



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO -XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS  
E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM**

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O ENXOFRE CORROSIVO E SEUS EFEITOS SOBRE AS PROPRIEDADES  
DIELÉTRICAS DO PAPEL ISOLANTE UTILIZADO EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**

**Francisco de Assis Filho (\*)**

**Edson Ueti**

**Alexandre Neves da Silva**

**Márcio Antônio Sens**

**CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**

**RESUMO**

Foram aplicados em laboratório sob condições controladas, esforços elétricos e térmicos em um sistema cobre/papel/óleo de amostras capacitivas imersas em óleo com característica corrosiva (1). Com estas simulações procurou-se obter os perfis de deposição de “enxofre na forma corrosiva” obtidos em laboratório e compará-los com os observados em condições reais de operação, de amostras obtidas de um equipamento retirado de serviço para manutenção devido à falha (2). O acompanhamento do envelhecimento foi realizado através da avaliação de parâmetros químicos, físicos e elétricos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Enxofre corrosivo; Envelhecimento; Papel isolante elétrico; Óleo mineral isolante; Rigidez dielétrica

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os transformadores de potência e reatores que utilizam o sistema isolante a base de óleo e papel são peças vitais em sistemas elétricos de potência (geração, transmissão e distribuição de energia elétrica). Suas falhas, que têm ocorrido de forma prematura e catastrófica, causam um impacto relevante, tanto na segurança operativa e na confiabilidade do sistema, como no fornecimento de energia e nos custos envolvidos.

A ocorrência de falhas sucessivas em reatores e transformadores que utilizam o sistema isolante papel/óleo, a partir de 2005, levou concessionárias de energia elétrica, fabricantes de transformadores e centros de pesquisas a aprofundarem a investigação das causas e seus efeitos.

Foi diagnosticado que alguns tipos de óleos minerais isolantes, de base naftênica, produzem com o passar do tempo de operação, o sulfeto de cobre que se depositava sobre a superfície dos condutores de cobre e no papel isolante das bobinas dos equipamentos (transformadores e reatores), levando à falha dos mesmos. Este sulfeto de cobre tem sido chamado pelo setor de energia elétrica de “enxofre corrosivo”. O agente corrosivo em questão, presente nos óleos, é o dissulfeto de dibenzila (DBDS).

Este trabalho apresenta resultados de experimentos observados em simulações de envelhecimento térmico e elétrico, conduzidos em laboratório, reproduzindo a interação do conjunto óleo/papel/cobre, verificado em reatores e transformadores em operação no Setor Elétrico (1).

Foram montadas amostras capacitivas a partir de placas de cobre empapeladas com papel Kraft do tipo termoestabilizado. Estas amostras foram imersas em óleo mineral isolante, de base naftênica, com característica corrosiva, contido em células de ensaio, especialmente projetadas para este fim, e o conjunto submetido ao efeito da temperatura e estresse por campo elétrico aplicado (1).

Os materiais foram submetidos a ensaios elétricos para determinação da rigidez dielétrica. Foram realizadas inspeções visuais e utilização da técnica de análise por dispersão de energia de raios-X (EDS) acoplada a

(\*) Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL/Sistema Eletrobrás - Avenida Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - Ilha do Fundão - 21941-911 - Rio de Janeiro – RJ - Brasil  
Tel: (+55 21) 2598-6229 – Fax: (+55 21) 2280-3537 – Email: franc@cepel.br

microscópio eletrônico de varredura (MEV). Também foram realizadas análises químicas dos depósitos para confirmar sua composição.

Essas determinações em conjunto agregaram informações que contribuíram para o melhor entendimento dos mecanismos de formação e migração do sulfeto de cobre sobre o papel isolante e suas correlações com a deterioração das propriedades dielétricas.

Considerações e recomendações são sugeridas para detecção e mitigação do problema de enxofre corrosivo.

## 2.0 - MATERIAIS

Os materiais utilizados nos experimentos foram selecionados conforme utilizados em transformadores de potência.

### 2.1 - Óleo Mineral Isolante (OMI)

Utilizou-se o óleo 10 GBA de base naftênica, não passivado, fabricado pela Nynas, atendendo o regulamento da ANP (3), com exceção de sua característica corrosiva (4). Sua corrosividade deve-se à presença do DBDS (5)(6)(7). A escolha do óleo foi feita levando-se em conta principalmente seu envolvimento em falhas relatadas em artigos técnicos (2)(5)(6)(7)(8)(9).

O óleo 10 GBA utilizado apresentava originalmente 176 mg/kg de DBDS (determinado no laboratório da Eletronorte – Belém - PA, através da utilização da técnica de cromatografia gasosa acoplada a espectrômetro de massas, GC-MS) e foi aditivado em laboratório com 0,30 % em massa de DBPC (10).

### 2.2 - Fita Laminada de Cobre Eletrolítico

Utilizou-se condutor de cobre eletrolítico na forma de fita laminada com 18,9 mm de largura e 1,50 mm de espessura. A seção reta do condutor é próxima de um caso de falha avaliado conforme referência (2).

### 2.3 - Papel Isolante Elétrico

Utilizou-se papel Kraft termoestabilizado para empapelamento dos condutores e estudo da migração dos compostos de enxofre, sendo as características relevantes para esta pesquisa descritos na [Tabela 1](#).

**TABELA 1 - PROPRIEDADES DO PAPEL KRAFT TERMOESTABILIZADO**

Propriedade ensaiada	Método de ensaio	Resultado
Grau de polimerização	NBR 8148 (11)	1214
Teor de nitrogênio	ASTM E 258 (12)	1,2%
Rigidez dielétrica	NBR 7559 (13)	13,2 kV/mm
Espessura	NBR-NM-ISO-534 (14)	0,052 a 0,054 mm
Largura da tira	-	20 mm

### 2.4 - Preparação das Amostras Capacitivas (AMC)

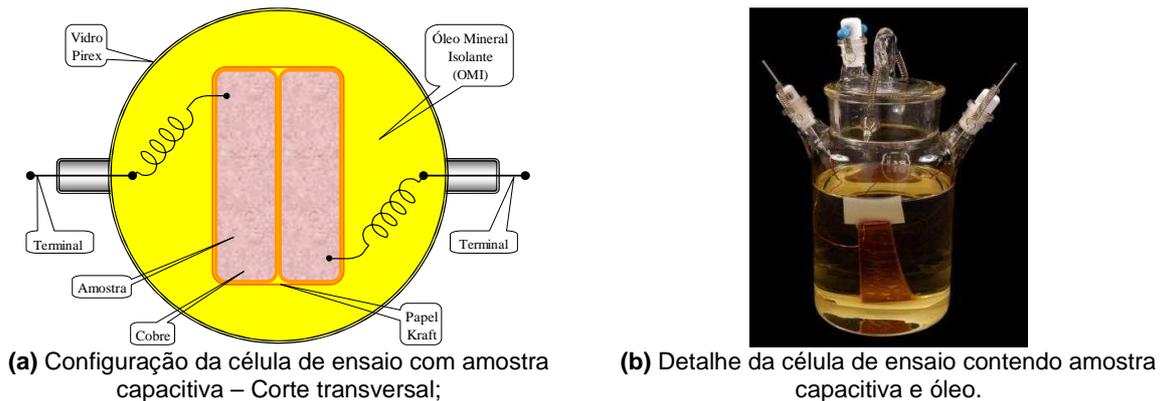
Os condutores foram isolados individualmente com quatro camadas de papel e o conjunto (par de condutores empapelados), também com quatro camadas de papel. Devido às características construtivas da máquina de empapelar, da geometria da fita de cobre e da largura da tira de papel optou-se por uma sobreposição de 50 % do papel.

Convencionou-se chamar de “amostra capacitiva” (AMC) ao capacitor formado pelo conjunto de dois eletrodos de cobre, empapelados, medindo 100 mm de comprimento em formato plano, conforme mostrado na [Figura 1](#). Separou-se as extremidades das AMC, e fixou-se espaçadores poliméricos de material compatível com óleo.

A amostra capacitiva assim preparada apresentava uma massa de cobre de 49,46 g, com área superficial de 8270 mm<sup>2</sup>, e 2,27 g total de papel, sendo 1,45 g nas tiras de empapelamento individual das placas de cobre e 0,82 g de papel nas tiras de amarração externa destas placas.

### 2.5 - Célula de Ensaio e Amostra Capacitiva

A [Figura 1 – \(a\)](#) mostra a configuração da AMC constituída por duas placas de cobre isoladas em papel Kraft, e a [Figura 1 – \(b\)](#) mostra a célula de ensaio, constituída por um recipiente de vidro pirex, contendo OMI (conforme descrito em 2.1) impregnando a AMC, e os eletrodos terminais para conexão com a fonte de alta tensão.



**FIGURA 1 - CÉLULA DE ENSAIO**

### 3.0 - ENSAIOS

#### 3.1 - Rigidez Dielétrica

A determinação da tensão de ruptura dielétrica do papel isolante, retirado das amostras capacitivas, foi realizada de acordo com a NBR 7559 (13), utilizando-se o método de ensaio de tempo curto, com taxa de elevação da tensão de 50 V/s até a perfuração dielétrica da amostra.

#### 3.2 - MEV – EDS

Foram realizadas análises químicas semiquantitativas da superfície do cobre e do papel das unidades capacitivas, utilizando-se 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 mesmas.

A técnica de microscopia tem por objetivo observar se os depósitos presentes nas superfícies do cobre e do papel são depósitos que possuem enxofre e/ou cobre na sua composição.

#### 3.3 - Constante Dielétrica e Fator de Dissipação

As amostras capacitivas foram monitoradas, durante o período de envelhecimento, quanto à capacitância e o fator de dissipação, nas frequências de 100 Hz a 100 kHz, na temperatura de 140 °C.

#### 3.4 - Grau de Polimerização - GP

O grau de polimerização do papel foi determinado nas amostras originais e após o período de envelhecimento, de acordo com a NBR 8148 (11).

### 4.0 - ENVELHECIMENTO - CONDIÇÕES

Doze amostras capacitivas foram secas, e impregnadas com 700mℓ de óleo mineral isolante seco com característica corrosiva. Algumas células assim montadas tiveram sua umidade determinada obtendo-se teores de água (15) na faixa de 1 a 4 mg/kg após 20 horas em repouso à temperatura ambiente.

Um lote de doze células foi submetido à temperatura de 140 °C, sendo que seis destas células, além do efeito da temperatura, foram submetidas a tensão elétrica de 2 kV em 60 Hz.

Pares de células (uma célula submetida ao efeito da temperatura, e outra à temperatura e tensão) intermediárias foram retirados para análise com 7, 12 e 21 dias para avaliação do envelhecimento e para acompanhamento da formação e evolução dos depósitos de sulfeto de cobre. As outras células foram envelhecidas por 32 dias.

Ao término dos ensaios as AMC foram inspecionadas e avaliadas quanto aos seguintes critérios:

- Inspeção visual das amostras e análise;
- Detecção de depósitos de sulfetos nas superfícies do cobre e do papel por MEV-EDS;
- Remoção das camadas de papel e determinação da rigidez dielétrica;
- Medição da capacitância e do fator de dissipação em alta frequência das AMC;
- Determinação do grau de polimerização das camadas de papel;
- Determinação dos teores de DBDS nas amostras de óleos.

## 5.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

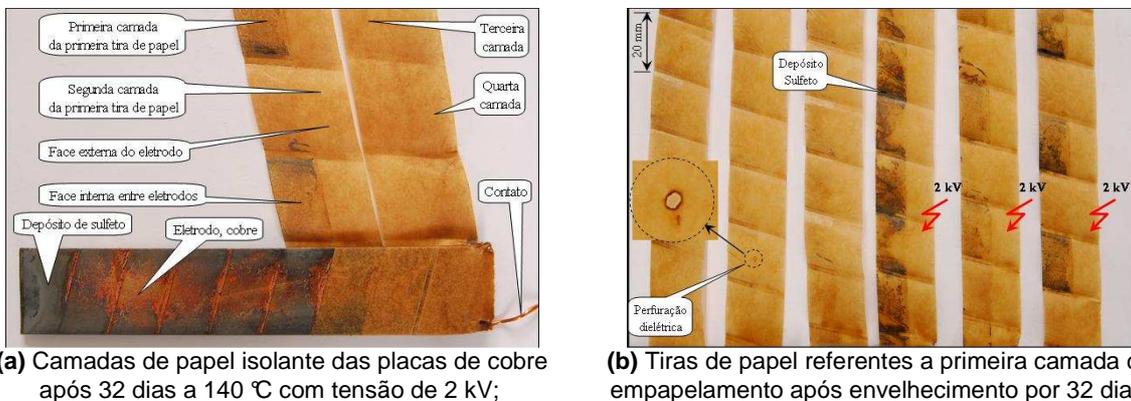
### 5.1 - Inspeção Visual

Pela inspeção visual das amostras capacitivas e dos seus componentes construtivos constatou-se a presença de depósitos escuros nas lâminas de cobre e apenas na primeira tira de papel em contato com a superfície de cobre das amostras submetidas à temperatura e tensão. A tonalidade dos depósitos e a quantidade era crescente à medida que as amostras eram envelhecidas por tempos de 7, 12, 21 e 32 dias.

A maior deposição escura ocorreu na face do papel entre as placas, apenas nas amostras submetidas ao efeito conjunto da temperatura de 140 °C e tensão de 2 kV. A **Figura 2** ilustra estas observações.

As evidências de depósitos de compostos de enxofre puderam ser observadas visualmente pela alteração da cor do cobre e dos papéis isolantes, tendo sido possível estabelecer uma relação semiquantitativa, da presença de enxofre nas camadas de papel, com o tempo de exposição à temperatura e do efeito da tensão elétrica.

Na **Figura 2 – (b)** são mostradas as tiras de papéis referentes à primeira camada de papel em contato direto com superfície de cobre. As três tiras de papel da esquerda referem-se às AMC de números 1, 2 e 3, submetidas apenas ao efeito da temperatura de 140 °C. As tiras da direita referem-se às AMC de números 4, 5 e 6, submetidas à 140 °C e tensão elétrica de 2 kV. A inspeção visual também constatou que o depósito não era visível pela face oposta do papel.

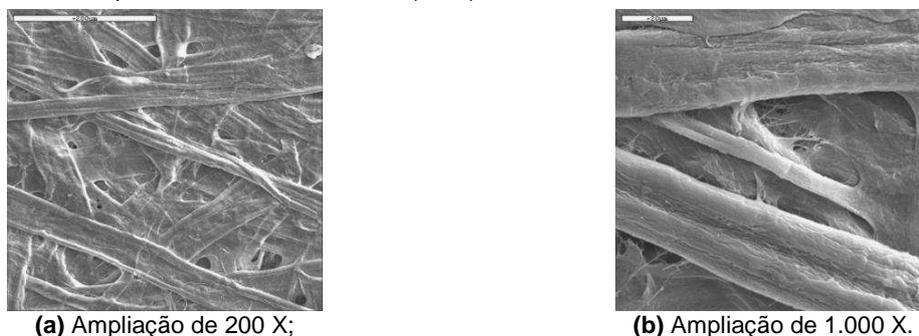


**FIGURA 2 – DEPÓSITOS DE SULFETO NO PAPEL KRAFT**

As placas de cobre, das amostras submetidas apenas ao efeito da temperatura por 32 dias, e as placas das amostras submetidas à temperatura e tensão elétrica, apresentaram deposição uniforme e contínua na superfície externa. As superfícies entre placas apresentaram depósito descontínuo, estando a parte central das placas basicamente isenta de depósito, com o cobre preservando em algumas regiões centrais sua cor característica, conforme se observa na **Figura 2 – (a)**.

### 5.2 - Microscopia (MEV-EDS)

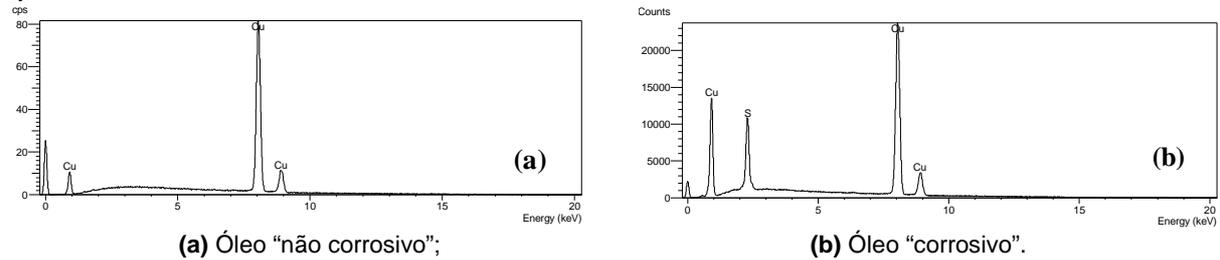
A **Figura 3** apresenta duas imagens das fibras de um papel isolante novo, sem manuseio, do tipo Kraft, obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).



**FIGURA 3 - FOTOMICROGRAFIAS DAS FIBRAS DE PAPEL ISOLANTE ELÉTRICO NOVO OBTIDAS POR TÉCNICA DE MEV**

A **Figura 4** mostra os espectros de EDS característicos das superfícies do cobre com e sem depósito de sulfetos após envelhecimento a 140 °C por 32 dias, independente da aplicação da tensão de 2 kV. O espectro (a) refere-se

à superfície de uma placa de cobre cujo óleo é “não corrosivo”, e o espectro **(b)** à superfície da placa de cobre cujo óleo é “corrosivo”.

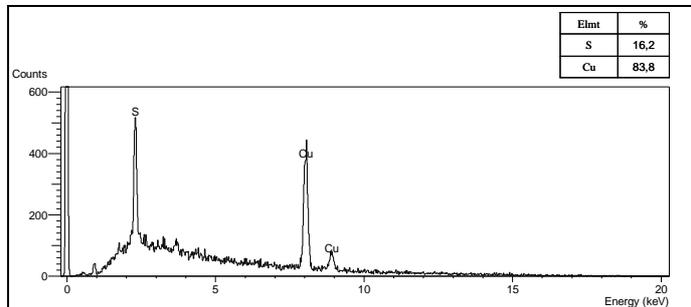


**FIGURA 4 - ESPECTROS OBTIDOS POR MEV-EDS DA SUPERFÍCIE DAS PLACAS DE COBRE APÓS ENVELHECIMENTO**

A **Figura 5 – (a)** e a **Figura 6 – (a)** mostram as imagens obtidas por MEV dos papéis após envelhecimento. As amostras de papel das AMC submetidas ao efeito da temperatura e da tensão elétrica apresentaram maior deposição de sulfeto de cobre na primeira camada de papel em contato com o cobre, quando comparadas com amostras submetidas apenas ao envelhecimento térmico, tanto entre placas quanto externamente a elas.



(a) Fotomicrografia de MEV típica das fibras de papel com depósito de sulfeto. AMC com 32 dias a 140 °C e 2 kV - 200 X;



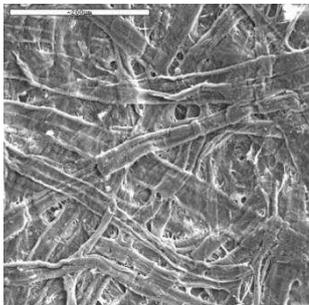
(b) Espectro EDS para AMC a 140 °C e 2 kV por 32 dias. Espectro característico do depósito no papel em contato direto com o cobre.

**FIGURA 5 – FOTOMICROGRAFIA E ESPECTRO EDS DO PAPEL KRAFT ENVELHECIDO**

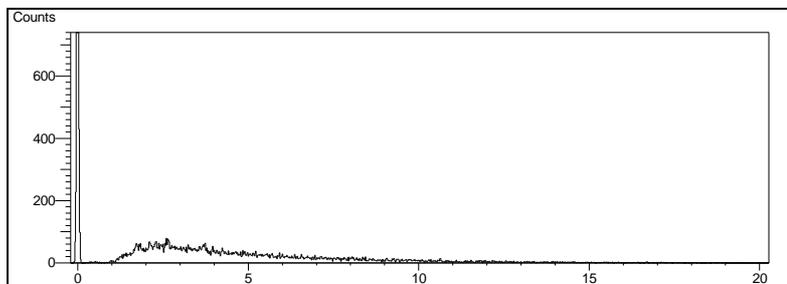
Esta presença de sulfeto de cobre foi confirmada pelos espectros MEV-EDS da **Figura 5 – (b)** para o papel, **Figura 4 – (b)** referente aos depósitos nas placas de cobre, e pela diminuição dos teores de DBDS conforme resultados mostrados na **Tabela 4**.

A **Figura 5 - (a)** mostra a face do papel com depósito de sulfeto referente à primeira camada em contato direto com superfície do cobre entre placas após 32 dias de envelhecimento a 140 °C e tensão de 2 kV. Observa-se que o depósito recobre boa parte dos vazios entre as fibras. O espectro MEV-EDS desta região é mostrado na **Figura 5 – (b)** e confirma a presença de enxofre e cobre.

A **Figura 6 – (a)** mostra a face oposta do depósito de sulfeto no papel referente à primeira camada em contato direto com superfície do cobre entre placas após 32 dias de envelhecimento a 140 °C e tensão de 2 kV, face oposta do papel da **Figura 5 – (a)**. Observa-se que os vazios entre as fibras de papel estão em boa parte preservados, já que este papel sofreu manuseio e prensagem durante montagem das AMC. O espectro MEV-EDS desta região é mostrado na **Figura 6 – (b)** onde não se encontrou indícios dos elementos enxofre e cobre.



(a) Fotomicrografia de MEV típica da face oposta da **Figura 5 – (a)** - 200 X;



(b) Espectro obtido por EDS referente à **Figura 6 – (a)**.

**FIGURA 6 - FOTOMICROGRAFIA E ESPECTRO EDS DO PAPEL DA AMC APÓS 32 DIAS A 140 °C E 2 kV**

As fotomicrografias obtidas por MEV, **Figura 5 – (a)** e **Figura 6 – (a)**, juntamente com os espectros EDS, mostrados na **Figura 5 – (b)** e na **Figura 6 – (b)**, confirmam as observações da inspeção visual de que os depósitos ocorrem apenas numa das faces do papel para as condições de ensaio. As fotomicrografias mostram que os depósitos de sulfeto preenchem parte do espaço entre as fibras, enquanto do lado oposto ao depósito as fibras e vazios estão mais preservados. Observou-se que as regiões analisadas por MEV-EDS que apresentaram alta contagem de enxofre, correspondiam aos depósitos de sulfeto de cobre na face do papel em contato direto com placas de cobre entre condutores e que, os espectros da face oposta do papel, não apresentavam enxofre e cobre.

Para acompanhamento da evolução da formação do sulfeto de cobre nas placas realizou-se inspeção de amostras intermediárias retiradas com 7, 12 e 21 dias. Observou-se que primeiramente ocorria formação descontínua de sulfeto de cobre na superfície da placa, e que este depósito tornava-se mais intenso à medida que o tempo de envelhecimento crescia, até tornar-se visível no papel.

Na última camada de papel de amarração da amostra capacitiva não se observa, por inspeção visual ou pela técnica de MEV-EDS, a presença de sulfeto na coloração ligeiramente sombreada. Esta face do papel estava em contato direto com óleo, indicando que esta coloração pode ser devida aos produtos de envelhecimento do óleo. Esta coloração das fibras era menos intensa nas células cujos óleos envelheceram menos. A RD determinada para estas regiões não apresentaram diferença significativa em relação às regiões de camadas mais claras.

A análise de MEV-EDS das duas superfícies das placas de cobre das amostras capacitivas após 32 dias de envelhecimento confirmou que os depósitos escuros são de sulfeto. Os resultados obtidos por MEV-EDS foram confirmados pela análise dos depósitos das superfícies do cobre e do papel através da determinação do teor de enxofre total (16) onde se detectou a presença de enxofre.

### 5.3 - Rigidez Dielétrica (RD)

Não ocorreu a perfuração dielétrica das amostras capacitivas nas condições de envelhecimento térmico e de esforço elétrico durante os 32 dias de ensaio. Após este período, as AMC foram desmontadas para os ensaios de rigidez dielétrica nas tiras de papéis isolantes, contendo diversos graus de severidade em relação à presença de depósitos de enxofre corrosivo. Foram avaliadas diversas camadas de papel das AMC. Os resultados mostrados na **Tabela 3**, referente a uma AMC é a média até 20 leituras. As colunas de Médias são as médias das médias referentes às tiras de três amostras capacitivas retiradas e avaliadas da mesma posição.

As amostras capacitivas 1, 2 e 3 foram submetidas ao efeito da temperatura de 140 °C, e as de números 4, 5 e 6 à temperatura de 140 °C e tensão de 2 kV. Não se observou variação significativa da tensão de ruptura entre as camadas de papel das amostras capacitivas 1, 2 e 3.

Somente as AMC submetidas ao efeito conjunto de temp. e tensão elétrica apresentaram variações significativas da RD entre a primeira camada de papel e as demais camadas. A RD da primeira camada de papel, em contato direto com placas de cobre, apresentou queda média de 32 % em relação à segunda camada, conforme mostrado na **Tabela 3**. Na segunda camada de papel e demais, não se observaram variações significativas entre os resultados de RD nos pontos analisados, indicando que não houve migração do sulfeto para estas camadas. Avaliações por MEV-EDS não detectaram presença de enxofre ou cobre a partir da segunda camada.

**TABELA 2 – RIGIDEZ DIELÉTRICA DO PAPEL DAS AMC ENVELHECIDAS POR 32 DIAS.**

Camada de papel	Rigidez dielétrica do papel Kraft após envelhecimento a 140 °C por 32 dias									
	Sem tensão aplicada					Com tensão aplicada de 2 kV em 60 Hz				
	AMC 1 (kV/mm)	AMC 2 (kV/mm)	AMC 3 (kV/mm)	Média		AMC 4 (kV/mm)	AMC 5 (kV/mm)	AMC 6 (kV/mm)	Média	
<b>1ª Interna</b>	12,2	12,1	12,3	<b>12,2</b>	97,1	8,23	8,89	9,81	<b>8,97</b>	68,8
<b>2ª Interna</b>	12,3	12,7	12,8	<b>12,6</b>	100	12,8	13,2	13,2	<b>13,0</b>	100
<b>1ª Externa</b>	12,0	12,3	12,2	<b>12,2</b>	96,7	12,8	12,9	13,0	<b>12,9</b>	98,8
<b>2ª Externa</b>	12,2	12,3	12,4	<b>12,3</b>	97,6	13,2	13,2	13,1	<b>13,2</b>	101
<b>1ª Conjunto</b>	13,2	-	-	<b>13,0</b>	103	-	12,5	-	<b>13,0</b>	99,7
<b>3ª Conjunto</b>	11,9	-	-	<b>12,0</b>	95,2	13,2	12,5	-	<b>12,9</b>	98,6
<b>4ª Conjunto</b>	12,1	-	-	<b>12,0</b>	95,2	12,7	13,1	-	<b>12,9</b>	99,1

### 5.4 - Capacitância e Fator de Dissipação

Os resultados das medições periódicas de capacitância e de fator de dissipação, tanto em baixa quanto em alta frequência, não demonstraram sensibilidade para identificar correlações com o fenômeno sob estudo e não foram aqui relatados.

### 5.5 - Grau de Polimerização do Papel (GP)

O GP do papel antes e após secagem resultou em 1214. O GP dos papéis em contato direto com as placas de cobre das AMC, em relação à última camada de amarração, após os 32 dias de ensaio a 140 °C e 2 kV, teve uma queda em torno de 5 % conforme resultados da [Tabela 3](#). Estes valores foram determinados na região onde havia maior depósito de sulfeto, indicando que o processo de deposição não degrada significativamente as fibras do papel.

**TABELA 3 – GRAU DE POLIMERIZAÇÃO MÉDIO DAS AMOSTRAS DE PAPEL, RETIRADAS DAS AMC, APÓS ENVELHECIMENTO POR 32 DIAS A 140 °C E TENSÃO DE 2 kV.**

Identificação da amostra de papel Kraft	Grau de polimerização (GPmédio)	GP (%)	Variação (%)
Tira de empapelamento com placa individual - contato direto com o cobre entre placas.	804	94,7	-5,3
Tira de empapelamento com placa individual - contato direto com a face externa da placa de cobre.	807	95,1	-4,9
Primeira camada de amarração externa das amostras capacitivas - AMC.	837	98,6	-1,4
Quarta camada de amarração externa das AMC - contato direto com o óleo.	<b>849</b>	<b>100</b>	<b>0</b>

### 5.6 - Teor de DBDS após Envelhecimento

Na [Tabela 4](#) encontram-se os teores de DBDS dos óleos contidos nas células após envelhecimento a 140 °C, com e sem tensão elétrica de 2 kV, por 32 dias.

O valor médio do teor de DBDS das células 1, 2 e 3 submetidas à temperatura de 140 °C foi de 132 mg/kg. A média dos teores de DBDS das células 4, 5 e 6 submetidas a 140 °C e tensão elétrica de 2 kV foi de 111 mg/kg. Isto mostra que além do efeito da temperatura no consumo de DBDS, a tensão elétrica em conjunto com a temperatura aumentou este consumo da faixa de 25 % para 37 %.

**TABELA 4 - TEORES DE DBDS NOS ÓLEOS DAS CÉLULAS ENVELHECIDAS A 140 °C E 32 DIAS.**

Célula	Consumo de DBDS no óleo após envelhecimento a 140 °C por 32 dias						
	Tensão aplicada	Teor de DBDS	Média		Variação	Consumo de DBDS	
	(kV)	(mg/kg)	(mg/kg)	(%)	(%)	(mg/kg)	(%)
1	-	138	132,0	75,0	-25,0	44,0	100
2		135					
3		123					
4	2,0	109	111,3	63,2	-36,8	64,7	147
5		110					
6		115					
Amostra original de óleo		176	176	100	0	-	-

### 6.0 - COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As superfícies das placas de cobre das amostras capacitivas continham depósitos de sulfeto após os ensaios. Foi confirmada a presença de enxofre e cobre na primeira camada de papel isolante. Constatou-se que a temperatura é fator preponderante para iniciar o processo de formação de espécies corrosivas à base de enxofre para a amostra estudada. Concluiu-se que o GP do papel não é afetado significativamente pela deposição de sulfeto em sua superfície, indicando que este depósito não interage de forma destrutiva com as fibras, apenas se deposita.

O sulfeto de cobre se forma primeiramente na superfície do cobre e depois migra para a superfície do papel, não passando através das fibras, para as condições ensaiadas, indicando ser um processo de dentro para fora. É possível, que a passagem do sulfeto para outras camadas de papel, se dê através das interfaces do papel e não através de suas fibras.

A menor deposição de sulfeto, na região localizada entre as placas de cobre das amostras capacitivas em relação a sua superfície externa, deve-se ao fato do processo de difusão do óleo depender da impregnação do papel e do processo de difusibilidade de espécies químicas na interface sólido/líquido e sólido impregnado (no caso papel). Porém, observou-se que o efeito do campo elétrico favorece a migração do sulfeto de cobre formado na superfície do cobre para a primeira camada de papel.

O efeito do sulfeto sobre o papel impregnado reduziu em 32 % a rigidez dielétrica do mesmo na primeira camada em contato com cobre em relação à segunda camada e demais, indicando o efeito contaminante do depósito. Ou seja, transformadores e reatores em operação, sob condições severas de funcionamento, poderão comprometer algumas camadas de papel isolante.

Tais resultados vão ao encontro com o observado em trabalho anterior (2), envolvendo um transformador sinistrado de 500 kV, onde foram identificadas reduções de até 50% na rigidez dielétrica do papel da primeira camada, em contato com o cobre, decorrente da contaminação pelo enxofre.

O consumo de DBDS resultou em 47 % maior nas células submetidas a esforços térmicos e elétricos quando comparados com o consumo das células submetidas apenas ao efeito da temperatura. Concluiu-se portanto, que para envelhecimentos mais prolongados a deposição dos sulfetos seja mais severa e migre pelas interfaces do papel para camadas mais externas, justificando o colapso de unidades de transformação.

As medições de capacitância e de fator de dissipação não mostraram suficiente sensibilidade para a identificação de qualquer tendência com o envelhecimento ou com a formação de enxofre corrosivo depositada no papel.

Recomenda-se a continuidade das avaliações dos efeitos do depósito de sulfeto de cobre em outras propriedades do papel e nas propriedades elétricas e condutividade térmica do sulfeto depositado na superfície do cobre.

Como a maioria dos óleos dos equipamentos do Setor Elétrico brasileiro foram passivados são indispensáveis acompanhamento e verificações dos efeitos destes produtos no conjunto papel/óleo.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Assis Filho, Francisco de - "Avaliação da Formação e Migração do Sulfeto de Cobre em Papel Isolante Utilizado em Equipamentos Elétricos". Dissertação de mestrado UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2008.
- (2) Ueti, Edson; Filho, F. A., Sens, M. A. - "Efeitos do enxofre corrosivo sobre as propriedades dielétricas do papel isolante". XVIII SENDI, outubro 2008.
- (3) Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Regulamento Técnico nº 4/2008 da Resolução nº 36, de 5 de dezembro de 2008, publicada no Diário Oficial da União (DOU) de 08/12/2008, "Especificações dos óleos minerais isolantes tipo A e tipo B, de origem nacional ou importada".
- (4) ABNT NBR 10505. "Óleo mineral isolante – Determinação de enxofre corrosivo", fevereiro 2006.
- (5) Costa, S. - "Corrosive sulfur – Transformers failure history", in: Anais My Transfo do Brasil 2007, pp.161-204, Rio de Janeiro, RJ, march (2007).
- (6) Tumiatti, V., Tumiatti, M., Actis, R., Roggero, C., Maina, R., Maina, S., Kapila, S. - "The "Corrosive Sulfur Risk" and Countermeasures for Transformers & Oils: the "DBDS & corrosion Free" Program and IFED (Integrated Fingerprinting & Elemental Diagnostics) Applications", in: Anais My Transfo do Brasil 2007, pp.161-204, Rio de Janeiro, RJ, march (2007).
- (7) Informe Técnico COPEM/SCMT – 003/2007, "Enxofre corrosivo nos equipamentos do Grupo Eletrobrás" – março 2007. Elaborado pelas Empresas do Grupo ELETROBRÁS e CEPTEL.
- (8) ABRATE, "Workshop da ABINEE sobre enxofre corrosivo em óleo isolante", junho 2005.
- (9) CIGRÉ, Comitê de estudos de materiais e tecnologias emergentes, GT D1.01-Líquidos isolantes, "Enxofre corrosivo em óleo mineral isolante", Relatório técnico D1-01-002/06, 2006.
- (10) ABNT NBR 12134. "Óleo mineral isolante – Determinação do teor de 2,6-di-terciário-butil paracresol", 1991.
- (11) ABNT NBR 8148. "Papéis e papelões celulósicos, novos e envelhecidos, para fins elétricos – Medida do grau de polimerização viscosimétrico médio – Método de ensaio", janeiro 2000.
- (12) ASTM E 258. "Standard test method for total nitrogen in organic materials by modified Kjeldahl method", reaproved 2002.
- (13) ABNT NBR 7559. "Papel e cartão dielétricos – Determinação da rigidez dielétrica sob frequência industrial – Método de ensaio", dezembro 2003.
- (14) ABNT NBR NM-ISO – 534. "Papel e cartão – Determinação da espessura, densidade e volume específico", 2006.
- (15) ABNT NBR 10710 – "Líquido isolante elétrico - Determinação do teor de água", junho 2006.
- (16) ASTM D 1552. "Standard test method for sulfur in petroleum products (high-temperature method)", 2003.