



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

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

**GRUPO – XIII**

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

**EXPERIÊNCIA DA CEMIG – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) ASSOCIADA À  
ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS) NA ANÁLISE DE FALHA DOS EQUIPAMENTOS DO  
SISTEMA ELÉTRICO**

**Laís Martins Marques Chaves (\*)  
Roberto Couceiro Lois  
Dayve José Vassalo**

**Adriana de Castro Passos Martins  
Marina Graciele de Lima Ribeiro  
CEMIG GT**

**Costabile Di Sessa  
João Geraldo M. Silva**

**RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo apresentar a experiência que a CEMIG a na aplicação da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) como subsídio para a análise de modos de falha de equipamentos de geração e transmissão.

**PALAVRAS-CHAVE**

MEV, EDS, Análise, Falha, Manutenção.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Prevenir e corrigir falhas são objetivos primários da engenharia de manutenção e, para tanto, é necessário conhecer os modos como equipamentos falham. A Análise de Falha, essencial na Manutenção Centrada na Confiabilidade, é utilizada na eliminação das perdas através da neutralização sistemática da causa raiz de cada falha ou defeito. Por meio dela, é possível definir medidas que dificultem a ocorrência da falha, que limitem seus efeitos ou que aumentem a probabilidade de detecção do seu tipo e causa, proporcionando a elevação dos índices de eficiência, maior disponibilidade dos equipamentos e maior confiabilidade operacional. A Análise de Falha é realizada com o objetivo de diminuir a probabilidade da ocorrência de falhas na fase de projeto, de diminuir a probabilidade de falhas potenciais na planta já instalada, de diminuir erros e de aumentar a qualidade da transmissão e geração de energia elétrica. Sua importância é proporcionar melhor conhecimento dos problemas, resultando em ações preventivas de melhoria e diminuição de custos.

Como os materiais construtivos dos equipamentos são componentes que não podem ser desconsiderados em uma Análise de Falha, a aplicação da Microscopia Eletrônica de Varredura tem pode contribuir no diagnóstico das causas de falhas dos equipamentos do sistema elétrico e, portanto, seu uso tem ser tornado cada vez mais frequente pela CEMIG. O Microscópio Eletrônico de Varredura (FIGURA 01) é capaz de produzir imagens de alta resolução e ampliações da ordem de milhares de vezes. A imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe de elétrons na amostra sob vácuo e a imagem representa o mapeamento dos elétrons emitidos ou espalhados pelo material analisado. Devido à maneira como a imagem é formada, ela possibilita, em tons de cinza, uma boa noção de profundidade devido à aparência tridimensional das amostras na imagem, revelando a morfologia dos seus componentes, o que pode ser relacionado com o processo físico que os gerou.

(\*) Rua Nadir, nº 720 – Prédio 1 – CEP 30.770-420 Belo Horizonte, MG, – Brasil  
Tel: (+55 31) 3506-2865– Email: lais.chaves@cemig.com.br



FIGURA 01: Microscópio Eletrônico de Varredura associado ao Espectrômetro por Energia Dispersiva [2]

Ao Microscópio Eletrônico de Varredura, pode ser acoplado o sistema de EDS (FIGURA 01) o qual possibilita a determinação da composição qualitativa ou semi-quantitativa das amostras a partir da emissão de raios X característicos. Como os subníveis eletrônicos mais internos de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, por meio da utilização de um detector instalado ao equipamento, determinar quais os elementos químicos estão presentes no ponto de incidência do feixe e, assim identificar rapidamente que elemento está sendo observado. O uso em conjunto do EDS com a MEV é de grande importância na caracterização de materiais elétricos, pois auxilia na identificação de quais substâncias, desde que sólidas, estão presentes no interior do equipamento o que, associada ao conhecimento técnico e à experiência, proporciona um bom direcionamento de quais componentes foram expostos à falha. Enquanto a MEV proporciona nítidas imagens por meio das quais é possível, por exemplo, identificar se o particulado metálico é oriundo de corrosão ou proveniente de arrancamento recente ou antigo, a EDS permite sua imediata identificação.

As de MEV e EDS devem ser utilizadas em associação com técnicas complementares para a avaliação (como, por exemplo, análises do óleo isolante ou lubrificante do equipamento: espectrometria de absorção atômica, espectroscopia de infravermelho, viscosidade, densidade, teor de água, pH e acidez. A associação dessas técnicas, juntamente com a análise do ponto de vista elétrico e sistêmico de uma falha, é necessária para se chegar a um diagnóstico final confiável e completo, para monitorar a condição de equipamentos e para apoiar à decisão estratégica do Agente.

## 2.0 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA ASSOCIADA À ESPECTROSCOPIA POE ENERGIA DISPERSIVA

O princípio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela perfeitamente sincronizada com a varredura do feixe incidente. A maioria dos instrumentos usa como fonte de elétrons um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo) mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 1 a 50 kV. Essa diferença de potencial provoca a aceleração dos elétrons em direção ao eletrodo positivo, e também provoca o aquecimento do filamento. O feixe é, em seguida, focalizado sobre a amostra por uma série de lentes eletromagnéticas com abertura menor que 4 nm [1] (FIGURA 02 a).

O elétron do feixe eletrônico ao atingir a superfície da amostra irá interagir com os átomos da amostra. Como consequência da presença do potencial atômico e nuclear da amostra este elétron sofrerá modificação na sua velocidade inicial tanto na direção quanto no módulo (magnitude). A forma do volume de interação também é influenciada pela estrutura interna do material. Assim, o elétron perde energia no seu caminho através do material. Esta energia é então liberada da amostra de diferentes formas, dependendo do tipo de interação entre o elétron primário e os átomos da amostra. Como resultado das interações, o elétron pode se tornar um elétron retroespalhado, com energia máxima igual a energia do elétron primário (neste caso ocorreu somente uma única colisão) ou um elétron secundário, quando há ionização e os elétrons produzidos deixam o material com uma energia média de 2 a 5 eV. Na Microscopia Eletrônica de Varredura, dentre todos os sinais, o que fornece a imagem de maior resolução é a dos elétrons secundários e por isso é o mais utilizado [5]. O feixe resultante é então coletado por detectores adequados e convertido em um sinal de vídeo.

O EDS (Energy Dispersive X-ray detector, EDX ou EDS) é um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x (FIGURA 02 b). Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar

quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado. O diâmetro reduzido do feixe permite a determinação da composição mineral em amostras de tamanhos muito reduzidos ( $< 5 \mu\text{m}$ ), permitindo uma análise quase que pontual [6].

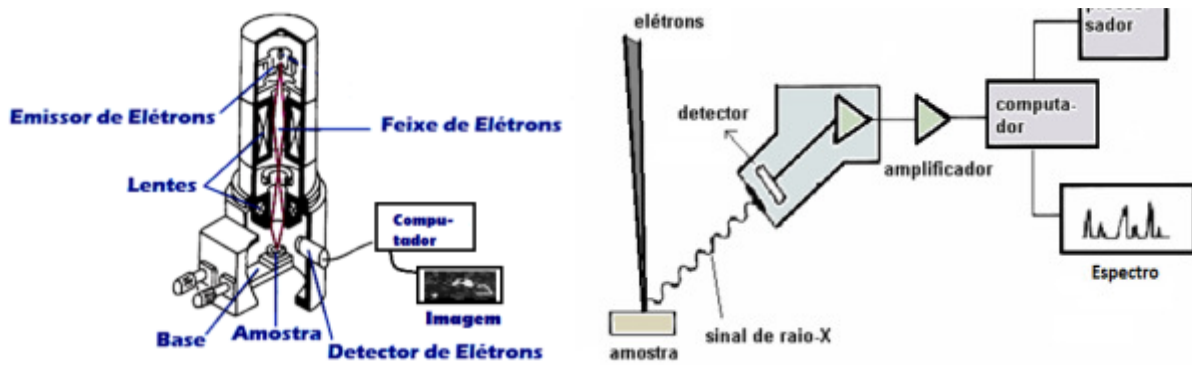


FIGURA 02: Esquema de funcionamento: (a) do MEV [3] (b) do EDS [4]

### 3.0 - EXPERIÊNCIA DA CEMIG – ESTUDOS DE CASO

#### 3.1 Mancal de Escora

Um Mancal de Escora passou por uma reforma, na qual se fez a troca da carga de óleo lubrificante do mesmo e após esse período, procedeu-se a realização de ensaios de monitoramento preditivo do equipamento. Nessas análises, percebeu-se um nível de particulado elevado. O nível de sujeidade estava mais elevado do que o recomendado para óleo lubrificante em operação em mancais.. Foi realizada uma o filtro magnético do mancal e, após quatro horas de operação, coletou-se amostra do óleo lubrificante. As partículas presentes, observadas por microscopia ótica, apresentavam indícios de arrastamento metálico recente (FIGURA 03).

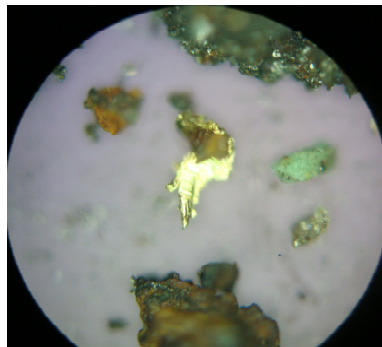


FIGURA 03: Análise microscópica do material particulado do mancal de escora – aumento 600x

Com a finalidade de confirmar a natureza do particulado, realizou-se MEV no material particulado (FIGURA 04) e EDS (TABELA 01).

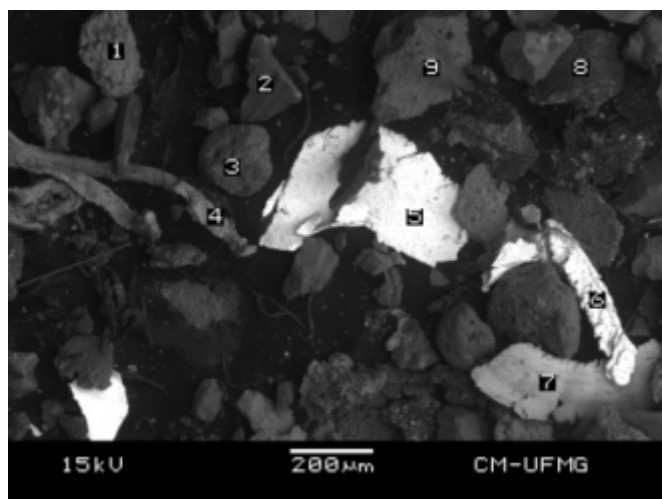
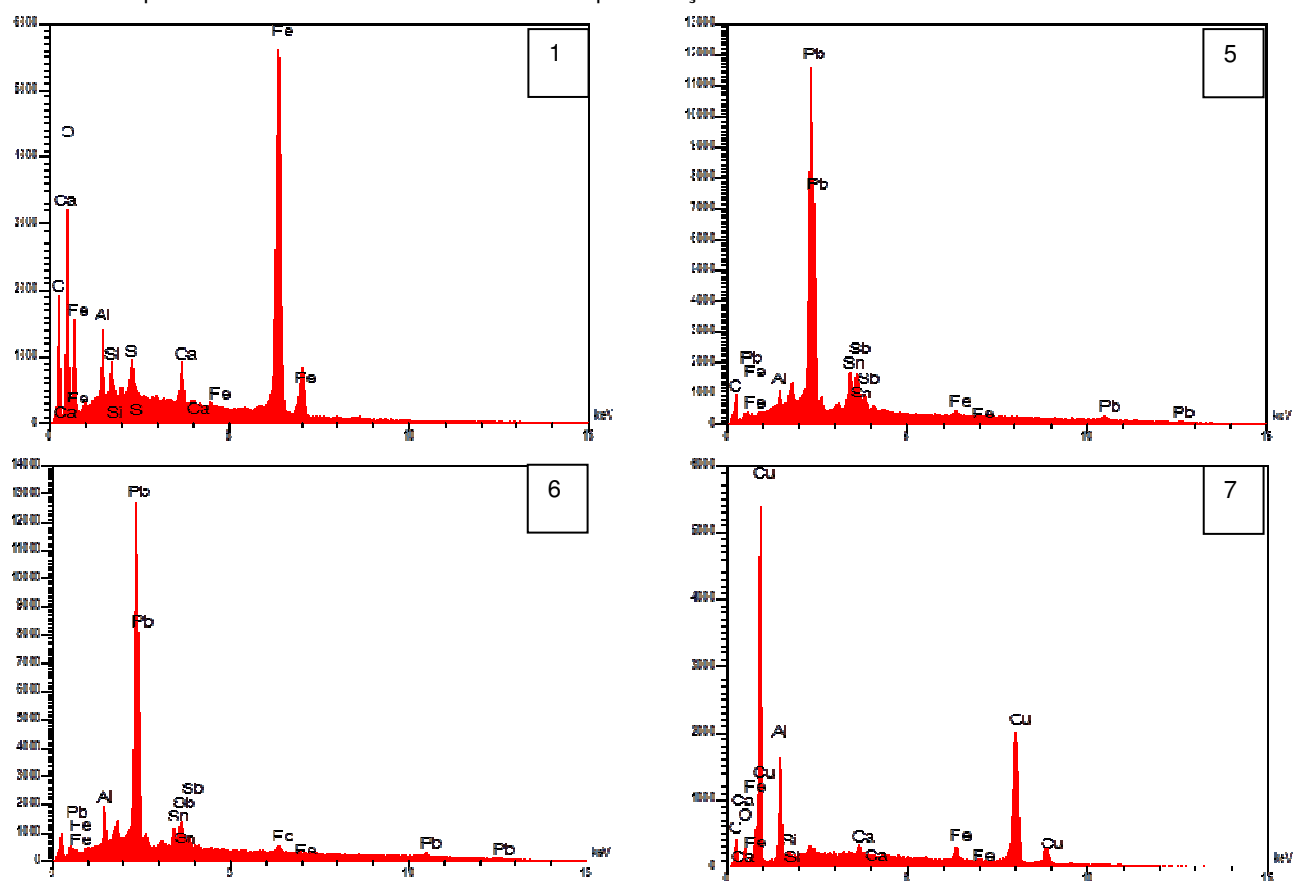
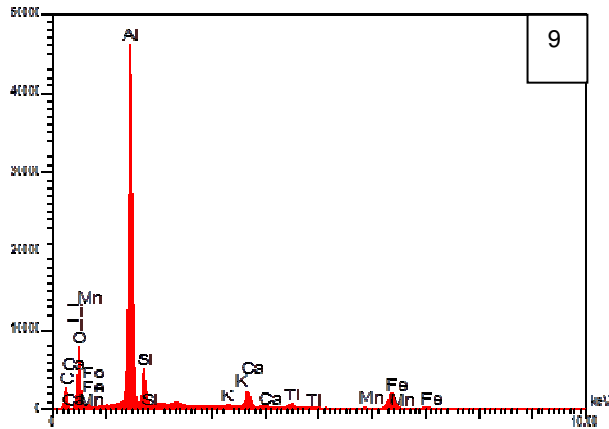


FIGURA 04: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na escala de referência de 200μm referente ao particulado do óleo do mancal de escora após filtração

TABELA 01: Espectroscopia de raios-x por energia dispersiva (EDS) dos pontos identificados na FIGURA 02 referentes ao particulado do óleo do mancal de escora após filtração





Pela análise dos espectros de EDS do material particulado retido no filtro, foram encontrados partes da trama do próprio filtro magnético (óxido de ferro, possivelmente oriundo de corrosão do mancal) e foram identificados limalha de cobre (FIGURA 04, ponto 7). Observou-se que a quantidade mais significativa de partículas referia-se a partículas recentes de metal patente na amostra (FIGURA 04, pontos 5 e 6) originárias, muito provavelmente, do atrito indevido entre partes do mancal. Como esse equipamento passou por grande reforma antes do aparecimento dessas partículas nas amostras de óleo lubrificante, havia indícios de que tal problema podia ter sido originário dessa manutenção. Portanto, a utilização de MEV-EDS tornou evidente a necessidade de uma inspeção para detecção do ponto de arrastamento no mancal e seu posterior reparo.

### 3.2 Contatos Metálicos de Disjuntores

Em condições normais, o gás hexafluoreto de enxofre, utilizado como isolante em disjuntores, é quimicamente inerte e estável e sua reatividade está entre as mais baixas de todas as substâncias. Descargas elétricas causam uma decomposição do gás, de forma proporcional a energia gerada e esta reação é reversível quando não há presença de umidade. No entanto, na presença de umidade em quantidade superior à recomendada, há a formação de compostos corrosivos, que podem causar danos e falha operacional, em particular aos equipamentos elétricos.

Com o objetivo de se apoiar na análise da provável causa de falha de contatos metálicos (FIGURA 05) de disjuntores, realizou-se a MEV associada à EDS conforme apresentado nas TABELAS 02 e 03.

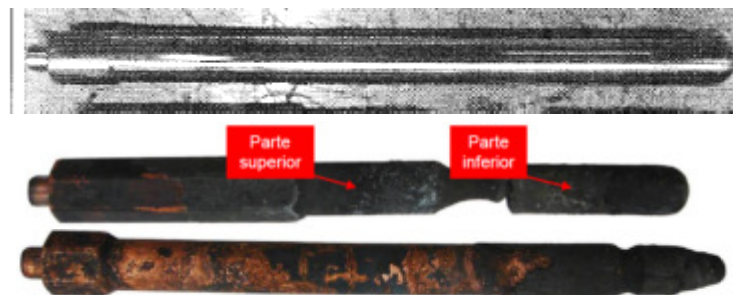


FIGURA 05: (a) Pino metálico novo (b) Pino metálico 01 após falha e (c) Pino metálico 02 após falha

TABELA 02: (a) Imagem de MEV da superfície do pino metálico 01 (b) Espectros de energia dispersiva dos pontos indicados em (a)

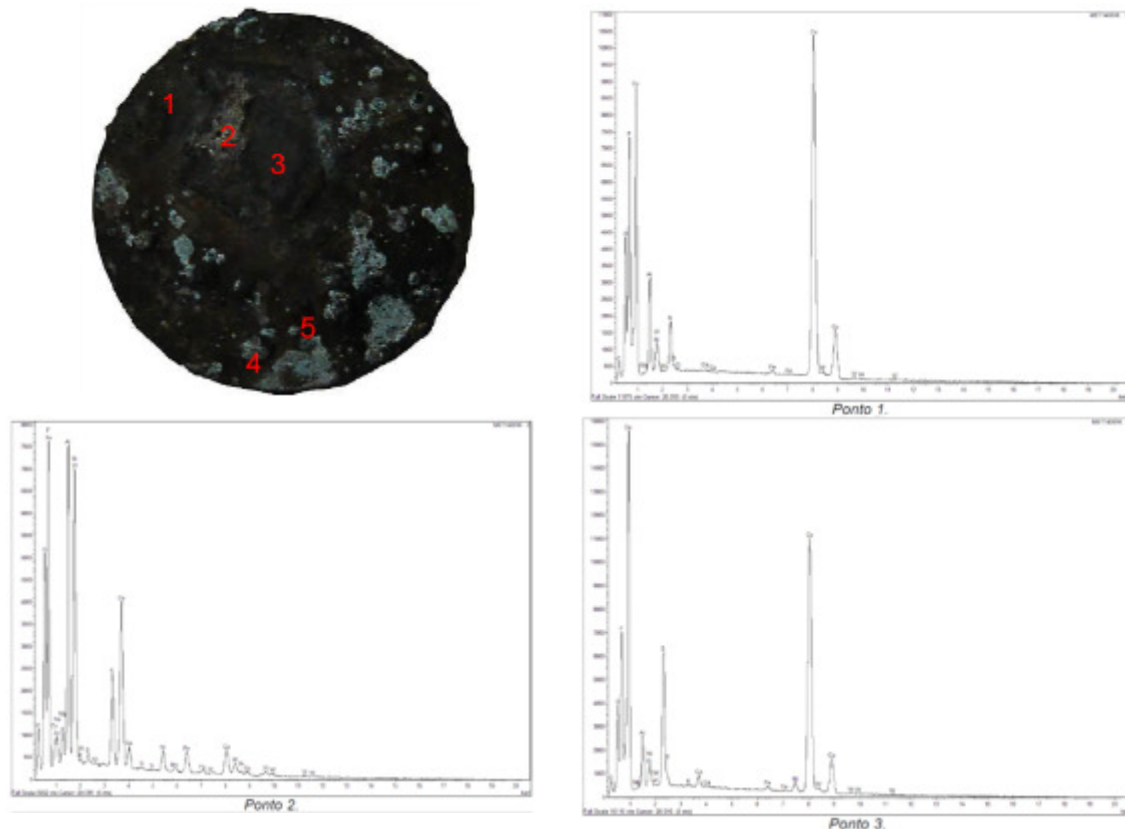
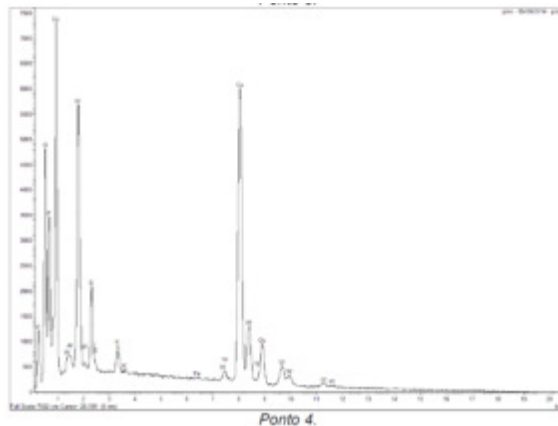


TABELA 03: (a) Imagem da superfície do pino metálico 02 (b) Espectro de energia dispersiva do ponto indicado em (a)



Em função dos produtos de corrosão encontrados nos pinos metálicos, pode-se inferir que ocorreu penetração de umidade no interior dos disjuntores, evidenciado pela presença de sulfeto de cobre, de coloração enegrecida, encontrado: sobre todo o corpo do pino 01 (TABELA 02, pontos 1 e 3), tanto na parte composta basicamente de cobre, quanto na liga de tungstênio e cobre (77,5% de W e 21,6% de Cu); sobre a parte do corpo do pino 02 (TABELA 03), na região composta pela liga de tungstênio e cobre (77,5% de W e 21,6% de Cu).

Ocorreu a corrosão de outras partes do equipamento do pino 01 devido à combinação de subprodutos da decomposição do hexafluoreto de enxofre, umidade e descargas elétricas recorrentes. Os produtos da corrosão de partes contendo ferro e alumínio depositaram-se sobre as superfícies em contato com o gás, inclusive sobre o pino, o que esclarece a presença desses elementos nas análises de EDS (TABELA 02, ponto 2).



### 3.3 Transformador de Corrente 230kV - TC

Na desmontagem para análise da falha de um TC, foi constatado o envolvimento de sua blindagem para equalização de potencial (fita semicondutiva de carbono), pois se verificou que a mesma estava salpicada com projeções do metal em toda sua área (FIGURA 06).



FIGURA 06 (a) Montagem de TC em fábrica - virola (b) Montagem de TC em fábrica, fita semicondutiva enrolada sobre a virola (c) Estado da fita semicondutiva encontrada na desmontagem para análise de falha

Em análise de MEV acoplada a EDS realizada nas fitas condutivas, pode-se constatar que o metal encontrado sobre elas era alumínio (ver FIGURA 07 e TABELA 04).

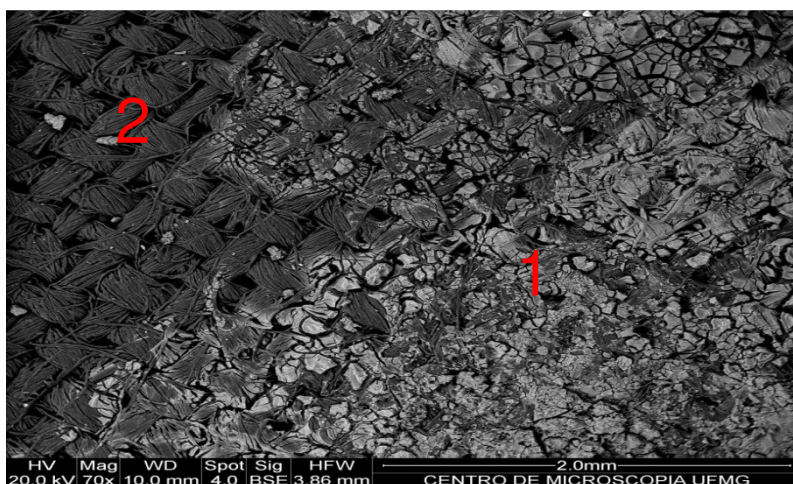
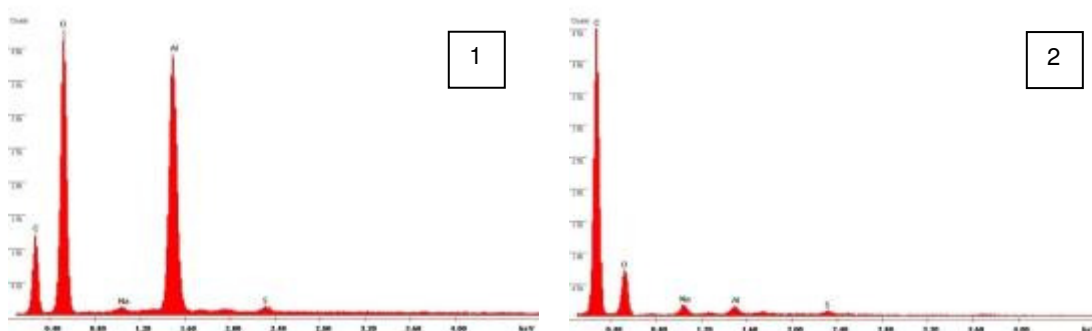


FIGURA 07: Microscopia Eletrônica de Varredura na escala de referência de 2,0mm referente à amostra de fita semicondutiva de carbono do TC que falhou

TABELA 04: Espectroscopia por Energia Dispersiva de raios-x (EDS) dos pontos identificados na FIGURA 09 referentes à amostra de fita semicondutiva de carbono do TC que falhou



Dessa forma, foi possível a confirmação da suspeita criada durante a inspeção de análise de falha de que a corrente disruptiva havia passado pela virola do TC, constituída de alumínio, causando sua fusão e afetando ainda a fita semicondutiva, já que a mesma foi coberta com respingos do alumínio fundido oriundo da virola.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

A utilização conjunta de MEV e EDS apresenta uma contribuição significativa no diagnóstico e na Análise de Falha dos equipamentos do sistema elétrico, baseando-se na experiência adquirida até o momento pela CEMIG. A capacidade do MEV de produzir imagens de altas resolução e ampliação das substâncias sólidas encontradas dentro dos equipamentos proporciona identificação da morfologia das mesmas o que permite inferir qual processo físico que as gerou, seja arrancamento, corrosão ou mesmo falha térmica. O EDS, por sua vez, ao propiciar a identificação pontual dos componentes sólidos das amostras, possibilita a associação do sólido encontrado à parte do equipamento ou do seu preenchimento que o originou, seja sólida, líquida, gasosa. Dessa forma, a confiabilidade final do diagnóstico é aumentada e há melhor direcionamento para o processo corretivo do componente exposto à falha. A técnica descrita neste trabalho utilizada em associação com o conhecimento de engenharia, com a experiência dos agentes e com análises complementares para a avaliação da condição de óleos lubrificantes e isolantes pode proporcionar um diagnóstico final mais confiável e completo,

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DEDAVID B. A., GOMES C. I. e MACHADO G. Microscopia Eletrônica de Varredura – Aplicações e preparação de amostras. EDIPUCRS, 2007.
- (2) ESQUEMA\_MEV.GIF adaptado. Disponível em [www.degeo.ufop.br](http://www.degeo.ufop.br). Acessado em 03/02/2015.
- (3) MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) – JEOL – JSM 5600 PV, ACOPLADO COM SISTEMA DE EDX adaptado. Disponível em <http://w2.fop.unicamp.br/cmi>. Acessado em 03/02/2015.
- (4) KESTENBAC, H.J.; BOTA FILHO W.J. Microscopia eletrônica transmissão e varredura. São Paulo: ABM, 1994. Adaptado.
- (5) MALISKA A. M. Microscopia Eletrônica de Varredura. Disponível em [http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/mev\\_apostila.pdf](http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/mev_apostila.pdf). Acessado em 03/02/2015.
- (6) UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, FACILIDADES LABORATORIAIS. Disponível: <http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>. Acessado em: 03/02/2015.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Laís Martins Marques Chaves

Nascida em Belo Horizonte em 1988, graduou-se em 2011 em Engenharia Química pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Trabalha como Engenheira de Planejamento e Manutenção da Geração e da Transmissão da CEMIG no monitoramento preditivo dos equipamentos do setor elétrico desde que entrou na empresa.