentos, colunas pedestais de suporte de barramentos condutores e de para-raios de estações.

Por estes motivos, entidades de controle e fiscalização do Setor Elétrico têm advertido e até multado^[4] concessionárias transmissoras de energia elétrica pela negligência na manutenção, pois mesmo sendo notificados dos riscos mantiveram por longas datas os isoladores “contaminados” superficialmente pelos produtos de corrosão do aço. Colunas de cor branca foram flagradas quase que totalmente amarronzadas, “evidenciando” a falta de cuidados e o relaxamento das equipes de manutenção.

Este trabalho mostrará o comportamento dielétrico de superfícies de colunas de isoladores destinadas a para-raios quando cobertas por óxido de ferro em comparação com a mesma superfície limpa, procurando identificar e orientar o Setor para os verdadeiros riscos decorrentes de tais manchas. Amostras de porcelana e os produtos da corrosão foram retirados de isoladores e analisados em laboratório, para determinação das características dielétricas sob condições secas e molhadas, como estariam em caso de operação sob chuvas. Os resultados experimentais serão mostrados no presente artigo.

Os bons resultados deste Informe Técnico serão alcançados pela divulgação dos resultados experimentais ao Setor, que se constitui de suma importância para todo o Setor Elétrico, principalmente para orientação em investigações sobre causas de falhas e de desligamentos de sistemas de transmissão. O desconhecimento destes resultados, por outro lado, levarão, como de fato têm levado, ao levantamento de hipóteses cujas evidências comprobatórias sempre foram constituídas por palpites e suposições, levando a condução das investigações por caminhos que desviam dos objetivos principais e de avaliações de outras hipóteses para justificar as causas reais das falhas e quedas de energia no sistema de transmissão.

Certamente que a aplicabilidade dos resultados que serão mostrados no informe destina-se às equipes de manutenção das concessionárias de energia elétrica, onde existam subestações, assim como às equipes de estudos e análises de sinistros para justificativas de ocorrências junto aos órgãos regulamentadores. Esforços e recursos gastos em manutenção e em análises poderão ser otimizados e bastante reduzidos se forem considerados os resultados que serão apresentados pelo presente Informe Técnico.

Os principais resultados do Informe Técnico mostrarão que se podem economizar muitos recursos em equipamentos tipo para-raios ou colunas de isolamento em porcelana, pela adoção de técnicas de limpeza das porcelanas, sem comprometer o isolamento, ou deixá-las como estão, convivendo com o aspecto esteticamente irregular.

Espera-se que o Informe Técnico eleve a compreensão das equipes de manutenção e de fiscalização atual sobre esse tipo de problema, eminentemente de estética nas subestações de grande porte. Ou seja, todos têm a lucrar com a divulgação dos conhecimentos científicos do presente Informe Técnico.

2.0 - OBJETOS ENSAIADOS

Foram avaliadas as superfícies de dois invólucros de porcelana de para-raios. Um deles localizado no pátio externo do Laboratório do CEPEL em Adrianópolis, município de Nova Iguaçu – RJ, recebido há mais de três anos e submetido a vários ensaios dielétricos, estando com o flange do terminal superior solto, tendo sido cortado para remoção do mesmo e soldado, aqui denominado de amostra externa, mostrada na **Figura 1**.

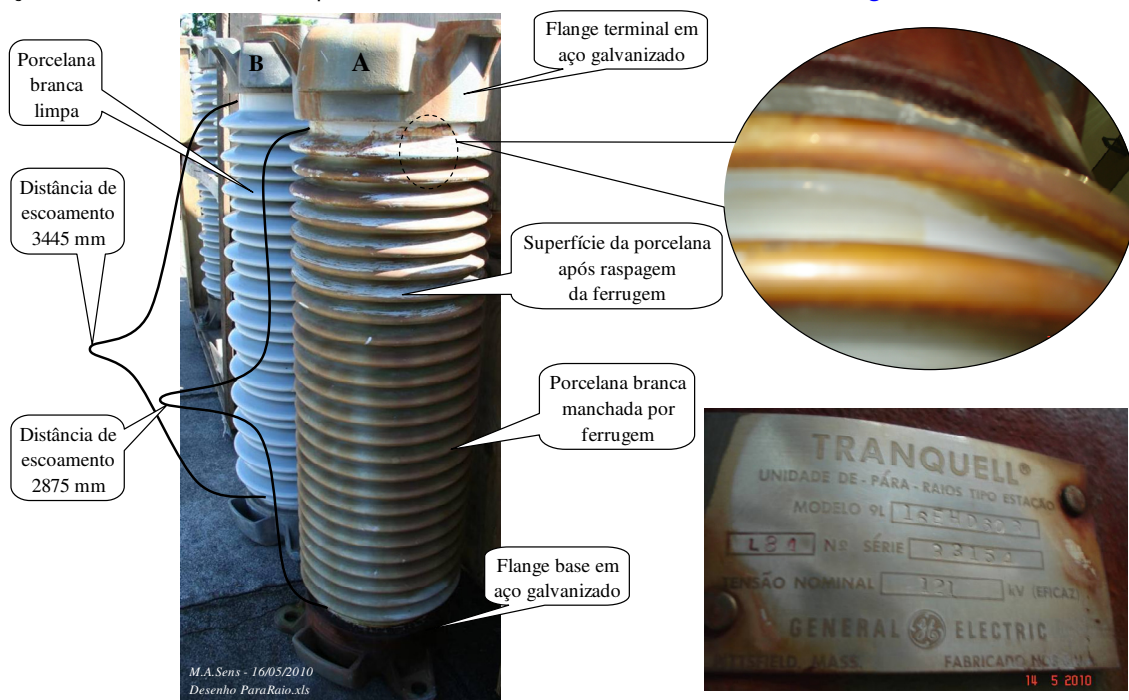


Figura 1 – Corpo de Porcelana com Ferrugem Superficial – Amostra Externa

O segundo invólucro estava no interior do Laboratório de Poluição do CEPEL, em Adrianópolis, constituindo a base de um conjunto de cinco módulos, aqui denominada de amostra Interna. Ambos os invólucros de porcelana pertenciam a para-raios tipo Tranquell, de fabricação General Electric – USA, para a tensão nominal de 121 kV.

A altura dos invólucros, ou distâncias de arco, era de 1240 mm e a distância de escoamento de 2875 mm. O diâmetro do corpo de porcelana era de 356 mm e as 25 saias tinham diâmetros iguais de 442 mm. A **Figura 2** mostra o corpo e uma saia enferrujada da amostra externa avaliada.



Corpo do invólucro de porcelana



Ferrugem na parte inferior da saia de porcelana

Figura 2 – Amostra Externa de Invólucro de Porcelana

Os para-raios Tranquell são destinados para proteger os transformadores e outros equipamentos de subestações contra sobretensões provenientes de descargas atmosféricas ou de comutação. Os objetos avaliados operavam numa linha de 765 kV de Furnas Centrais Elétricas S/A. A **Figura 3** ilustra o tamanho da unidade completa de para-raios contendo cinco módulos em série, nem todos de mesmo comprimento, e nem todos com a citada ferrugem sob análise. A amostra interna é constituída pelo primeiro módulo, ou módulo de base deste para-raios.



Para-raios montado em cinco módulos



Primeiro módulo ou de base

Figura 3 – Amostra Interna de Invólucro de Porcelana

3.0 - ENSAIOS REALIZADOS

As porcelanas dos invólucros dos para-raios foram avaliadas sob quatro condições distintas. Nas formas como encontradas - com a ferrugem superficial, secas e molhadas por pulverizador com água destilada de 0,35 mS/m de condutividade elétrica. As mesmas superfícies foram limpas com água e esponja de fibra sintética e enxugadas com papel toalha. Após a limpeza, as superfícies foram novamente avaliadas quanto à resistividade elétrica superficial.

3.1 Resistência elétrica superficial da porcelana com ferrugem a seco

Foram medidas as resistências elétricas superficiais das porcelanas com ferrugem, em corrente contínua de 1000 V, entre dois eletrodos de alumínio de 20 mm de comprimento e distanciados de 20 mm, sob condições seca e ao sol. A [Figura 4](#) mostra o resultado para a amostra externa, enquanto a [Figura 5](#) mostra os mesmos resultados para a amostra Interna, incluindo o instrumento utilizado nas medições.



Superfície enferrujada e seca



Leitura da resistência superficial = 4 GΩ

Figura 4 – Análise da Amostra Externa Enferrujada a Seco



Superfície enferrujada e seca

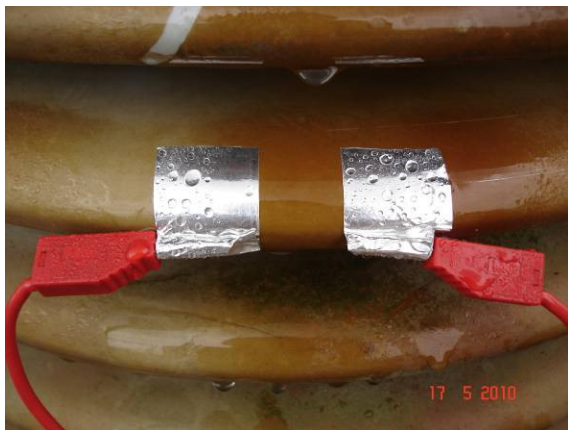


Leitura da resistência superficial = 0,8 GΩ

Figura 5 – Análise da Amostra Interna Enferrujada a Seco

3.2 Resistência elétrica superficial da porcelana com ferrugem molhada

Foram medidas as resistências elétricas superficiais das porcelanas com ferrugem e molhada, em corrente contínua de 500 V, entre dois eletrodos de alumínio de 20 mm de comprimento e distanciados de 20 mm. A superfície foi molhada por pulverizador com água destilada de 0,35 mS/m de condutividade elétrica. A [Figura 6](#) mostra os resultados para a amostra externa e a [Figura 7](#) para a amostra Interna, ambas enferrujadas e molhadas.



Superfície enferrujada e molhada



Leitura da resistência superficial = 2 MΩ

Figura 6 – Análise da Amostra Externa Enferrujada Molhada



Superfície enferrujada e molhada



Leitura da resistência superficial = 2 MΩ

Figura 7 – Análise da Amostra Interna Enferrujada Molhada

3.3 Resistência elétrica superficial da porcelana limpa a seca

Foram medidas as resistências elétricas superficiais da porcelana limpa, em corrente contínua de 1000 V, entre dois eletrodos de alumínio de 20 mm de comprimento e distanciados de 20 mm, sob condições seca e ao sol. A **Figura 8** mostra a amostra externa com uma saia limpa.



Detalhe da fibra sintética utilizada para a limpeza



Uma saia do invólucro limpa

Figura 8 – Amostra Externa após Limpeza

A **Figura 9** mostra resistência elétrica superficial resultante para a amostra externa limpa e seca, enquanto a **Figura 10** mostra os mesmos resultados para a amostra Interna.



Superfície limpa e seca



Leitura da resistência superficial = 7 GΩ

Figura 9 – Análise da Amostra Externa Limpa Seca



Superfície limpa e seca



Leitura da resistência superficial = 10 GΩ

Figura 10 – Análise da Amostra Interna Limpa Seca

3.4 Resistência elétrica superficial da porcelana limpa molhada

Foram medidas as resistências elétricas superficiais das porcelanas limpas e molhadas, em corrente contínua de 500 V, entre dois eletrodos de alumínio de 20 mm de comprimento e distanciados de 20 mm. A superfície foi molhada por pulverizador com água destilada de 0,35 mS/m de condutividade elétrica. A **Figura 11** mostra a resistência elétrica da porcelana limpa e molhada para a amostra externa, enquanto a **Figura 12** mostra o mesmo resultado para a amostra Interna.



Superfície limpa e molhada



Leitura da resistência superficial = 1 MΩ

Figura 11 – Análise da Amostra Externa Limpa Molhada

A **Tabela 1** mostra os resultados da resistência de isolamento elétrico superficial da porcelana com óxido de ferro.



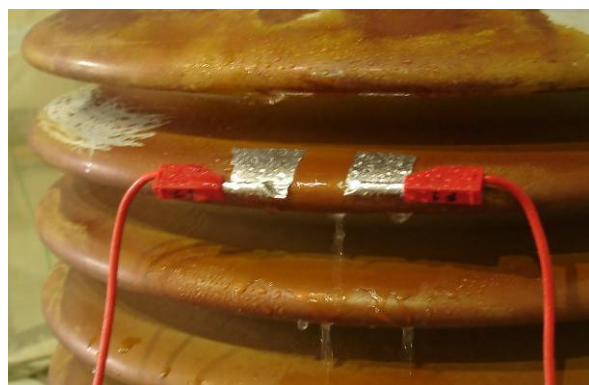
Superfície limpa e molhada



Leitura da resistência superficial = 15 MΩ

Figura 12 – Análise da Amostra Interna Limpa Molhada**Tabela 1 – Resistência Elétrica Superficial da Porcelana dos Invólucros de Para-raios**

| AMOSTRA AVALIADA | Porcelana com ferrugem | | Porcelana limpa | |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Seca | Molhada | Seca | Molhada |
| Externa – ao sol | 4 GΩ Figura 4 | 2 MΩ Figura 6 | 7 GΩ Figura 9 | 1 MΩ Figura 11 |
| Interna – em laboratório | 0,8 GΩ Figura 5 | 2 MΩ Figura 7 | 10 GΩ Figura 10 | 15 MΩ Figura 12 |



Com ferrugem e molhada

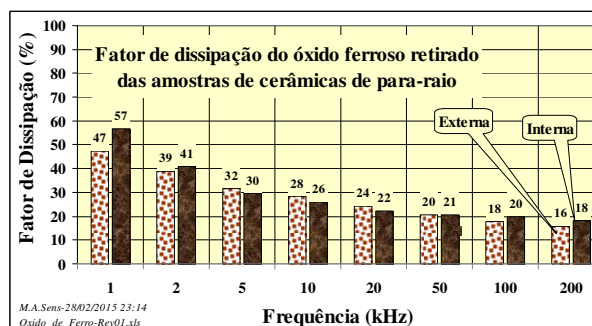
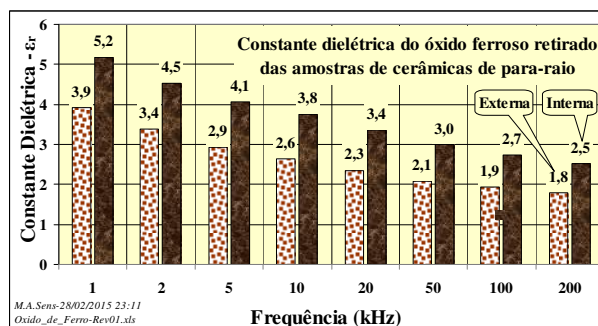


Limpa e molhada

Figura 13 - Amostra Interna de Invólucro nos Ensaios de Resistência Elétrica Superficial

3.5 Constante Dielétrica e Fator de Dissipação

Amostras do pó de óxido ferroso aderido nas superfícies dos isoladores foram raspadas com lâmina de aço e compactadas para a determinação da constante dielétrica e do fator de dissipação entre placas paralelas de célula própria – HP-Japão. Os resultados são mostrados na **Figura 14**.

**Figura 14 – Constante Dielétrica e Fator de Dissipação do Óxido Ferroso**

4.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Pelos resultados encontrados, observou-se que a porcelana dos invólucros com ferrugem molhada, de ambas as amostras, resultaram de resistências elétricas superficiais equivalentes. Observou-se melhor molhamento das superfícies quando cobertas pela ferrugem comparada com a mesma superfície limpa. A camada de ferrugem superficial mostrou-se de maior resistência elétrica quando ao sol. Comparando-se o comportamento das superfícies molhadas enferrujadas e limpas, observou-se queda de 50% em uma das amostras e elevação de sete vezes em outra. Esta diferença justifica-se pelas distintas formas de molhamento superficial, como mostrado na **Figura 7** e **Figura 12**. A **Figura 13** mostra a distinta forma de molhamento. A constante dielétrica do óxido ferroso se assemelha em muito ao da própria cerâmica da coluna de porcelana, (6 a 8), conforme literatura^[5], considerando que a amostra era em pó compactado e, portando, a superfície “enferrujada” não tem efeitos significativo na alteração do campo elétrico, em comparação com a superfície limpa do isolador.

5.0 - CONCLUSÕES

Conclui-se, pelos resultados, que a ferrugem superficial da porcelana, oriunda da corrosão das terminações superiores em aço galvanizado, tem características isolantes e não condutivas, contrariando as hipóteses levantadas pelas equipes de fiscalização. Conclui-se ainda, que a ferrugem, como qualquer poluente comum não condutivo, altera a forma de molhamento superficial da porcelana e, desta forma, eleva a condução elétrica, levemente, quando sob chuva, em relação à mesma superfície limpa e polida. Tanto a seco quanto sob chuva, a superfície da porcelana limpa tem melhor isolamento elétrico, como se esperava.

Não foram encontradas razões para a retirada de operação das unidades de para-raios cujos invólucros estejam cobertos pela ferrugem e tampouco para que se promovam programas de remoção da ferrugem, a não ser pelo aspecto estético. A limpeza da porcelana de colunas isoladoras de subestações de alta tensão, com marcas da ferrugem, pode ser promovida, facilmente, pelo uso apenas de água e esponja de fibras sintéticas, com as unidades desligadas, evidentemente.

6.0 - REFERÊNCIAS

- [1] Rolim Júnior, Thompson Sobreira e Silva, Eduardo Martins da, – SFE/ANEEL, “Relatório de Fiscalização” - RF-ETIM-01/2010-SFE, disponível em <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/RelatorioDeFiscalizacaoETIM.pdf>, acesso em 28/02/2015.
- [2] Rolim Júnior, Thompson Sobreira, e outros, “ RF FURNAS Bleaute Compilado V10 com indice _Reparado_”, 120 páginas, disponível em http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/RF_FURNAS%2001-2010_.pdf, acesso em 28/02/2015.
- [3] Tavares, Mônica – O Globo, notícia de 11/11/2009 0:00 / Atualizado em 10/11/2011 13:40 “Apagão foi maior que o imaginado e atingiu 18 estados” em <http://oglobo.globo.com/economia/apagao-foi-maior-que-imaginado-atingiu-18-estados-3159694#ixzz3T5HFpiFX> e <http://oglobo.globo.com/economia/apagao-foi-maior-que-imaginado-atingiu-18-estados-3159694#ixzz3T5H2ztWS>, acesso em 28/02/2015.
- [4] O GLOBO de 26/03/2010 0:00 / ATUALIZADO 01/11/2011 18:56 “Aneel multa Furnas em R\$ 53,7 milhões por mega-apagão de 2009”, em <http://oglobo.globo.com/economia/aneel-multa-furnas-em-537-milhoes-por-mega-apagao-de-2009-3034102>, acesso em 28/02/2015.
- [5] Glenn Elert “The Physics Hypertextbook”, 1998–2015 “Dielectric constant for selected materials”, <http://physics.info/dielectrics/>, acesso em 28/02/2015.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Márcio Antônio Sens, nascido em 07/07/1951, em de Ituporanga – SC, Técnico em Eletromecânica (ETFSC-1970), Engenheiro Eletricista e de Segurança (UFSC-1975) é pesquisador da Eletrobrás - Cepel, no Rio de Janeiro – RJ, onde atua desde fevereiro de 1976 em estudos relacionados aos materiais elétricos condutores, dielétricos e magnéticos e também em análise periciais destinadas à identificação de causas de falha em equipamentos e instalações ligadas ao Setor Elétrico Nacional. O Autor também é professor de Materiais Elétricos, Medidas Elétricas e Transformadores Elétricos no Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Fluminense, em Niterói – RJ, onde atua desde março de 1984.