



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Efeitos do Enxofre Corrosivo Sobre as Propriedades Dielétricas do Papel Isolante

Edson Ueti	Francisco de Assis Filho	Márcio Antônio Sens
Cepel	Cepel	Cepel
ueti@cepel.br	franc@cepel.br	sens@cepel.br

Palavras-chave

Corrosão, Enxofre, Isolante, Papel, Rigidez Dielétrica.

Resumo

O Setor Elétrico tem sido afetado recentemente, pelo colapso prematuro de reatores e transformadores em serviço. Este fato tem mobilizado empresas do setor na busca das causas principais e suas conseqüências e implicações.

Análises em equipamentos falhados constataram que a presença de óleo mineral isolante, contendo enxofre na sua forma corrosiva, ou que venha tornar-se “corrosivo”, tem sido apontado como principal suspeito para essas falhas.

Este trabalho apresenta resultados parciais de um estudo de caso de um transformador sinistrado, contendo óleo mineral isolante com grau de corrosividade confirmado através do ensaio de enxofre corrosivo. Constatou-se a contaminação do papel isolante das bobinas, pela deposição na forma de sulfeto de cobre, após inspeção visual dos componentes e ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

Também foram realizados ensaios para a verificação da rigidez dielétrica em amostras de papéis isolantes, contendo diversos graus de severidade em relação à presença de enxofre corrosivo. Foram avaliadas camadas de papel próximas aos condutores de cobre das bobinas do transformador, até às camadas mais externas.

Observaram-se variações significativas do valor da rigidez dielétrica entre as diversas camadas de papel, com o grau de contaminação por enxofre corrosivo.

1. Introdução

O CEPEL realizou análises de amostras de óleo isolante de bancos de transformadores de alta e baixa tensão de uma subestação de 500 kV. Adicionalmente, colaborou na realização de diversos ensaios em materiais retirados de um transformador de alta tensão (AT), classe 500 kV, colapsado em serviço, tais como: papel isolante, condutores de cobre e terminais de bobinas de alta tensão e regulação.

Descrevem-se sucintamente os ensaios realizados e apresentam-se os resultados obtidos, constatando-se a presença de enxofre corrosivo na amostra de óleo mineral isolante do transformador sinistrado, que por sua vez, contaminou o papel isolante elétrico das bobinas de alta tensão do transformador, reduzindo o nível de rigidez dielétrica das camadas de papel isolante, mais próximas aos condutores de cobre, com maior grau de contaminação por enxofre corrosivo.

2. Desenvolvimento

Os ensaios relevantes referentes à presença do enxofre corrosivo no transformador sinistrado foram os seguintes: verificação e análise de materiais recolhidos do transformador, ensaios em amostras de óleo mineral isolante quanto à presença de enxofre corrosivo, e determinação da rigidez dielétrica sob frequência industrial em amostras de papel isolante.

2.1 Verificação e análise de materiais recolhidos do transformador

As amostras de condutores de cobre e de papel isolante, recolhidas durante a abertura do transformador, foram verificadas visualmente e analisadas por microscópio eletrônico de varredura (MEV), com sistema de microanálise por dispersão de energia de raios-X (EDS), para identificação de elementos presentes nas superfícies das amostras. Antes dos ensaios as amostras foram submetidas ao processo de limpeza, para remoção do óleo impregnado nas mesmas, através de lavagem com clorofórmio e heptano.

Algumas das amostras de materiais retirados do transformador sinistrado para análise, são mostrados nas Figuras 1 e 2. Parte da bobina de AT do transformador é apresentada na Figura 3, com identificação das camadas internas (CI 1-12), em relação ao núcleo, e externas (CE 13-20), dos condutores de cobre da bobina de AT.



Figura 1 – Terminal da bobina de AT isolado em tecido e condutores cilíndricos de cobre (A) e (B), isolados em papel, da bobina de regulação do transformador

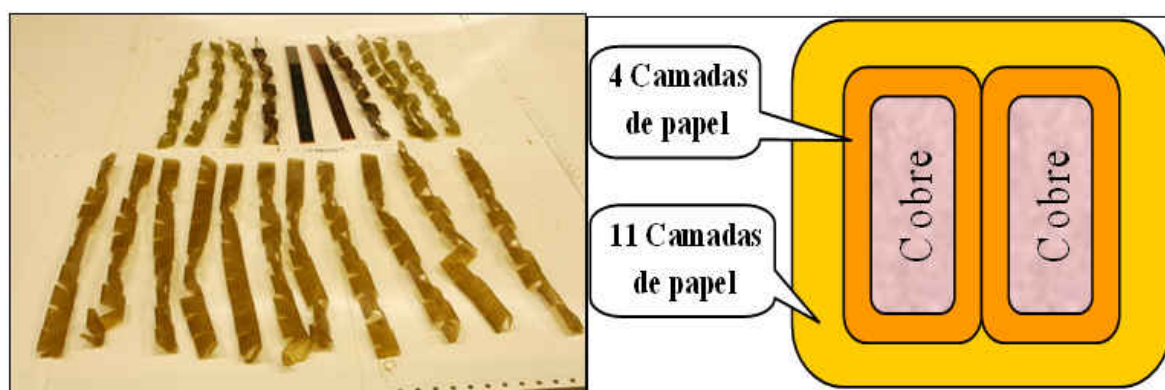


Figura 2 – Condutores retangulares de cobre isolados em papel da bobina de AT do transformador

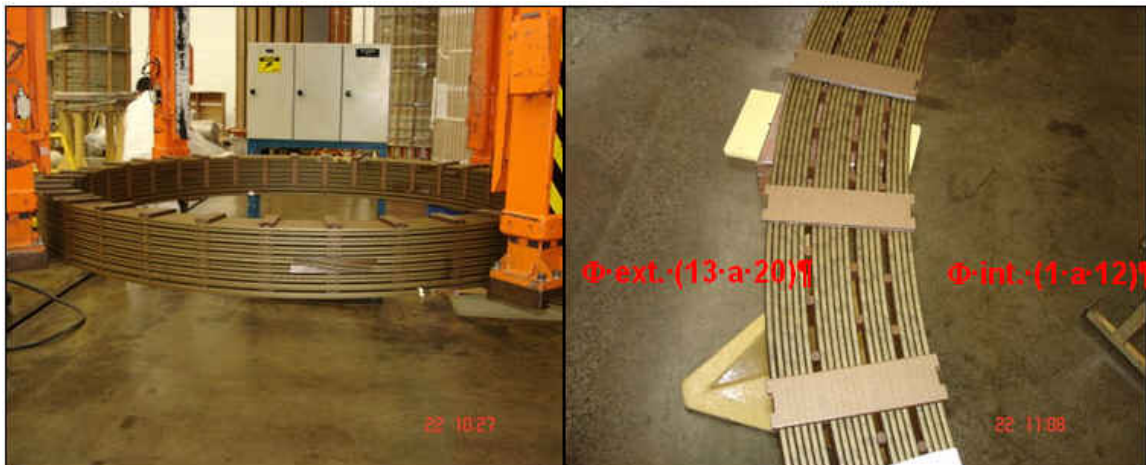


Figura 3 - Parte do enrolamento de AT do transformador, com identificação das camadas internas e externas ao núcleo

Foram observadas diferenças nas tonalidades de coloração, devido à deposição de enxofre corrosivo, nas diversas camadas de condutores de cobre da bobina de AT, tanto nas superfícies dos condutores, quanto nas superfícies do papel isolante, em contato direto com o cobre, conforme mostram as Figuras 4 e 5. Ainda na Figura 5 observa-se que as faces externas (E), tanto do condutor de cobre quanto do papel, apresentam cores mais escuras em relação às faces internas (I).

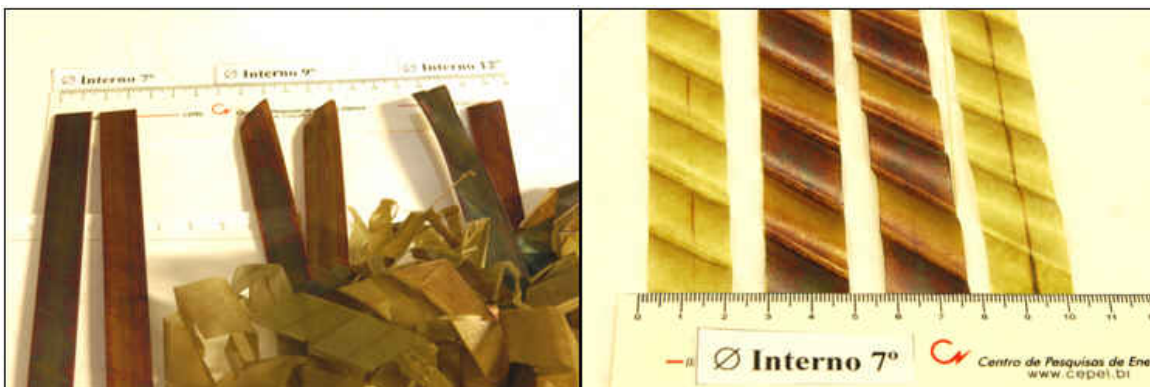


Figura 4 - Condutores da 7ª, 9ª e 12ª camada interna ao núcleo e papéis isolantes da 7ª camada interna da bobina de AT do transformador

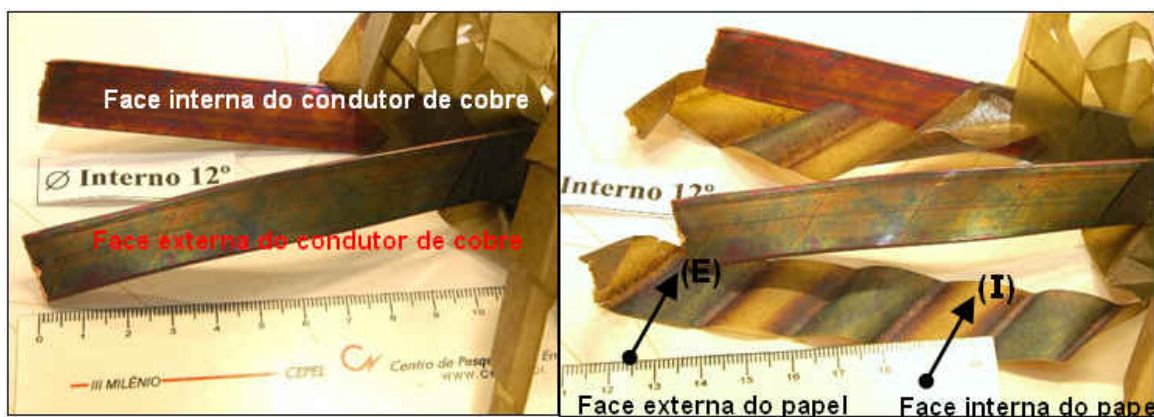


Figura 5 - Condutores da 12ª camada interna ao núcleo e papéis isolantes com identificação das faces internas (I) e externas (E) da bobina de AT do transformador

Pelos resultados dos espectros e das análises semiquantitativas por MEV/EDS, é evidente a presença do elemento enxofre nas primeiras camadas de papel isolante em contato com as superfícies metálicas de cobre, que também apresentaram evidências do elemento enxofre depositados em suas superfícies. As evidências de enxofre podem ser observadas pela alteração da cor dos condutores de cobre e dos papéis isolantes, mostrados nas Figuras 4 e 5. Entretanto, não foi possível estabelecer uma correlação quantitativa da presença de enxofre corrosivo em função da exposição, ou do maior contato com o óleo, ou em relação ao posicionamento das camadas dos condutores de cobre na bobina de AT, já que o processo depende muito da distribuição de temperatura no tanque do transformador.

As Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, os espectros de dispersão de energia de raios-X e as fotomicrografias das superfícies interna (I) e externa (E) do papel isolante em contato com o cobre, da 12ª camada interna da bobina de AT do transformador, e como mostrado na Figura 3, encontrava-se posicionada, radialmente, no meio da bobina de AT.

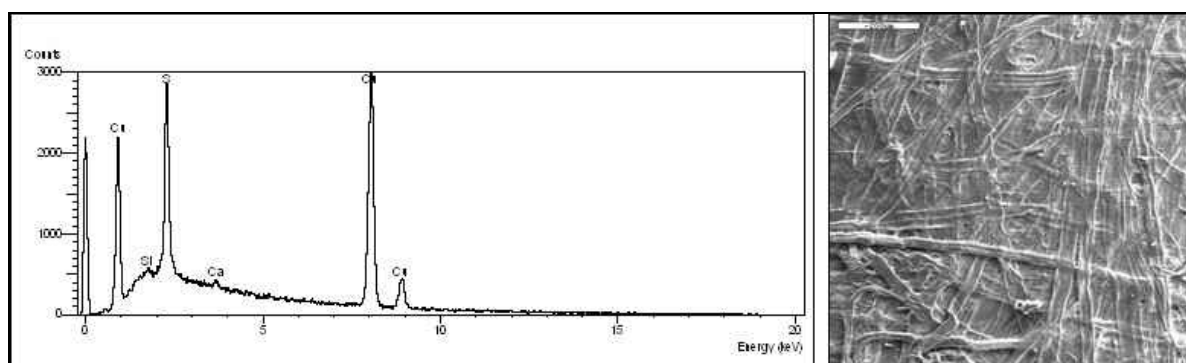


Figura 6 - Espectro de dispersão de energia de raios-X e fotomicrografia (100x) da superfície interna (I) do papel isolante da 12ª camada interna da bobina de AT

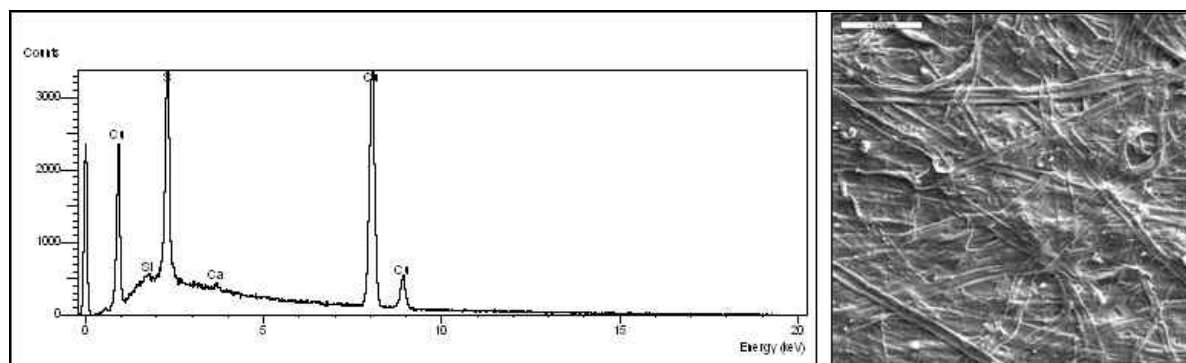


Figura 7 - Espectro de dispersão de energia de raios-X e fotomicrografia (100x) da superfície externa (E) do papel isolante da 12ª camada interna da bobina de AT

O isolamento da amostra do condutor cilíndrico (A) da bobina de regulação, era de papel Kraft crepado, enquanto o isolamento da amostra do condutor cilíndrico (B), continha dois tipos de papel Kraft, o liso presente nas primeiras camadas em contato com o cobre, e o crepado no restante das camadas, conforme pode ser visto na Figura 8.



Figura 8 - Condutores cilíndricos de cobre (A) isolado em papel crepado e (B) com papéis isolantes liso e crepado da bobina de regulação do transformador de AT

As Figuras 9 e 10 apresentam, respectivamente, os espectros de dispersão de energia de raios-X e as fotomicrografias das superfícies de papel Kraft crepado e liso, das primeiras camadas de papel em contato com os condutores de cobre.

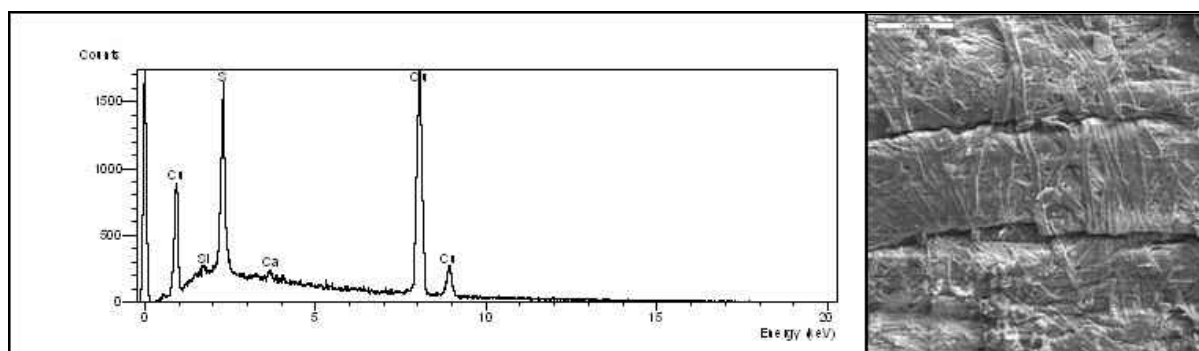


Figura 9 - Espectro de dispersão de energia de raios-X e fotomicrografia (100x) da superfície do papel Kraft crepado (A) da bobina de regulação do transformador de AT

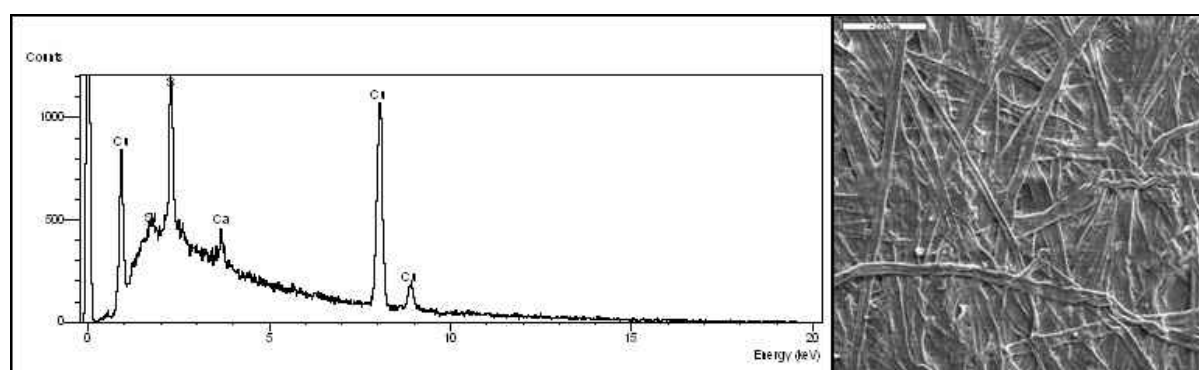


Figura 10 - Espectro de dispersão de energia de raios-X e fotomicrografia (100x) da superfície do papel Kraft liso (B) da bobina de regulação do transformador de AT

Na Figura 11 são mostrados as superfícies dos condutores de cobre analisados, tanto do condutor cilíndrico (A) da bobina de regulação, quanto do condutor retangular da 12ª camada interna da bobina de AT do transformador, e as Figuras 12 e 13 apresentam os respectivos espectros de dispersão de energia de raios-X acompanhados das fotomicrografias.



Figura 11 - Condutor cilíndrico de cobre (A) da bobina de regulação e condutor retangular de cobre da 12ª camada interna da bobina de AT do transformador

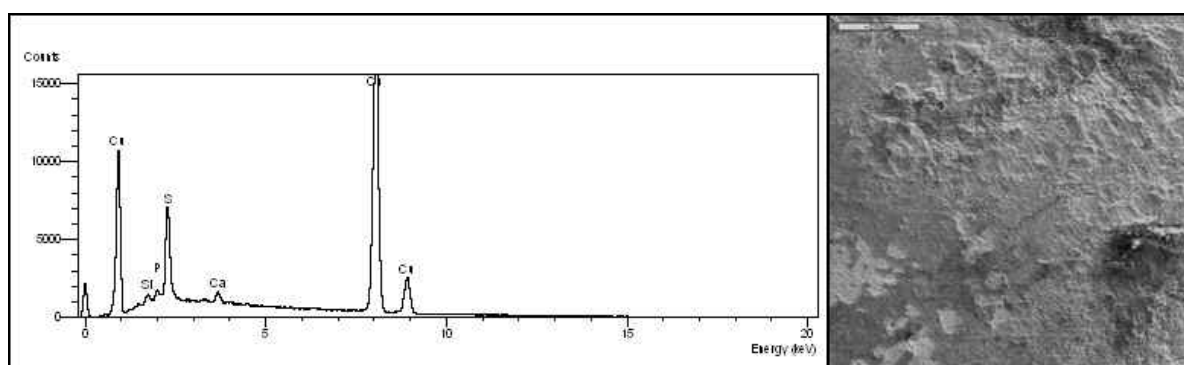


Figura 12 - Espectro de dispersão de energia de raios-X e fotomicrografia (100x) da superfície do condutor cilíndrico de cobre (A) da bobina de regulação do transformador

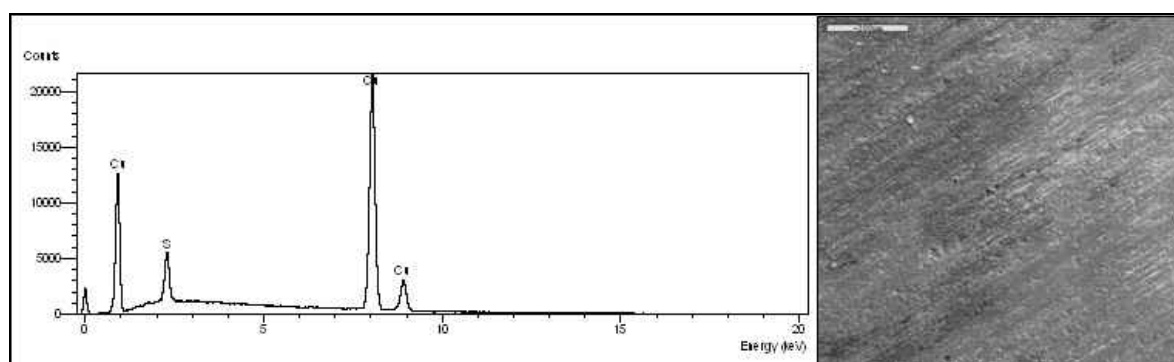


Figura 13 - Espectro de dispersão de energia de raios-X e fotomicrografia (100x) da superfície do condutor retangular de cobre da 12ª camada interna da bobina de AT do transformador

As mesmas evidências da presença do enxofre encontradas nas superfícies dos papéis isolantes, em contato com o cobre, e nos condutores de cobre, foram comprovados pelos espectros de dispersão de energia de raios-X, mostrados nas Figuras 6 a 13.

A Figura 14 mostra o terminal flexível de cobre da bobina de AT, isolado com fita de tecido, e a respectiva fotomicrografia (50X), e a Figura 15 mostra o espectro de dispersão de energia de raios-X e a respectiva fotomicrografia (100X) da região analisada da fita de tecido em contato com o cobre.

As Tabelas 1 e 2 a seguir, resumem os resultados obtidos das análises semiquantitativas das superfícies dos condutores de cobre e papéis isolantes analisados.

Também, no terminal da bobina de AT, isolado em tecido, foram detectadas evidências da presença do enxofre, conforme Figuras 14 e 15.

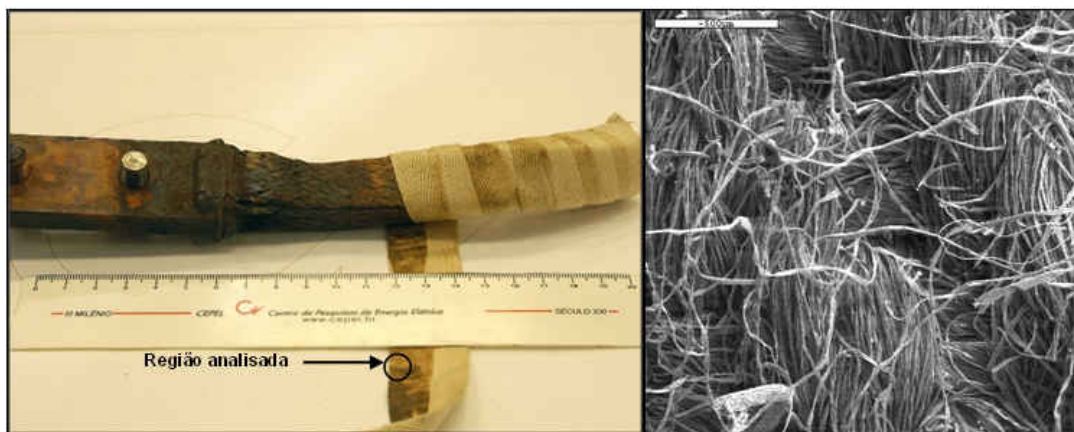


Figura 14 – Terminal flexível de cobre da bobina de AT isolada em fita de tecido e fotomicrografia (50X) da região analisada

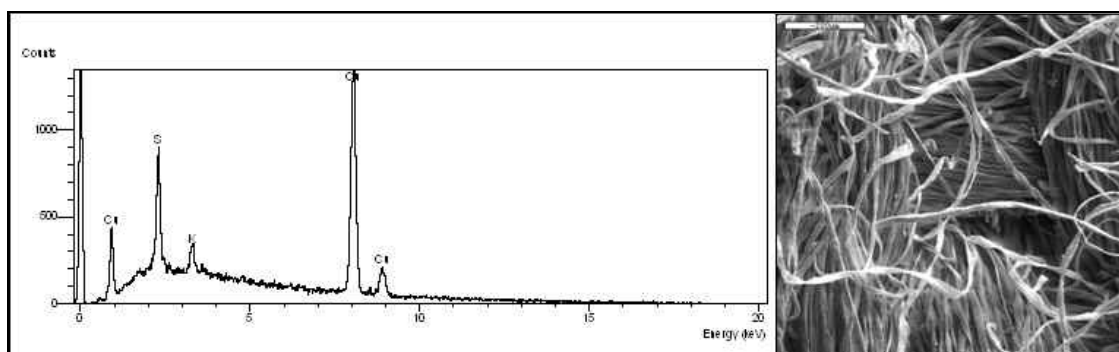


Figura 15 – Espectro de dispersão de energia de raios-X e fotomicrografia (100x) da superfície da fita de tecido do terminal da bobina de AT do transformador

Tabela 1 – Análise Semiquantitativa das Amostras de Papel Isolante da Primeira Camada em Contato com Condutores de Cobre da Bobina de AT e de Regulação do Transformador

IDENTIFICAÇÃO	CONDUTOR RETANGULAR DE COBRE DA 12ª CAMADA INTERNA		CONDUTOR Cu CILÍNDRICO A	CONDUTOR Cu CILÍNDRICO B
	PAPEL LADO INTERNO	PAPEL LADO EXTERNO	PAPEL KRAFT EM CONTATO c/Cu	PAPEL LISO EM CONTATO c/Cu
ELEMENTO	PERCENTAGEM ATÔMICA	PERCENTAGEM ATÔMICA	PERCENTAGEM ATÔMICA	PERCENTAGEM ATÔMICA
Si	1,14	1,38	3,75	1,58
S	23,87	24,87	22,10	23,01
Ca	0,72	0,67	3,59	0,92
Cu	74,27	73,08	70,56	74,49

Tabela 2 – Análise Semiquantitativa das Amostras de Papel Isolante da Primeira Camada em Contato com Condutores de Cobre da Bobina de AT e de Regulação do Transformador

IDENTIFICAÇÃO	TERMINAL AT, FITA TECIDO	CONDUTOR Cu CILINDRO (A)	CONDUTOR RETANGULAR de Cu da 12ª CAMADA
ELEMENTO	PERCENTAGEM ATÔMICA	PERCENTAGEM ATÔMICA	PERCENTAGEM ATÔMICA
Si	---	1,68	---
P	---	1,04	---
S	17,1	11,6	7,71
K	3,35	---	---
Ca	---	1,13	---
Cu	79,6	84,6	92,3

2.2 Ensaio de óleo mineral isolante quanto à presença de enxofre corrosivo

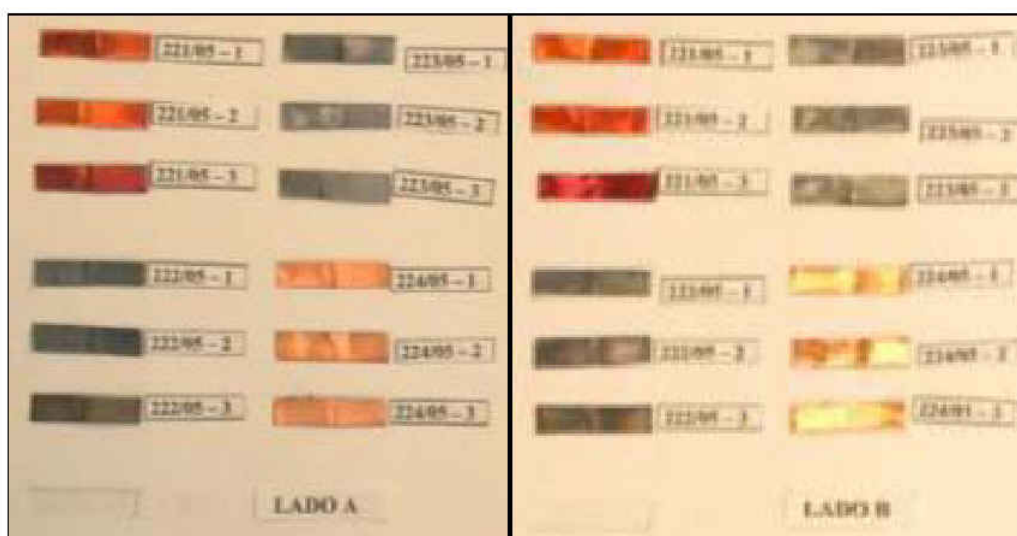
A verificação quanto à presença de enxofre corrosivo nas amostras de óleo dos transformadores, foi realizada em triplicata, pelo método estendido baseado na norma NBR 10505 ², equivalente a ASTM D 1275 ¹, na temperatura de 150 °C por 48 horas. Os ensaios foram realizados em amostras de óleo isolante do transformador sinistrado e também em outros transformadores dos bancos de alta e baixa tensão da subestação de 500 kV.

Nas Figuras 16 e 17, e na Tabela 3 a seguir, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios para verificação da presença de enxofre corrosivo nas amostras de óleo mineral isolante provenientes dos transformadores dos bancos de alta e baixa tensão da subestação de 500 kV.

Tabela 3 – Resultados das análises de enxofre corrosivo das amostras de óleo mineral isolante dos transformadores

AMOSTRAS	IDENTIFICAÇÃO	RESULTADOS
1	Trafo 500 kV - ØA	Não Corrosivo
2	Tanque óleo	Corrosivo
3	Trafo 500 kV - ØB	Corrosivo
4	Trafo 500 kV - ØC	Não Corrosivo
5	Trafo 25 kV – res.	Corrosivo com possível contaminação de O ₂
6	Trafo 25 kV – 2	Não Corrosivo
7	Trafo 25 kV – 1	Corrosivo
8	Trafo 138 kV – 1	Corrosivo com possível contaminação de O ₂
9	Trafo 138 kV – res.	Corrosivo com possível contaminação de O ₂

Amostras de óleo 1 a 4 da Tabela 3.



a – Lâminas de cobre – face A.

b – Lâminas de cobre – face B.

Figura 16 – Resultados das amostras de óleo 1 a 4, analisadas quanto à presença de enxofre corrosivo

Amostras de óleo 5 a 9 da Tabela 3.



a – Lâminas de cobre – face A. b – Lâminas de cobre – face B.

Figura 17 - Resultados das amostras de óleo 5 a 9, analisadas quanto à presença de enxofre corrosivo

Conforme resultados apresentados na Tabela 3, seis das nove amostras de óleo dos bancos de transformadores de alta e baixa tensão, apresentaram evidências da presença de enxofre corrosivo no óleo, conforme método estendido da ASTM D 1275 ¹.

As amostras 5, 8 e 9 da Tabela 3 apresentaram resultados com evidências de presença de enxofre corrosivo no óleo, porém com possível contaminação por oxigênio.

As amostras 2, 3 e 7 apresentaram resultados positivos quanto à presença de enxofre corrosivo, conforme corpos-de-prova com coloração escura ou quase preta, mostrados nas Figuras 16 e 17.

2.3 Rigidez dielétrica do papel isolante sob frequência industrial

A determinação da rigidez dielétrica das amostras de papel isolante retiradas do transformador colapsado em serviço, foi realizada com base na NBR 7559 ³, utilizando-se o método de ensaio de tempo curto, com taxa de elevação da tensão de 50 V/s até a perfuração das amostras.

Foram ensaiadas amostras de papéis isolantes dos condutores retangulares de cobre da bobina de AT, e também, amostras de papéis Kraft tipo liso e crepado dos condutores cilíndricos de cobre da bobina de regulação, conforme mostra as Figuras 18 e 19, nas condições como recebidas, ou seja, impregnadas em óleo, e após remoção do óleo impregnado nas amostras.



Figura 18 - Amostras de papel isolante liso da 1ª e 2ª camadas de condutores de cobre da bobina de AT, para o ensaio de rigidez dielétrica



Figura 19 - Amostras de papel isolante crepado (A) e liso (B) dos condutores cilíndricos de cobre da bobina de regulação, para o ensaio de rigidez dielétrica

Na Figura 20 é apresentada a célula de ensaio utilizada e amostras ensaiadas com perfurações após o ensaio de rigidez dielétrica.

Na Tabela 4 a seguir são apresentados os resultados obtidos no ensaio para determinação da rigidez dielétrica em frequência industrial das amostras de papel Kraft.

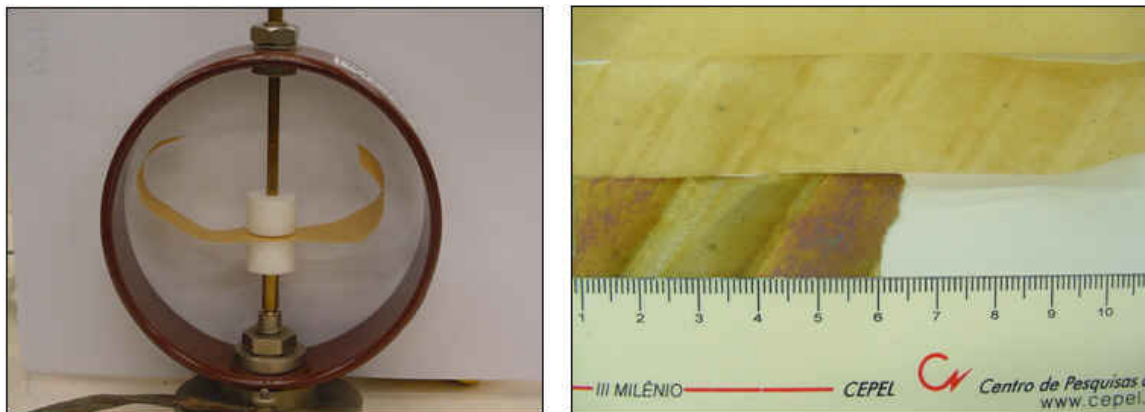


Figura 20 - Célula com eletrodos e amostra de papel para ensaio de rigidez dielétrica, e amostras de papel perfuradas após ensaio

Tabela 4 – Rigidez dielétrica em 60 Hz das amostras de papel Kraft do transformador de AT

Condição das amostras		Impregnadas em óleo		Após remoção do óleo	
		Espessura média (mm)	Rigidez dielétrica (kV/mm)	Espessura média (mm)	Rigidez dielétrica (kV/mm)
Papel do 12º condutor retangular de cobre da bob. AT	1ª camada	0,0510	5,46	0,0620	5,60
	2ª camada	0,0630	10,1	0,0630	10,0
	Camada ext.	0,0600	11,4	0,0650	10,4
Papel do 19º condutor retangular de cobre da bob. AT	1ª camada	0,0700	6,20	0,0770	4,90
	2ª camada	0,0740	10,7	0,0750	9,20
	Camada ext.	0,0710	14,5	0,0710	9,70
Papel do condutor cilíndrico de cobre A	1ª camada	0,215	1,60	0,277	1,30
	2ª camada	0,202	3,70	0,258	3,50
	Camada ext.	0,237	4,30	0,280	3,80
Papel do condutor cilíndrico de cobre B	1ª camada	0,104	9,50	0,107	9,00
	2ª camada	0,107	9,40	0,104	8,10
	Camada ext.	0,189	4,80	0,200	4,80

Obs.: Médias de cinco leituras de espessura e cinco leituras de tensão de perfuração.

Foram avaliadas a rigidez dielétrica de 12 amostras de papel isolante, conforme resultados apresentados na Tabela 4, tanto impregnadas em óleo, quanto após a remoção do mesmo. Pelos resultados, observou-se leve redução na rigidez dielétrica média do papel após a retirada do óleo impregnante, conforme mostra a Figura 21. A mesma figura também ilustra os significativos efeitos do enxofre sobre a rigidez dielétrica do papel, sendo mais evidente nas primeiras camadas de papel, com mais enxofre.

Por outro lado, observou-se nítida diferença entre a rigidez dielétrica da primeira camada de papel isolante em contato com o condutor de cobre, em relação às demais camadas. A rigidez dielétrica média do papel isolante das primeiras camadas de papel, em contato direto com o cobre, resultou, aproximadamente, em 50% do valor obtido para a camada mais externa.

A menor rigidez dielétrica foi encontrada entre as amostras de papel do condutor cilíndrico (A), que eram constituídas, unicamente, por papel Kraft do tipo crepado, e onde se observou, igualmente, a elevação da rigidez dielétrica para as camadas mais afastadas do condutor de cobre. Para a amostra de papel do condutor cilíndrico (B), apenas a camada externa era de papel crepado, resultando em rigidez dielétrica inferior às camadas mais próximas do cobre, em papel liso, conforme Figura 21.

Observou-se, visualmente, maior incidência de enxofre corrosivo sobre o condutor cilíndrico de cobre (A), conforme Figuras 11 e 19, em relação aos outros condutores. A diferença de concentração do enxofre corrosivo, visualmente inferior para o condutor de cobre (B), justifica a rigidez dielétrica de suas duas primeiras camadas, em torno de 9 kV/mm, praticamente o dobro do valor verificado para os outros condutores, exceto o isolamento do condutor (A) que continha papel do tipo crepado em contato com o cobre, e apresentou os menores valores de rigidez, conforme Figura 21.

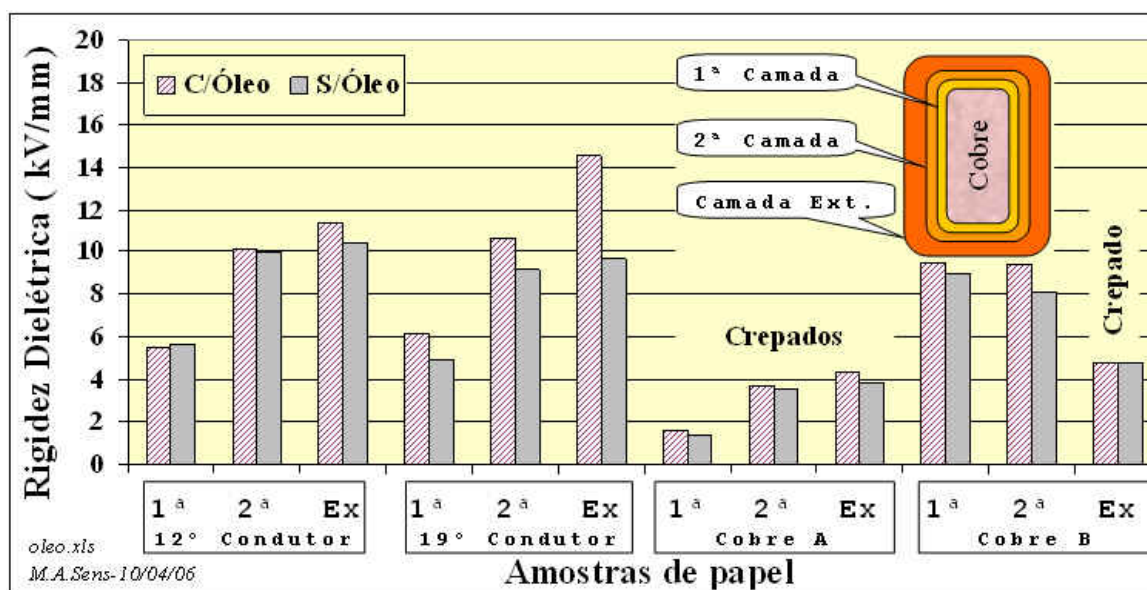


Figura 21 – Influência do enxofre corrosivo sobre a rigidez dielétrica do papel isolante

3. Conclusões

Pelos resultados obtidos nas análises dos materiais colhidos do transformador sinistrado, conclui-se que o óleo mineral isolante apresentou enxofre na forma corrosiva, quando ensaiado por 48 horas a 150 °C em contato com o cobre, conforme procedimentos recomendados pela CIGRÉ-Brasil, atualmente NBR 10505² revisada.

Concluiu-se, também, que as superfícies dos condutores de cobre dos enrolamentos do transformador sinistrado continham depósitos de enxofre.

Foi também confirmada a presença de enxofre nas primeiras camadas do papel isolante dos condutores de cobre. As primeiras camadas apresentavam maiores evidências da presença do enxofre.

O efeito do enxofre sobre as propriedades dielétricas do sistema de isolamento elétrico do transformador também foi verificada, concluindo-se que houve uma redução de 50 %, aproximadamente, na rigidez dielétrica do papel das primeiras camadas, em contato com o cobre, em relação às últimas, mais externas do isolamento.

Conforme divulgado recentemente em seminário específico ⁴, o fenômeno verificado em laboratório tem ocorrido em grandes equipamentos elétricos, cujos condutores de cobre operam em temperaturas mais elevadas e cujo óleo contenha o enxofre passível de ser transformado para a forma corrosiva.

Nesta investigação preliminar ^{5, 6}, foi avaliada apenas uma das propriedades elétricas do papel isolante, e recomenda-se a continuidade das avaliações dos efeitos do enxofre em outras propriedades do papel e das superfícies dos condutores de cobre. Recomenda-se também a verificação dos efeitos da exposição do cobre ao óleo mineral isolante, em ensaios de longa duração, superiores a dois dias, sob temperaturas entre 100 e 150 °C.

Além disso, também são indispensáveis as verificações dos efeitos dos produtos utilizados nos óleos, denominados passivadores.

4. Referências bibliográficas e/ou bibliografia

1 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1275; Standard Test Method for Corrosive Sulfur in Electrical Insulating Oils. ASTM, Philadelphia, 2006.

2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10505; Óleo Mineral Isolante - Determinação de Enxofre Corrosivo - Método de Ensaio. ABNT, Rio de Janeiro, 2006.

3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7559; Papel e Papelão Isolante Elétrico - Determinação da Rigidez Dielétrica sob Frequência Industrial - Método de Ensaio. ABNT, Rio de Janeiro, 2003.

4 My Transfo do Brasil 2007 Meeting - Intercâmbio de Experiência e Conhecimento na Gestão de Transformadores e Óleo Isolante, Rio de Janeiro, 2007.

5 UETI, Edson. Relatório de Ensaio DVLf-51546/05C. CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2005.

6 ASSIS FILHO, Francisco. Relatório Técnico DIE-42141/06C. CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2006.